

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL  
FACULTAD REGIONAL CORDOBA**

**MARÍA JOSEFINA POSITIERI**

**PROPIEDADES FISICOMECAÑICAS Y DURABILIDAD DEL  
HORMIGÓN COLOREADO**

Tesis presentada en la  
Facultad Regional Córdoba de la  
Universidad Tecnológica Nacional para  
obtención del título de Doctor en Ingeniería

**Director de Tesis: Prof. Dr. Paulo Helene  
Codirector de Tesis: Prof. Dr. Eduardo Herrero**

Córdoba, Argentina

2005

Dedico este trabajo:  
a mi compañero en la vida, Angel;  
a mi madre y a mi padre, Victoria y Edgardo;  
a mis hermanos, Edgardo, Víctor y Rosana;  
a los "soles" de mi vida, Valentín, Nicolás, Guadalupe,  
Luciana, Nahuel, Paula, Gaspar y otro Valentín!

## Agradecimientos

Si tuviera que definirme en pocas palabras diría que soy una agradecida a la vida...  
¡Pero que difícil resumir en pocas palabras el agradecimiento a todas las personas que colaboraron conmigo en estos cinco años!

Diría que fueron años de experiencias personales enriquecedoras, mucho trabajo sostenido, pocos recursos, abriendo camino siempre acompañada...

Por eso quisiera decir:

**¡GRACIAS A TODOS LOS QUE HICIERON POSIBLE ESTE TRABAJO!**

Pero algunas personas fueron y son esenciales... Por eso quisiera agradecer especialmente:

A mi familia, por estar siempre ahí, aceptándome y alentándome.

A mi Director de Tesis, Paulo Helene, por abrirme las puertas de un mundo nuevo.

Al Director del GINTEMAC, Angel Oshiro, por compartir tantos conocimientos, discusiones, alegrías y tristezas, siempre adelante!!!

A Eduardo Herrero y toda la "gente linda" del CITEQ, por incentivar y por tanta paciencia y comprensión.

A Luis Canali por alentarme a iniciar el camino del doctorado y confiar en mí; también a Martita y a José por escucharme y alentarme en tiempos difíciles .

A la U.S.P. por recibirme abierta y gratuitamente; a mis colegas, especialmente a Tiago, Marcos, Charles, Eliana, Carine, Renata, Paulo, también a Engracia, por tantos momentos lindos compartidos; siempre tengo "saudades" de la cordialidad brasileña.

A mis compañeros y amigos, Anahí, Cristian, Gustavo, Marcela, Sebastián, por tantas horas de trabajo y "mate con criollitos y dulce de leche"...

A mis amigos, Claudia Beltramone, Carlos Baronetto, Susana, Ana María y Carlos, por comprender mis ausencias y sostener con sus presencias.

A Marcelo Tavella, Oscar Anuziata, Carolina Ávila, por todas las sugerencias, recomendaciones y el constante apoyo recibido.

A Patricia Irico, Marcelo Tissera y sus colaboradores del Laboratorio de Estructuras de la F.C.E.F. y N. de la U.N.C., gracias por muchas horas de trabajo con buena onda.

A César Naselli, Cecilia Cherubini y Adriana De Urutiaga por brindarme la oportunidad de aprender y enseñar en el Instituto del Diseño de la U.C.C.

A las personas y a las empresas que apoyaron el desarrollo de esta tesis:

Juan Blangino y Humberto Nievas, de Pisos Blangino,

Rafael Arena y todo el personal de Premoldeados Arena Hnos.,

Alfredo Alemán y Luis Assaf, de Tensolite,

Patricio Corallo y Gastón Fornasier del Centro Técnico Loma Negra.

Al sistema de enseñanza público y gratuito de la República Argentina, a la Universidad Tecnológica Nacional por otorgarme la beca para docentes y a la Facultad Regional Córdoba y a sus autoridades por su constante apoyo.

Positieri, M. J. "Propiedades Fisicomecánicas y Durabilidad del Hormigón Coloreado". Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional de Córdoba, Programa de Doctorado, 2005. (PhD tesis).

## **Resumen**

El hormigón coloreado es un material que ofrece padrones de belleza diferenciados, quiebra la monotonía de las construcciones y puede ser más económico como solución de terminación de las superficies. Su utilización en Europa está ampliamente difundida y en América Latina existe una tendencia creciente, con recientes aplicaciones en Argentina. Los estudios relacionados con este tipo de hormigón especial se caracterizan por ser innovadores ya que existe una deficiencia de investigaciones en este tema y un reducido acervo bibliográfico, en especial en los aspectos relacionados con la durabilidad.

La influencia de los pigmentos en las propiedades del hormigón y en su durabilidad es aún discutida; en estado fresco el porcentaje y tipo de pigmento pueden afectar a la trabajabilidad de la mezcla; en estado endurecido se discute si afectan la resistencia a compresión y en aspectos referidos a la durabilidad, es escasa la información con respecto a la estabilidad del color frente a las acciones climáticas.

Con el objetivo de contribuir al conocimiento de las propiedades de los hormigones coloreados se desarrolla en este trabajo un estudio teórico experimental que abarca la elaboración de una familia de hormigones coloreados con pigmentos (óxidos de hierro) de colores rojo, negro y amarillo; en estos hormigones se determinan sus propiedades en estado fresco y endurecido y su desempeño con respecto a la estabilidad del color y alteraciones superficiales, realizando un aporte especial en cuanto al análisis de las mediciones de color y la exposición del hormigón coloreado a ciclos de envejecimiento acelerado.

Por último se presenta la transferencia de los conocimientos al medio en dos aplicaciones: el análisis de la medición del color y su vinculación con la eflorescencia en elementos producidos en una planta de premoldeados de hormigón y la dosificación, análisis de texturas y colores de hormigones coloreados para su aplicación en frisos de hormigón visto.

Positieri M.J - Colored Concrete Physical and Mechanical Properties and Durability - Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional (National Technological University), Facultad Regional de Córdoba (Regional Faculty of Cordoba) - Doctorate Program - 2004 (Ph.D. thesis)

## **Abstract**

The colored concrete is a material which offers differentiated beauty patterns, breaks the constructions monotony and can be more economical as a surface finish solution. It is widely used in Europe and there is a growing tendency in Latin America, with recent uses in Argentina. The studies related to this kind of special concrete are innovative since not much research about the topic has been done and the bibliography is limited, especially in relation to durability.

The influence of pigments in the concrete properties and its durability is still debated. In fresh state, the percentage and kind of pigment can affect the mix workability. In hardened state, it is debated if they affect the compressive strength and, concerning durability, there is not enough information in relation to color stability against climate agents.

In order to contribute to the knowledge of colored concrete properties, a theoretical-experimental study covering the elaboration of a family of concretes colored with red, black and yellow pigments (iron oxide) is developed in this work. In these concretes, their properties in fresh and hardened state and their performance related to color stability and surface changes were specified, becoming an important contribution with regard to color-measurements analysis and colored concrete exposition to accelerated ageing cycles.

Finally, the transference of knowledge is presented in two applications: the color measurement analysis and its relation to efflorescence in elements produced in a pre-molding plant, and mixture, texture analysis and colors of colored concretes to be applied in uncovered concrete decorative friezes.

Positieri, M. J. "Propiedades Fisicomecánicas y Durabilidad del Hormigón Coloreado". Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional de Córdoba, Programa de Doctorado, 2005. (PhD tesis).

## INDICE

	<b>página</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
IMPORTANCIA/JUSTIFICACIÓN .....	3
INVESTIGADORES Y CENTROS DE INVESTIGACIÓN .....	5
OBJETIVOS.....	9
ORIGINALIDAD DEL TEMA .....	9
CONTENIDO DE ESTA TESIS .....	10
<b>Capítulo 1</b>	
<b>HORMIGÓN COLOREADO</b> .....	12
1.1 INTRODUCCION .....	12
1.2 CARACTERISTICAS DEL HORMIGÓN COLOREADO.....	13
1.2.1 Definición y métodos para obtener hormigón coloreado.....	13
1.2.2 Colores, texturas y acabados.....	16
1.2.3 Productos y elementos de hormigón coloreado .....	20
1.3 MATERIALES COMPONENTES .....	25
1.3.1 Cemento .....	25
1.3.2 Agregados .....	28
1.3.3 Agua .....	31
1.3.4 Aditivos .....	31
1.3.5 Pigmentos .....	33
1.4 PROPIEDADES DEL HORMIGÓN COLOREADO .....	41
1.4.1 Propiedades en estado fresco .....	41
1.4.2 Propiedades fisicomecánicas .....	44
1.4.3 Propiedades relacionadas con la durabilidad .....	46
1.5 SISTEMAS DE MEDICION DEL COLOR .....	47
1.5.1 Colorimetría .....	49
1.5.2 Sistemas CIE .....	50
<b>Capítulo 2</b>	
<b>DURABILIDAD DEL HORMIGÓN COLOREADO</b> ....	57
2.1 INTRODUCCION .....	57
2.2 CAUSAS DE Y MECANISMOS DE DETERIORO: SÍNTOMAS .....	59
2.2.1 Fenómenos físicos .....	60
2.2.2 Fenómenos químicos .....	62

2.3 MECANISMOS DE TRANSPORTE DE AGENTES AGRESIVOS .....	67
2.3.1 Penetración de agua bajo presión .....	69
2.3.2 Succión capilar .....	70
2.3.3 Difusión .....	72
2.4 FENÓMENOS DE DEGRADACIÓN DE LA SUPERFICIE .....	73
2.4.1 Fisuración y abrasión .....	74
2.4.2 Lixiviación y eflorescencia .....	77
2.4.3 Carbonatación .....	78
2.4.4 Envejecimiento del color .....	81
2.5 ENVEJECIMIENTO ACELERADO DEL COLOR .....	86
2.5.1 Métodos de medición y ensayo de características y propiedades .....	88
2.5.2 Correspondencia entre los ensayos acelerados de intemperismo y la exposición natural .....	90

### **Capítulo 3**

#### **PLAN EXPERIMENTAL Y RESULTADOS .....**

3.1 PLANEAMIENTO GENERAL .....	91
3.2 VARIABLES DEPENDIENTES, INDEPENDIENTES E INTERVINIENTES .....	92
3.3 MATERIALES Y DOSIFICACIONES .....	94
3.3.1 Caracterización de los materiales componentes .....	94
3.3.2 Dosificaciones .....	97
3.4. MÉTODOS Y RESULTADOS DE ENSAYOS .....	107
3.4.1 Elaboración de pastones .....	107
3.4.2 Ensayos sobre hormigón en estado fresco .....	108
3.4.3 Ensayos sobre hormigón endurecido .....	114

### **Capítulo 4**

#### **DISCUSIÓN de los RESULTADOS .....**

4.1. HORMIGÓN EN ESTADO FRESCO .....	132
4.1.1 Asentamiento .....	132
4.1.2 Exudación .....	134
4.1.3 Tiempo de fraguado .....	138
4.2. HORMIGÓN EN ESTADO ENDURECIDO .....	143
4.2.1 Resistencia a compresión .....	143
4.2.2 Módulo de elasticidad estático .....	151
4.2.3 Succión capilar .....	159
4.2.4 Permeabilidad al agua .....	163
4.2.5 Absorción por inmersión, índice de vacíos .....	166

4.2.5 Carbonatación .....	168
4.2.7 Abrasión .....	169
4.2.8 Coordenadas cromáticas y mediciones del color .....	171
4.2.9 Programación de ensayos de envejecimiento acelerado y natural .....	177
<b>Capítulo 5</b>	
<b>CONCLUSIONES</b> .....	181
5.1 CONCLUSIONES ESPECIFICAS DE LA TESIS .....	181
5.1.1 De las propiedades en estado fresco .....	181
5.1.2 De las propiedades físicomecánicas .....	182
5.1.3 De las propiedades vinculadas a la durabilidad .....	183
5.1.4 De las propiedades vinculadas a la estabilidad del color .....	185
5.2 NECESIDAD DE INVESTIGACIONES FUTURAS .....	187
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	189
<b>ANEXOS</b> .....	202
TRANSFERENCIA DEL CONOCIMIENTO AL MEDIO .....	202
ANEXO I: Frisos de hormigón coloreado. Instituto del Diseño. Facultad de Arquitectura. Universidad Católica de Córdoba .....	205
ANEXO II: La medición del color en hormigones y morteros coloreados y su relación con la eflorescencia. Empresa Premoldeados de Hormigón Arena Hnos. ....	217
ANEXO III: Figuras Complementarias .....	235

## Lista de Figuras

Figura 1.1: Vista del edificio “e-Tower” y columnas de hormigón coloreado.

Figura 1.2: Vista exterior de una construcción ejecutada con bloques de hormigón coloreado. (Premoldeados Arena Hnos., 2004).

Figura 1.3: Patrón de colocación de adoquines coloreados en el Parque Sarmiento, Córdoba, Argentina. (Premoldeados Arena Hnos. 2000).

Figura 1.4: Patrón de colocación de adoquines coloreados en vivienda unifamiliar, Córdoba, Argentina. (Premoldeados Arena Hnos. 2000).

Figura 1.5: Vista de cubierta de techo realizada con tejas de hormigón coloreado.

Figura 1.6: Cementos Pórtland fillerizados disponibles en Córdoba. Se aprecia que la muestra de la izquierda presenta un tono más claro que ubicada a la derecha.

Figura 1.7: Agregados de la provincia de Córdoba.

### **Figura 1.8: Esquema de posibles agentes colorantes según TEBBE (1992).**

Figura 1.9: Colores de pigmentos verde, rojo, amarillo y negro.

Figura 1.10: Variación de la intensidad de color en función del porcentaje de pigmentación (BAYER, 1989).

Figura 1.11: Componentes de la percepción visual del color.

Figura 1.12: Modelo CIE Yxy.

Figura 1.13: Modelo CIE L\*a\*b\* del sólido de color.

Figura 1.14: Esquema del Sistema CIELAB donde se indican las coordenadas cromáticas. La variación sobre el eje L corresponde a cambios en la luminosidad y el centro del diagrama es acromático.

Figura 1.15: Evolución de L\* con el tiempo de exposición natural. La curva presenta un crecimiento hasta el punto B y luego comienza a disminuir (TEICHMANN, 1991).

### **Figura 2.1: Distribución relativa de la incidencia de las manifestaciones patológicas en estructuras de hormigón arquitectónico (Manual de Rehabilitación de Estructuras de Hormigón de CYTED 2003).**

### **Figura 2.2: Principales fenómenos físicos del deterioro del hormigón (METHA y GERWICK, 1982).**

Figura 2.3: Principales fenómenos químicos de deterioro del hormigón (METHA y GERWICK, 1982).

Figura 2.4: Ancho de fisura aceptables desde el punto de vista estético (CALAVERA RUIZ, 1996).

Figura 2.5: Variación de pH en el hormigón debido a la carbonatación. (Manual de Inspección y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado, CYTED, 1998).

Figura 2.6: Mapa de la República Argentina en el que se indican los climas presentes en el territorio nacional (Fuerza Aérea Argentina, Servicio Meteorológico Nacional, 2004).

Figura 2.7: Valores normales de temperatura y de precipitación mensual para el período 1961-1990, en ciudades de la República Argentina (Fuerza Aérea Argentina, Servicio Meteorológico Nacional, 2004).

Figura 2.8: Metodología propuesta por ASTM E 632 (adaptado de ASTM E 632).

Figura 3.1: La curva granulométrica es continua, presentando una granulometría típica para las arenas de procedencia local, ligeramente gruesas.

Figura 3.2: La curva granulométrica es continua y está comprendida entre las curvas límites.

Figura 3.3: Ejemplo de diagrama de dosificación.

Figura 3.4: Diagrama de flujo para el procedimiento de dosificación. Se presentan los pasos seguidos y la documentación necesaria y resultante del proceso.

Figura 3.5: Familias de hormigones sin pigmento y pigmentados.

Figura 3.6: Moldeo de probetas cilíndricas con hormigón pigmentado rojo.

Figura 3.7: Medición del asentamiento en hormigón con pigmento rojo.

Figura 3.8: Procedimiento para la compactación de la muestra.

Figura 3.9: Procedimiento para la determinación del agua exudada.

Figura 3.10: Procedimiento de tamizado del hormigón y dispositivo de medición de la fuerza de penetración.

Figura 3.11: Rotura normal de probetas de hormigón con pigmento amarillo sometidas al ensayo de compresión.

Figura 3.12: Probeta de hormigón con el equipo para la determinación del módulo de elasticidad estático.

Figura 3.13: Muestras impermeabilizadas lateralmente y sumergidas en agua hasta una altura de 5 mm y cubiertas con una lámina de plástico.

Figura 3.14: Disposición de las probetas durante el ensayo de succión capilar.

Figura 3.15: Esquema del ensayo de permeabilidad al agua. Indicación del perfil de penetración de agua en el corte de la probeta cilíndrica de hormigón.

Figura 3.16: Esquema del corte de las probetas y ubicación de los puntos en los que se determinó la profundidad de carbonatación.

Figura 3.17: Probetas de hormigón con pigmento amarillo con aplicación de fenoftaleína en la que se aprecia el frente de carbonatación.

Figura 3.18: Máquina de Dorry. Detalle de los portamuestras y las sobrepesas necesarias para garantizar la presión indicada en la norma.

Figura 3.19: Incorporación del abrasivo constituido por arena silícea.

Figura 3.20: En la fotografía izquierda se observa el equipo con la sonda, el display y la placa de calibración y en la derecha, la determinación de las lecturas.

Figura 3.21: Equipo Q SUN 3000 Xenon Test Chamber. Detalle de la placa portamuestras.

Figura 3.22: Esquema de la cámara de envejecimiento acelerado. Se indica la posición de las lámparas y picos rociadores de agua.

Figura 4.1: Volumen de agua exudada para el hormigón de referencia y los pigmentados.

Figura 4.2: Porcentaje de exudación de agua para los grupos de hormigones.

Figura 4.3: Porcentaje de exudación de los hormigones en función de la relación a/c.

Figura 4.4 : Comparación del porcentaje de exudación de agua en función de la resistencia a compresión a 28 días.

Figura 4.5: Tiempo inicial y final de fraguado para los hormigones del grupo 4.

Figura 4.6: Tiempo inicial y final de fraguado para los hormigones del grupo 5.

Figura 4.7: Tiempo inicial y final de fraguado para los hormigones del grupo 6.

Figura 4.8: Tiempo inicial y final de fraguado para los hormigones de referencia y pigmentados.

Figura 4.9: Diagrama de dosificación, resistencia a compresión, edad 28 días.

Figura 4.10: Diagrama de dosificación, resistencia a compresión, edad 91 días.

Figura 4.11: Diagrama de dosificación, resistencia a compresión, edad 182 días.

Figura 4.12: Resistencia a compresión a los 28 días en función de  $a/c$ .

Figura 4.13: Resistencia a compresión a los 91 días en función de  $a/c$ .

Figura 4.14: Resistencia a compresión a los 182 días en función de  $a/c$ .

Figura 4.15: Evolución de la resistencia a compresión con la edad de ensayo.

Figura 4.16: Evolución de la resistencia a compresión con la edad de ensayo para el hormigón de referencia y los hormigones pigmentados.

Figura 4.17: Diagrama de dosificación, módulo de elasticidad, edad 28 días.

Figura 4.18: Diagrama de dosificación, módulo de elasticidad, edad 91 días.

Figura 4.19: Diagrama de dosificación, módulo de elasticidad, edad 182 días.

Figura 4.20: Módulo de elasticidad a los 28 días en función de  $a/c$

Figura 4.21 Módulo de elasticidad a los 91 días en función de  $a/c$ .

Figura 4.22 Módulo de elasticidad a los 182 días en función de  $a/c$ .

Figura 4.23 Módulo de elasticidad en función de la resistencia a compresión a los 28 días de edad.

Figura 4.24 Módulo de elasticidad en función de la resistencia a compresión a los 91 días de edad.

Figura 4.25: Módulo de elasticidad en función de la resistencia a compresión a los 182 días de edad.

Figura 4.26: Módulos de elasticidad según distintos Reglamentos.

Figura 4.27: Succión capilar en función de la raíz cuadrada del tiempo en el hormigón de referencia y pigmentados a la edad de 28 días.

Figura 4.28: Succión capilar en función de la raíz cuadrada del tiempo en el hormigón de referencia y pigmentados a la edad de 91 días.

Figura 4.29: Succión capilar en función de la raíz cuadrada del tiempo en el hormigón de referencia y pigmentados a la edad de 182 días.

Figura 4.30: Penetración de agua para el hormigón de referencia y pigmentados.

Figura 4.31: Comparación de la penetración al agua de la familia de hormigones.

Figura 4.32: Penetración de agua en función de la relación  $a/c$  para el hormigón de referencia y los pigmentados.

Figura 4.33: Resultados de absorción por inmersión para el hormigón de referencia y los pigmentados.

Figura 4.34: Resultados de índice de vacíos por inmersión para el hormigón de referencia y los pigmentados.

Figura 4.35: Profundidad de carbonatación, por grupos, para el hormigón de referencia y los pigmentados.

Figura 4.36: Variación de la profundidad de desgaste en función de a/c.

Figura 4.37: Volumen de agua exudada por unidad de superficie.

Figura 4.38: Variación de la luminosidad de las muestras durante el ciclo de envejecimiento acelerado.

Figura 4.39: Variación de la luminosidad de las muestras en función de la relación a/c.

Figura 4.40: Variación de la saturación durante el ciclo de exposición; la saturación, en general aumenta dando tonos más vivos, después de la limpieza de las muestras.

Figura 4.41: Desviación del color total para los hormigones de referencia y pigmentado con óxido rojo.

Figura 4.42: Desviación del color total para los hormigones pigmentados con óxido amarillo.

Figura 4.43: Desviación del color total para los hormigones pigmentados con óxido negro.

Figura 4.44: Propuesta de adaptación de la metodología de la ASTM E 632 para la determinación de la variación de color en hormigones coloreados.

## Lista de tablas

Tabla 1.1: Métodos y aplicaciones del hormigón coloreado (BS EN 206-1/BS 8500, 2000).

Tabla 1.2: Tipos de acabados según el método empleado. ESQUEDA HUIDOBRO (1996).

Tabla 1.3: Clasificación sistemática de los diferentes aspectos de la superficie de hormigón. ESQUEDA HUIDOBRO (1996).

Tabla 1.4: Identificación del nombre común y fórmula química de pigmentos a base de óxidos utilizados en hormigones.

Tabla 1.5: Tamaño medio de las partículas de pigmento (óxidos) según BARRERA y otros (2002).

Tabla 1.6: Porcentajes indicativos de absorción de agua de óxidos según BARRERA y otros (2002).

Tabla 1.7: Parámetros colorimétricos.

Tabla 1.8: Valores de diferencia de color total y evaluación a simple vista en la industria de la pintura.

Tabla 2.1: Clases de exposición generales que producen corrosión de armaduras (adaptado del Proyecto de Reglamento CIRSOC 201, 2002).

**Tabla 2.2: Clases específicas de exposición que pueden producir degradación distinta de la corrosión de armaduras (adaptado del Proyecto de Reglamento CIRSOC 201, 2002).**

Tabla 2.3: Clasificación de los factores de degradación y definición de las características más importantes (ASTM E 632)

Tabla 2.4: Transferencia de fluido y procesos de transporte en el hormigón BUENFELD (2000).

Tabla 2.5: Principales mecanismos de deterioro de las superficies de hormigón. Manual de la Red Rehabilitar de CYTED (2003).

Tabla 2.6: Clasificación y definición de los tipos de ensayos a realizar en materiales (adaptado de ASTM E 632).

Tabla 3.1: Resumen de los resultados de ensayos realizados al agregado fino.

Tabla 3.2: Resumen de los resultados de ensayos realizados al agregado grueso.

Tabla 3.3: Identificación de los pigmentos utilizados.

Tabla 3.4: Características de los pigmentos utilizados.

Tabla 3.5: Resultados de ensayos físicos y resistencia a compresión del cemento portland.

Tabla 3.6: Nomenclatura utilizada para la familia de hormigones identificando los tres grupos según el contenido de agregados y los colores de pigmentos utilizados.

Tabla 3.7: Dosificaciones para el grupo de hormigones 5.

Tabla 3.8: Dosificaciones para el grupo de hormigones 6.

Tabla 3.9: Dosificaciones para el grupo de hormigones 4.

Tabla 3.10: Resumen de las dosificaciones considerando los agregados en estado seco.

Tabla 3.11: Resumen de las dosificaciones considerando los agregados en estado saturado a superficie seca.

Tabla 3.12: Resultados de asentamientos obtenidos de los ensayos para los hormigones de referencia y pigmentados.

Tabla 3.13: Resultados promedio del peso de la unidad de volumen (PUV) para los hormigones en estudio.

Tabla 3.14: Resultados del ensayo de exudación.

Tabla 3.15: Resultados del ensayo de tiempo de fraguado.

Tabla 3.16: Tiempos de fraguado inicial y final.

Tabla 3.17: Resumen de dimensiones de las probetas según el ensayo a realizar.

Tabla 3.18: Resultados de ensayos a compresión, organizados por color.

Tabla 3.19: Resultados de ensayos a compresión, organizados por grupos.

Tabla 3.20: Resultados del ensayo de módulo de elasticidad, organizados por grupos.

Tabla 3.21: Resultados del ensayo de módulo de elasticidad, organizados por color.

Tabla 3.22: Resultados del ensayo de succión capilar a los 28 días de edad.

Tabla 3.23: Resultados del ensayo de succión capilar a los 91 días de edad.

Tabla 3.24: Resultados del ensayo de succión capilar a los 182 días de edad.

Tabla 3.25: Resultados del ensayo de permeabilidad al agua.

Tabla 3.26: Resultados del ensayo de absorción e índice de vacíos.

Tabla 3.27: Resultados de la determinación de la profundidad de carbonatación.

Tabla 3.28: Resultados del ensayo de desgaste.

Tabla 3.29: Coordenadas cromáticas obtenidas para los períodos de tiempo establecidos, antes y después de la limpieza superficial.

Tabla 4.1: Reproducción de las tolerancias en los asentamientos fijadas en el Reglamento CIRSOC 201 (1982).

Tabla 4.2: Resultados de asentamientos obtenidos de los ensayos para los hormigones de referencia y pigmentados.

Tabla 4.3: Tiempo inicial y final de fraguado para los hormigones del grupo 4.

Tabla 4.4: Tiempo inicial y final de fraguado para los hormigones del grupo 5.

Tabla 4.5: Tiempo inicial y final de fraguado para los hormigones del grupo 6.

Tabla 4.6: Tiempo inicial y final de fraguado para los hormigones de referencia y pigmentados.

Tabla 4.7: Evaluación estadística de la resistencia a compresión.

Tabla 4.8: Evaluación estadística del módulo de elasticidad.

Tabla 4.9: Expresiones del módulo de elasticidad según varios Reglamentos.

Tabla 4.10: Productos de hormigón coloreado, requisitos y características vinculados con los posibles factores de degradación y con los ensayos a realizar para definir sus parámetros de calificación.

# NOMENCLATURA

## Letras mayúsculas usadas como abreviaturas:

A:	Absorción en agregados
AATH:	Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón
ACI:	American Concrete Institute
ASTM:	American Society for Testing and Materials
C :	Contenido de cemento por m <sup>3</sup> de hormigón en peso
<i>fib</i> /(CEB-FIP):	Federation International du Betón / (Comité Euro-International du Betón)
CIRSOC:	Centro de Investigaciones de Reglamentos para Obras Civiles
CPN:	Cemento pórtland normal. Cuando se adiciona un número, dicho valor corresponde a la resistencia a compresión del cemento a 28 días en MPa.
CPF:	Cemento pórtland con filler calcáreo. Cuando se adiciona un número, dicho valor corresponde a la resistencia a compresión del cemento a 28 días en MPa.
CSC:	Coefficiente de succión capilar
E <sub>c</sub> :	Módulo de elasticidad secante
EN :	Norma europea
H :	Cociente entre la relación a/c y las proporciones de materiales secos del hormigón
ICPA :	Instituto del Cemento Pórtland Argentino
INTI :	Instituto Nacional de Tecnología Industrial
IRAM :	Instituto Argentino de Normalización
ISO :	International Organization for Standarization
LEMIT-CIC :	Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica. Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires
MF:	Módulo de finura
UNE :	Norma española
USP :	Universidad de São Paulo
UV:	Ultravioleta

## Letras minúsculas usadas como abreviaturas:

a :	Relación agregado fino seco/cemento en peso
af :	Agregado fino
ag :	Agregado grueso
a/c :	Relación agua/cemento en peso
f' <sub>c</sub> :	Resistencia especificada a compresión
f' <sub>cm</sub> :	Resistencia media a compresión

- g : Relación agregado grueso seco/cemento en masa
- k : Constante que depende de la naturaleza de los materiales, de la edad y del tipo de curado
- m : Relación agregados secos/cemento en peso
- p : Relación agregado grueso seco/cemento en peso

**Letras griegas usadas como abreviaturas:**

- $\alpha$  : Proporción de mortero seco

---

## **INTRODUCCION**

---

El hormigón es el material de construcción más empleado y son numerosos los estudios e investigaciones que se han ocupado de la resistencia mecánica, la trabajabilidad y más recientemente de aspectos relacionados con la durabilidad. Si bien en los últimos años ha aumentado la tendencia a utilizar las superficies de hormigón visto, desarrollándose tratamientos y técnicas especiales a los efectos de conseguir un mejor acabado superficial y un mejor efecto estético, son pocas las investigaciones experimentales en este sentido.

Si se cumplen determinadas condiciones en los materiales componentes y las técnicas adecuadas para obtener el hormigón coloreado, puede lograrse un valor agregado interesante a un costo razonable. Sin embargo, no hay estudios sistemáticos que evalúen la situación de estos hormigones especiales, incluyendo investigaciones sobre sus propiedades cromáticas y de permanencia de color en el tiempo, asociadas a aspectos vinculados a su durabilidad.

Existe evidencia de obras de hormigón coloreado que han mantenido la durabilidad de sus colores durante años, aunque también se registran experiencias en las que la exposición a determinados ambientes no ha sido muy buena. Ejemplos de la durabilidad de los colores son expuestos por PEREZ LUZARDO (1995), quien presenta el caso de una estructura de hormigón pigmentado, construida en 1985 en la que el estado de conservación es óptimo,

---

no existiendo decoloración ni alteración del tono original de la fachada; PARIS y CHUSID (1999) destacan estudios realizados en la Universidad de Maryland, en el que los investigadores informan que los colores mantuvieron razonablemente su permanencia, aún cuando el hormigón fue expuesto a condiciones naturales de intemperismo. ROJAS (2000) cita que la experiencia muestra que estructuras de hormigón pigmentado, expuestas por más de 50 años, han perdido poco su coloración inicial, manteniendo la belleza del proyecto. Sin embargo, la apariencia del hormigón coloreado puede cambiar, según KRESSE (1990) por fenómenos como la erosión, el desarrollo de musgos y algas, dependiendo de las condiciones de exposición de la estructura. También KRESSE (1991) y SZADKWOSKI (1987, 1990) destacan la influencia de la eflorescencia en la apariencia del color cuando el hormigón coloreado es expuesto a la intemperie.

Pero siempre ha existido la inquietud de quitarle al hormigón ese carácter lúgubre y grisáceo, lo que ha dado lugar en todo el mundo a obras en las que el hormigón coloreado se ha utilizado con destinos muy dispares tales como hoteles, bancos, subterráneos, museos, hospitales y hasta catedrales como la de Christchurch, en Nueva Zelandia; la Pirámide del Louvre, en París, los centros de diversión como Disney World, en Orlando, Florida, o estudios de cine como Universal Studios en Hollywood, California, Estados Unidos, son ejemplos de obras de magnitud que han despertado admiración por su belleza.

En Argentina, la utilización del hormigón coloreado es incipiente y es constante su incremento en los últimos años. Las aplicaciones también son diversas y en todo el país se expone al hormigón a distintas exigencias climáticas; algunas obras de envergadura que se pueden mencionar son hoteles y restaurantes ubicados en provincias tales como Córdoba, Mendoza, Tucumán y Tierra del Fuego; el Parque de la Costa, en Tigre, provincia de Buenos Aires; el anfiteatro y hall U.C.A en Puerto Madero, Capital Federal; la plaza San Martín en Mercedes, provincia de San Luis; estaciones de servicio, shoppings, centros comerciales, paseos peatonales en ciudades turísticas y parroquias, completan un amplio abanico de aplicaciones en los más diversos puntos geográficos del país.

Un caso especial es el de los hormigones claros donde se utiliza cemento blanco (BETOCIB, Francia, ICPC, 2000), inclusive para lograr hormigones de alto desempeño (CASSAR, L. y otros, 2001), logrando un material que intensifica sus cualidades estéticas y además adquiere una validez destacada en términos de cualidades estructurales debido a su alta resistencia mecánica.

Otra aplicación muy difundida de hormigones coloridos es la utilización de adoquines para pavimentos intertrabados o paver, como son conocidos y usados en Europa desde hace décadas. En Alemania, donde fue creado en los años 40, se aplican anualmente cerca de 40 millones de metros cuadrados en diversas áreas, como vías de tráfico pesado, patios industriales, plazas y calles residenciales (Cemento Hoje, 2000).

En América del Sur, los pavimentos intertrabados ya se utilizan desde hace años y entre sus aplicaciones pueden mencionarse las obras realizadas en Brasil, en la Plaza en Vera Cruz, São Paulo y en otras ciudades como Blumenau, Santa Catarina, en los Balnearios de Piçarras y Camboriú, en la Rua Conselheiro Mafra, Florianópolis. En el Centro Universitario Positivo, Curitiba, se construyeron 26.000 metros cuadrados de estacionamiento y calles (Cemento Hoje, 2000). En el nordeste, en Recife se utilizaron adoquines coloreados en el proyecto “Reviver Recife Centro”, con 2.300 m<sup>2</sup> en la primera etapa del año 2002 y con aproximadamente 18.000 m<sup>2</sup> para el total de la obra (Prisma, 2003).

## **Importancia/Justificación**

La carencia de antecedentes, la necesidad de dar respuestas adecuadas a la problemática de las interacciones que se pueden producir entre los pigmentos y las propiedades del hormigón en estado fresco y endurecido y fundamentalmente la necesidad de avanzar sobre el conocimiento de la durabilidad de estos hormigones especiales han motivado este trabajo. La cantidad de trabajos publicados sobre las propiedades físicas de hormigón pigmentado es muy limitada y prácticamente no hay datos informados sobre la durabilidad y desempeño de estos hormigones, así también no hay datos disponibles que soporten la idea

actual de que los pigmentos son inertes en el proceso de hidratación del cemento. Esto sumado al hecho de que la mayoría de las publicaciones han sido llevadas a cabo por los productores de pigmento, conduce a la conclusión de que es necesario desarrollar un estudio más profundo específicamente con vistas al efecto a largo plazo de los pigmentos sobre las propiedades del hormigón.

La importancia y justificación para la elaboración de esta tesis está en que con el conocimiento científico y tecnológico adquirido será posible producir un hormigón coloreado durable y adecuado a las necesidades de obras y aplicaciones realizadas con este tipo de hormigón especial.

Es interesante notar que en la investigación bibliográfica se han localizado algunos estudios experimentales que tienen como objetivo analizar algún aspecto de la durabilidad del hormigón coloreado; sin embargo la mayoría procede de firmas comerciales que abordan el estudio desde una óptica limitada. No fueron localizados trabajos que evaluaran la durabilidad de estos hormigones en forma sistemática y abarcativa relacionando propiedades mecánicas tales como la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad con algunas de las propiedades que actúan directamente en la durabilidad de una estructura, tales como la carbonatación, la permeabilidad al agua, la succión capilar y la abrasión, incluyendo la investigación de los parámetros cromáticos y su evolución en el tiempo.

Otro aspecto a considerar es que si bien existen ventajas para la utilización de los hormigones coloreados, también existen inconvenientes y estos son conceptos poco desarrollados en la bibliografía existente. Los temas más discutidos son las dudas sobre la disminución de la resistencia mecánica con el uso de los pigmentos y la estabilidad y durabilidad del color frente a la acción de la intemperie, así como la dificultad de proceder a reparaciones que no se vean muy distintas del original.

La superficie puede decolorarse por la acción de diversos factores (Concrete Inspection Procedures, Portland Cement Association, PCA, 1975) dando como resultado un marcado cambio de color en grandes áreas, la

decoloración en forma de manchas o jaspeado y la decoloración por parches de eflorescencia. Según la PCA, las causas pueden ser el uso de aditivos conteniendo cloruro de calcio, los álcalis del cemento, un curado inapropiado y variaciones en la relación agua/cemento, pero no se presentan resultados experimentales.

KRASOWSKY (1997), expone una serie de problemas que pueden presentarse sobre la superficie de hormigones coloreados, como manchas por escurrimiento, oxidación y eflorescencias e inclusive hace referencia a la fisuración y a la carbonatación del hormigón, sin entrar en detalles.

En síntesis y considerando los conceptos anteriores, esta tesis, que es un estudio teórico-experimental, permitirá avanzar en el conocimiento científico de las propiedades en estado fresco y endurecido y de la durabilidad de hormigones coloreados. Se propone profundizar los conocimientos del estado del arte actual sobre los efectos de los pigmentos en el hormigón, desarrollar metodologías para su dosificación y métodos de ensayo para evaluar estos hormigones, proponiendo alternativas que permitan reducir los costos de mantenimiento de estructuras, favoreciendo su difusión en el medio científico y técnico, ya que bajo este aspecto, se han desarrollado pocos trabajos científicos.

## **Investigadores y Centros de Investigación que desarrollan el tema**

El avance en el conocimiento de los hormigones coloreados es en general una consecuencia del abordaje empírico previo al teórico o científico; esta es una situación frecuente en la tecnología del hormigón, donde primero se utilizan los materiales y luego siguen estudios o investigaciones científicas para justificar, explicar y avanzar en el conocimiento de los logros obtenidos. Existen en el ámbito internacional y nacional investigadores y centros de investigación que han desarrollado actividades en el tema de hormigones con pigmentos; a continuación se indican los principales referentes localizados durante el transcurso de esta tesis.

Entre los investigadores que han desarrollado el tema en España, se puede mencionar a CARVALHO (2000) quien desarrolló su tesis doctoral sobre la variación del color y textura superficial de hormigones vistos con adición de pigmentos sometidos a distintos estados de exposición ambiental en la Universidad de Politécnica de Madrid. Carvalho ha estudiado la influencia de la relación agua/cemento, el empleo de cemento blanco y gris y pigmentos inorgánicos en el hormigón coloreado, sometiéndolo a distintos tratamientos de envejecimiento como ciclos de humedad-sequedad, exposición a la intemperie, cámara estándar y cámara climática.

También en España, PEREZ LUZARDO (1995) llevó adelante una investigación a lo largo de más de cinco años que le permitió defender su tesis doctoral y presentarse a la oposición como Profesor titular de Las Palmas de Gran Canaria.

En Inglaterra en el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Leeds, LYNSDALE y CABRERA (1989), presentan una revisión de la información disponible sobre tipos de pigmentos y sus propiedades, métodos de medición del color y algunos aspectos sobre las propiedades de los hormigones coloreados y su durabilidad, haciendo referencia a que hay una verdadera necesidad de avanzar sobre este tema.

En Méjico, KRASOWSKY (1997), presenta una Tesina para el Diplomado de Obras de Concreto impartido por la Facultad de Arquitectura de la UNAM y el IMCYC referida a Concreto Arquitectónico: textura, color, problemas y soluciones.

En Brasil, en la Universidad de San Pablo, HELENE y HARTMANN (2003a, 2003b) han trabajado sobre hormigones coloreados de alto desempeño logrando el record mundial de resistencia para el hormigón coloreado; este hormigón con pigmento rojo se aplicó en la torre e-TOWER, en San Pablo en el año 2002. El edificio tiene una altura de 162 m, con 42 niveles y 52.000 m<sup>2</sup> cubiertos. Por su imagen y la tecnología aplicada, el edificio e-Tower de São Paulo, se convirtió en una referencia para la construcción civil, ya que tiene algunas de sus columnas

---

pigmentadas con el récord mundial de resistencia a compresión (125 MPa) en probetas cilíndricas.

En la Universidad Federal de Mato Grosso do Sul, HENDGES y otros (2004) han determinado la resistencia a compresión, costos y coloración de hormigones producidos con pigmentos y cementos Pórtland gris y blanco utilizando aditivo plastificante.

En la Universidad Federal de Rio Grande do Sul, PASSUELO y otros (2004) realizaron el análisis cromático de hormigones producidos con cemento blanco estructural y distintos tipos de agregados.

En Chile, en la Universidad de Santiago de Chile, BARRERA y otros (2002) realizaron experiencias en hormigones que denominan “decorativos” y que incluye a los hormigones pigmentados, utilizando cementos Pórtland puzolánico y siderúrgico y aditivo plastificante. El objetivo principal ha sido estudiar la técnica del hormigón coloreado, del hormigón estampado y sus posibles aplicaciones; específicamente para el hormigón coloreado se buscó establecer que diferencias introduce la adición de pigmentos de diversos colores y en distintos porcentajes de adición en el asentamiento, el contenido de aire y la resistencia a compresión.

También cabe destacar la amplitud de experiencias llevadas adelante en los Centros de Investigación en todo el mundo de la proveedora de pigmentos BAYER, lo que ha dado lugar a publicaciones de autores como BÜCHNER (1991), KRESSE (1990), TEBBE (1992) y TEICHMANN (1991), entre otros. En BAYER Brasil, GALANTE (2000), ROJAS (2000) (2001) y MARQUES FILHO (2001) han realizado numerosas investigaciones sobre las técnicas de aplicación de los pigmentos y la metodología a emplear en la colorimetría.

En Argentina no se encuentran registros de estudios colorimétricos de hormigones coloreados, aunque si se han desarrollado estudios e investigaciones sobre el color y su medición centrados en Buenos Aires, en el Grupo Argentino del Color (GAC) desde el año 1980. Sus fines son estimular estudios e investigaciones sobre el color y hacer conocer sus resultados, divulgar

información en todas las áreas relacionadas con el color, mantener un centro de documentación especializada, integrar los distintos campos desde los cuales puede abordarse el estudio del color: ciencia, tecnología, arte, diseño, industria, empresa, etc. El GAC forma parte de la Asociación Internacional del Color y es la entidad que representa a la Argentina ante dicha asociación.

BENITEZ y BÁLZAMO (2004), del Instituto Nacional de Tecnología Industrial, INTI, han publicado recientemente las experiencias realizadas en hormigones arquitectónicos. Estos investigadores han trabajado especialmente con hormigones con cemento blanco y estudiado algunas aplicaciones en hormigones coloreados.

También en Córdoba, Argentina, hay una experiencia realizada en el año 2000, en la Universidad Nacional de Córdoba en hormigones coloreados de alto desempeño con cemento blanco, en la que se emplearon agregados calcáreos y marmolina como adición, realizando determinaciones de asentamiento y resistencia a compresión.

## Objetivos

### Objetivo general

El objetivo del presente trabajo es evaluar las propiedades en estado fresco y endurecido de hormigones coloreados y fenómenos vinculados con su durabilidad, incluyendo el envejecimiento del color por acción de la intemperie.

### Objetivos particulares

- Conocer y evaluar la influencia de los pigmentos en las propiedades en estado fresco y endurecido de los hormigones coloreados.
- Evaluar algunas propiedades referidas a la durabilidad de estos hormigones.
- Evaluar el envejecimiento acelerado del color por medición de las coordenadas cromáticas.
- Vincular los resultados de ensayos de envejecimiento acelerados del color con los ensayos de larga duración.

## Originalidad del Tema

La escasa difusión de experiencias científicas y sistemáticas sobre la durabilidad de hormigones producidos con pigmentos crea dudas o desalienta la utilización de este tipo de hormigones especiales que pueden ofrecer una alternativa de belleza para las estructuras de hormigón.

Por lo tanto la originalidad de esta tesis está en conocer y analizar la influencia que algunos pigmentos (óxidos de hierro) ejercen sobre ciertos aspectos de la durabilidad de los hormigones coloreados, ya que si bien se dispone de información comercial, este es un tema que todavía no ha sido investigado adecuadamente en el ámbito nacional e internacional.

Se destaca la parte experimental de esta tesis que ha sido realizada con criterio científico y técnico ya que es un tema inédito y de suma importancia que tendrá por finalidad aclarar conceptos y evitar la repetición de errores que se cometen por falta de información experimental confiable y libre del sesgo impuesto por la bibliografía comercial disponible.

## **Contenido de esta Tesis**

Esta tesis contiene una introducción, cinco capítulos y tres anexos.

En la introducción se hace referencia a la importancia y justificación del estudio del tema, los principales investigadores y centros de Investigación, se expresan el objetivo principal y los objetivos particulares y por último se presenta la originalidad de esta investigación.

En el Capítulo 1 se presentan los aspectos conceptuales de las características, la composición, los materiales y métodos para obtener el hormigón coloreado; se discute la influencia de los pigmentos en el comportamiento del hormigón coloreado y se presentan los sistemas de medición del color.

En el Capítulo 2 se analizan los aspectos referidos a la durabilidad del hormigón coloreado destacando las causas de deterioro, la influencia de los pigmentos, se abordan los mecanismos de transporte, los fenómenos de degradación de la superficie y se presentan conceptos vinculados al envejecimiento acelerado del color.

El Capítulo 3 corresponde al diseño del experimento, se presentan las características físico-química-mecánicas de los materiales utilizados y los pasos seguidos con el método de dosificación aplicado. También se detallan los métodos elegidos para el trabajo experimental y los resultados obtenidos para el hormigón en estado fresco, asentamiento, exudación y tiempo de fraguado. En

estado endurecido se presentan resultados de resistencia a compresión y módulo de elasticidad longitudinal a distintas edades y se consideran los aspectos de la durabilidad mediante ensayos de succión capilar, permeabilidad al agua, absorción e índice de vacíos, carbonatación y desgaste. Una mención especial requiere el método de medición de las coordenadas cromáticas y mediciones de color y la exposición del hormigón coloreado a ciclos de envejecimiento acelerado.

En el Capítulo 4 se presenta la discusión de los resultados obtenidos analizando las líneas de tendencia de las propiedades estudiadas en el hormigón en estado fresco y endurecido. En el caso de la resistencia a compresión y del módulo de elasticidad se analizan los diagramas de dosificación y se indica la variación de la propiedad en estudio por influencia de los pigmentos utilizados, comparando los resultados obtenidos con la bibliografía consultada, así también como las propiedades seleccionadas para el estudio de la durabilidad. Un aporte especial se realiza en cuanto al análisis de las mediciones de color y la exposición del hormigón coloreado a ciclos de envejecimiento acelerado.

En el Capítulo 5 se encuentran las conclusiones del trabajo así como las propuestas para definir las líneas de investigaciones futuras.

En las referencias bibliográficas se indican las principales publicaciones consultadas para elaborar esta tesis. Por último, se encuentra la transferencia al medio científico; en los Anexos I y II se presentan dos transferencias de conocimientos realizadas por la autora durante el desarrollo de esta tesis:

- Frisos de hormigón coloreado. Instituto del Diseño. Facultad de Arquitectura. Universidad Católica de Córdoba. Años 2002-2003.
- La medición del color en morteros y hormigones coloreados y su relación con la eflorescencia. Empresa Premoldeados de Hormigón Arena Hnos.

En el Anexo III se presentan figuras complementarias a las mostradas en el Capítulo 4.

## **Capítulo 1**

---

### **HORMIGON COLOREADO**

---

#### **1.1 Introducción**

El hormigón posee características que lo hacen el material más usado en la industria de la construcción, dada su versatilidad, resistencia y durabilidad. Para ANDRADE (1997) es prácticamente inconcebible dissociar el desarrollo tecnológico de la humanidad del desarrollo y del uso del hormigón.

Además de la opción estética que ofrece, su empleo en la construcción ha aumentado permanentemente, pues sus características estructurales y económicas son inigualables cuando se compara con otros materiales de construcción (ESQUEDA HUIDOBRO, 1996; CASTRO BORGES, 1998).

Según el Proyecto de Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón, CIRSOC 201 (2002), el hormigón “es una mezcla homogénea compuesta por una pasta de cemento y agua, con agregados gruesos y finos, que en estado fresco tiene cohesión y trabajabilidad y que luego, por el fraguado y el endurecimiento de la pasta cementicia, adquiere resistencia. Además de estos componentes básicos, también puede contener aditivos químicos y/o adiciones minerales pulverulentas”,

---

haciendo mención específica a los pigmentos en el punto 3.6 del Reglamento, referido a adiciones minerales pulverulentas.

La correcta elección y dosificación de los materiales es uno de los factores más relevantes en las prestaciones finales del hormigón y en los casos de hormigón coloreado hay que tener la precaución de seleccionar convenientemente todos los materiales componentes, pues todos tienen su interferencia en el resultado final, asegurando que su provisión se produzca y mantenga de modo uniforme.

## **1.2 Características del Hormigón Coloreado**

### **1.2.1 Definición y métodos para obtener hormigón coloreado**

El hormigón coloreado es un tipo de hormigón especial que contiene una adición que le confiere la característica de tener un color distinto al “ceniza” habitual, típico color de las rocas de Portland en Inglaterra.

El hormigón es un material compuesto que consiste esencialmente en un medio continuo aglomerante, dentro del cual están contenidas partículas o fragmentos de agregados, o sea, un material multi-fásico con por lo menos tres fases: la pasta, los áridos y la zona de transición entre ellos. Manteniendo esas fases, una alternativa para colorear el hormigón es la adición de pigmentos, que son partículas muy finas, que dan color a la pasta. Esto le brinda nuevas posibilidades estéticas, de integración al medio y confort. Se debe considerar que lo que le proporciona gran aplicación a los hormigones coloreados, es su enorme posibilidad de obtener diferentes texturas, tonos y colores, aumentando su aceptación como elemento arquitectónico (CARVALHO y CALAVERA, 2002).

La amplia combinación de estos factores y los resultados obtenidos (ABDO, 1996) son el principal justificativo para su utilización cuando el objetivo es lograr una estructura que provea una terminación superficial que se destaque, se mantenga en el tiempo y disminuya el costo de mantenimiento de la edificación durante su vida útil.

---

Para colorear el hormigón existen varias alternativas mencionadas por autores como LINSDALE Y CABRERA (1989); el hormigón coloreado se puede producir por:

- pintado de la superficie luego que el hormigón ha endurecido
- incorporación de agentes colorantes, por ejemplo pigmentos, dentro de la mezcla cuando el hormigón está en estado plástico. Este último procedimiento permite colorear una capa superficial o integralmente la masa de hormigón.

BENITEZ Y BÁLZAMO (2004) indican que el hormigón coloreado puede lograrse aplicando alguno de los siguientes métodos:

- Incorporando pigmentos durante el mezclado, para tonos terrosos y menos intensos
- Espolvoreando pigmento sobre la superficie del hormigón fresco para lograr superficies antideslizantes con tonos intensos, para hormigón estampado o cuando se desea alta resistencia a la abrasión
- Utilizando pinturas de una variada gama de colores, como recursos decorativos
- Aplicando recubrimientos específicos cuando se desea mejorar la resistencia a agentes agresivos tales como ácidos.

La British Standard Institution (BSI), en su guía para especificar hormigón coloreado (Coloured Concrete, 2000), es más amplia, distinguiendo los siguientes procedimientos:

- Coloración integral: el color se incorpora durante el mezclado del hormigón
- Espolvoreado en seco: el color se aplica luego de la colocación del hormigón, y es común incorporar endurecedores de superficie, que incrementan la resistencia a la abrasión
- Penetración de tintas químicas reactivas
- Pinturas y recubrimientos (no cubiertas en esta publicación)

Según esta Guía los métodos de producción otorgan diferentes efectos en la obtención del color, que se presentan en la Tabla 1.1.

**Tabla 1. 1 Métodos y aplicaciones del hormigón coloreado (BS EN 206-1/BS 8500, 2000)**

Método	Aplicaciones
Coloración integral	Para tonos terrosos y colores poco intensos Cuando la calidad del hormigón es adecuada para abrasión
Espolvoreado en seco	Cuando se requieren colores intensos Para terminaciones texturadas y resistencia al deslizamiento Para hormigón estampado o impreso Cuando se requiere resistencia a la abrasión
Tintas químicas reactivas	Para crear una variedad de pátinas Cuando los requerimientos son únicamente decorativos Como alternativa a la pintura
Pinturas	Para obtener un amplio rango de colores Cuando los requerimientos son únicamente decorativos
Recubrimientos	Para obtener un limitado rango de colores Para mejorar alguna propiedad específica, por ejemplo, resistencia a los ácidos

Con referencia a los materiales para colorear hormigón, RAMACHANDRAN (1995) presenta a los agentes colorantes que se utilizan para colorear integralmente al hormigón, clasificados en tres grupos de productos:

- Pigmentos naturales y sintéticos
- Aditivos colorantes multicomponentes
- Morteros colorantes

Este autor destaca que los pigmentos y los aditivos colorantes han encontrado mayor aceptación en el mercado por razones de economía y calidad.

Según PEREZ LUZARDO (1995) para lograr la coloración del hormigón se pueden utilizar áridos, cuya coloración dota de color a la masa o con el empleo de cementos coloreados. Debido a la escasa disponibilidad de estos últimos y a la inexistencia de áridos de color en muchas regiones, sugiere que la alternativa es utilizar pigmentos como colorantes del hormigón.

CARVALHO (2000) coincide indicando que es posible añadir color a las estructuras pintando la superficie endurecida, incorporando agentes colorantes a la mezcla mientras éstas sean plásticas o empleando áridos que les confieran su propio color. Considera que el uso de pigmentos es lo que produce un efecto más

---

eficaz, ya que el color se integra en la mezcla y teóricamente, no requiere mantenimiento para que el mismo perdure.

ESQUEDA HUIDOBRO (1996), también realiza un aporte al respecto. Menciona la utilización de:

- cementos grises, blancos y coloreados
- aditivos colorantes y pigmentos
- colorantes y tintes
- tintas químicas
- selladores colorantes
- endurecedores de color para aplicación en seco

Las consideraciones vertidas en la bibliografía referidas a los métodos y materiales para colorear el hormigón proporcionan información teórica adecuada que es necesario acompañar fundamentalmente con información experimental.

### **1.2.2 Colores, texturas y acabados**

La variedad de colores y tonos que se pueden obtener con los métodos y materiales citados en la sección anterior es muy amplia, por lo que la preparación adecuada de una muestra resulta ser la clave para determinar la apariencia final del proyecto.

La elección preliminar del color se puede hacer utilizando tarjetas de color similares a las que se utilizan para las pinturas. Una vez definido esto habrá que realizar pastones de prueba seleccionando los materiales adecuados. Para aprobar el color, la muestra obtenida deberá realizarse tomando las precauciones necesarias que representen los métodos que se utilizarán en la obra.

La versatilidad del hormigón para “copiar” texturas es prácticamente ilimitada. Combinando las texturas con colores y distintos tonos es posible obtener resultados muy variables, dando apariencias distintas. ESQUEDA HUIDOBRO (1996) hace referencia a que tanto los diseñadores como los usuarios se encuentran frente a una multitud de elecciones en cuanto al material y a la textura

---

de las superficies. Existen diferentes maneras en que puede agregarse textura al hormigón con resultados espectaculares y a bajo costo.

Una alternativa es trabajar en forma volumétrica para lograr las texturas, en vez de terminar la superficie en forma plana; se la moldea mediante la impresión de motivos decorativos en el mismo molde, proporcionando relieve a la superficie. Para ello es posible utilizar distintos materiales, plásticos, elastómeros, uretano, fibra de vidrio.

PEREZ ARNAL (1995) define el acabado de la superficie como el grado de pulimento o rugosidad que presenta el hormigón. Esta característica se define directamente por la técnica empleada para dosificar la mezcla, la colocación y terminación del hormigón. Considerando que una superficie más rugosa dispersa más la luz y se ve a simple vista como más clara.

El hormigón ha sido considerado tradicionalmente como un material de construcción tosco, pero dotado de propiedades constructivas excelentes. Si a eso se le suma que también se pueden lograr acabados limpios y uniformes al construir con hormigón visto, se convierte en un material excepcional (PEREZ ARNAL, 1995); sin embargo, para ello hay que tener en cuenta y controlar muchos factores.

Una superficie lisa puede tener distintos aspectos; a veces, una superficie pulida puede acabarse con asperón, que es un tipo de arenisca, perdiendo de esta forma el brillo hasta lograr superficies como espejo que requieren áridos muy finos, adición de microsílíce y encofrados extremadamente pulidos y limpios.

La superficie también puede simular un aglomerado de piedra natural mediante un baño de ácido que permitirá aflorar los granos finos. El hormigón también puede ser lavado al agua después de su fraguado (aplicando un retardador como aditivo) y proveer así el acabado de piedra.

De esta manera, las combinaciones de colores, texturas, relieves, formas y otros factores, son elementos claves en el momento de construir con hormigones coloreados, que abren múltiples caminos en el proyecto de una estructura.

ESQUEDA HUIDOBRO (1996) en su obra “Concreto Arquitectónico” dedica un capítulo completo al tema de forma y textura, del cual se presenta un resumen muy sintético en la Tabla 1.2. En ella se indican los diversos efectos de texturas de acabados que se pueden lograr de acuerdo a los métodos de acabado empleados.

**Tabla 1. 2 Tipos de acabados según el método empleado. ESQUEDA HUIDOBRO (1996)**

Acabado	Método
Acabados directos del hormigón dentro del molde	Liso
	Cuerdas insertadas
	Patrones y forros
	Recubrimientos integrales
Acabados directos del hormigón fresco en superficies horizontales, libres de encofrado	Con llana o alisado
	Escobillado
	Estampado
	Diseños incrustados
Tratamientos de hormigón endurecido fuera del molde por medios mecánicos	Acabado mecánico
	Estría fracturada
Sopleteado con abrasivos	Sopleteado con chorro de aire-arena
	Desescamado neumático
	Esmerilado pulido y brillado
Acabados con agregados expuestos	Cepillado y lavado
	Lavado con agua
	Retardadores
Superficies horizontales de agregado expuesto retardadas químicamente y lavadas con agua	Grabado con ácido
	Sopleteado con agua-arena
Acabados combinados	Esmerilado y grabado con ácido
	Pulido con chorro de arena y grabado con ácido

El mismo autor, ESQUEDA HUIDOBRO (1996), presenta una clasificación, que se reproduce sintéticamente como Tabla 1.3, en la que se propone una

clasificación sistemática de los diferentes aspectos de la superficie de hormigón. Allí se abarcan temas como la variación de la tonalidad de la superficie del hormigón, ya sea gris o de color y cuales son los factores que intervienen. También considera la estructura de la superficie y las modificaciones que se pueden producir por acción mecánica, química o en función de la segregación.

**Tabla 1.3 Clasificación sistemática de los diferentes aspectos de la superficie de hormigón. ESQUEDA HUIDOBRO (1996)**

Aspecto general de la superficie de hormigón	Tonalidad propia de la superficie	Tonalidad gris	Tonalidad de la pasta de cemento endurecida	Color de los materiales	Tonalidad del cemento	
					Tonalidad del agregado fino	
				Condiciones de la mezcla	Dosificación de cemento	Relación agua/cemento
					Segregación local	
			Aclaración por secreción de cal	Por causa de la porosidad fina	Dosificación de cemento	
		Relación agua/cemento por causa de condiciones climáticas		Relación agua/cemento		
		Coloración	Modificación de materiales	Grado de humedad		
				Hidratación		
				Ataque por agua de lluvia		
			Cuerpos extraños	Manchas	Oxidación	
	De encofrado					
	Estructura de la superficie	Modificación por acción mecánica	Influencia de la vibración	Muy débil	Nidos, zonas delgadas	
					Burbujas	
			Influencia de las diferentes fuerzas	Muy fuerte	Ver segregación	
					Desprendimiento de la película de cemento	
			Tratamiento	Fisuración	Fisuras de contracción o de asentamiento	
		Deterioro		Destrozos por hielo o por sal		
		Modificación por acción química	Porosidad fina	Desgaste		
				Película de cemento lavada o removida por chorro de arena		
			Descomposición	Capa superior martelinada o tratada		
Influencia de la secreción de cal						
Influencia del grado de humedad						
Modificación en función de la segregación	Segregación de pasta cemento	Perturbación del fraguado, superficie que se disgrega				
		Corrosión por ácidos				
	Segregación de los agregados	Degradación lenta de la superficie hasta convertirse en rugosa				
		Marcas dirigidas hacia arriba				

---

SINGLETREE (2004), THOME y RIZZO (2004) y NASVIK (2004) coinciden en que además de adicionar color al hormigón, la tecnología de los tratamientos de estampado, texturizado, pulido o endurecedores contribuyen a lograr superficies con un alto valor agregado, buena resistencia mecánica y durabilidad.

La autora de esta tesis realizó un trabajo de exploración de los colores, las texturas y acabados superficiales posibles de obtener en el hormigón coloreado con pigmentos, en la Facultad de Arquitectura de la Universidad Católica de Córdoba, Argentina; este trabajo se presenta sintéticamente en la sección de transferencias realizadas durante el desarrollo de esta tesis, en el Capítulo de Conclusiones.

### **1.2.3 Productos y elementos de hormigón coloreado**

La variedad de productos que se pueden lograr con los hormigones coloreados es muy amplia. Esto es debido a las ventajas que el color, la textura y las formas le suman al excelente desempeño del hormigón tradicional. A continuación se mencionan brevemente algunos ejemplos de productos elaborados con hormigón coloreado en los que la autora de esta tesis ha tenido algún grado de compromiso y participación.

#### **Hormigón de alto desempeño coloreado integralmente. Edificio “e-Tower” São Paulo, Brasil.**

En este edificio de 42 pisos, que se presenta en su etapa de construcción en la Fig. 1.1, se utilizó hormigón de alto desempeño coloreado empleado en columnas de planta baja. La dosificación del hormigón incluyó adiciones minerales: sílica activa y metacaolín y aditivo superplastificante de tercera generación y estabilizador de hidratación. Los pigmentos fueron óxidos de hierro rojo y amarillo. Se alcanzó una resistencia a compresión media de 125 MPa a 28 días y un valor promedio del módulo de elasticidad de 45 GPa (HELENE y HARTMANN, 2003a, 2003b).



**Figura 1.1 Vista del edificio "e-Tower" y columnas de hormigón coloreado**

En este caso, el hormigón de alto desempeño coloreado aplicado en el e-Tower tuvo un costo de 2,5 veces superior al del hormigón usual gris de 20 MPa. Sin embargo, prevalece la relación costo-beneficio. Hubo economía en su volumen, en el área ocupada, en la mano de obra y además permitió generar espacios adicionales de estacionamiento.

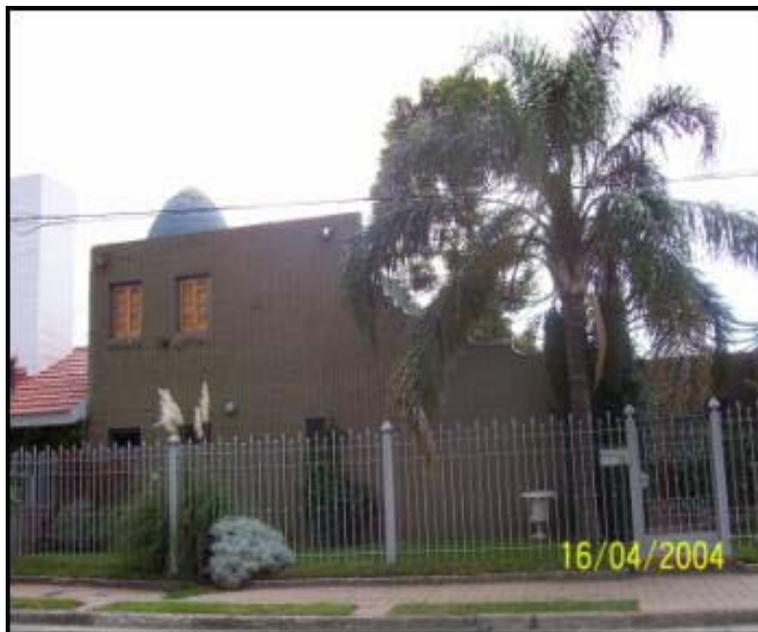
### **Bloques y adoquines de hormigón coloreado**

El bloque de hormigón ha demostrado en las últimas décadas su gran economía y versatilidad para la construcción de complejos habitacionales, edificios en altura, colegios, obras públicas y viviendas individuales.

El diseño de estructuras con bloques de hormigón permite el desarrollo de un sistema constructivo modular, racionalizado y abierto, con el que se logra un alto rendimiento económico.

Su bajo costo de producción con sistemas de alta tecnología permite obtener valores muy inferiores a la mayoría de los sistemas tradicionales siendo comparativamente menor su inversión en infraestructura respecto de los sistemas

industrializados. Si a eso se le suma la posibilidad de colorearlos y proporcionarles texturas, las ventajas se incrementan, aún en viviendas unifamiliares, como la que se presenta en la Fig. 1.2.



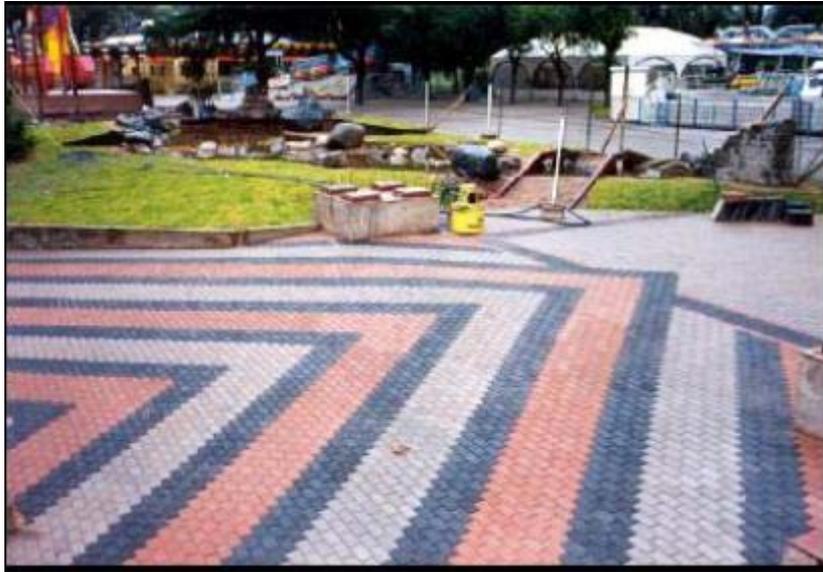
**Figura 1.2 Vista exterior de una construcción ejecutada con bloques de hormigón coloreado. (Premoldeados Arena Hnos., 2004)**

Algunas características de estos hormigones coloreados son:

- ✓ Las relaciones agua/cemento están en el orden de 0,6 - 0,7.
- ✓ La consistencia es muy seca, como tierra húmeda.
- ✓ La textura superficial de los bloques de hormigón es rugosa.
- ✓ Visualmente se observan diferentes texturas superficiales de terminación.
- ✓ Se comercializan en diversas formas, texturas y colores.

Los adoquines, que son fabricados con hormigones grises y coloreados que tienen características similares a los hormigones para bloques, constituyen en la actualidad una buena alternativa para diversas aplicaciones como plantas industriales, estacionamientos, senderos y otros. La posibilidad de distintas formas, patrones de colocación y colores intensos, sumados a una buena terminación proporcionan una alternativa que permite satisfacer al usuario y

proporcionar soluciones técnicas y decorativas, según se presenta en las Fig. 1.3 y Fig. 1.4.



**Figura 1.3 Patrón de colocación de adoquines coloreados en el Parque Sarmiento, Córdoba, Argentina. (Premoldeados Arena Hnos. 2000)**



**Figura 1.4 Patrón de colocación de adoquines coloreados en vivienda unifamiliar, Córdoba, Argentina. (Premoldeados Arena Hnos. 2000)**

---

## **Tejas de hormigón coloreado**

La utilización de las tejas para la cubierta de techos se ha utilizado históricamente. Durante los últimos cuarenta años el desarrollo de los métodos de producción y las mejoras en los procesos han contribuido a que las tejas de hormigón proporcionen una alternativa interesante para la cubierta de techos. No hay duda que la posibilidad de colorearlas ha sido un importante factor de decisión. Una de las fábricas que produce tejas coloreadas se encuentra en la ciudad de Río Segundo, a pocos kilómetros de la ciudad de Córdoba.

La coloración de las tejas puede ser integral, o sea pigmentando toda la masa de hormigón o aplicando una pintura superficial que le da la terminación definitiva. Son de fácil colocación, resistentes, impermeables y transitables sin riesgos de rotura y se proveen en una amplia gama de colores.

La Norma IRAM 11632 establece los requisitos generales y la clasificación y métodos de ensayo, entre los que se pueden mencionar la resistencia a flexión, la absorción y la determinación de la permeabilidad al agua.

En la Fig. 1.5 se presenta un detalle de una cubierta de techo realizada con tejas de hormigón.



**Figura 1.5 Vista de cubierta de techo realizada con tejas de hormigón coloreado**

## 1.3 Materiales Componentes

Desde el punto de vista de los materiales, el hormigón coloreado requiere dominio y conocimiento profundo de los materiales que se van a utilizar. Los materiales que se utilizan para elaborar hormigones coloreados difieren de los utilizados para hormigones grises principalmente en las exigencias de uniformidad, incluidas las exigencias de calidad de los pigmentos y las precauciones que su utilización implica. La clave para hacer un hormigón coloreado está en saber cómo las características de cada material pueden influir en la coloración final del hormigón y en los efectos que se quiere lograr.

### 1.3.1 Cemento Pórtland

El cemento cumple un papel protagónico en la tecnología del hormigón. En los hormigones coloreados este protagonismo cobra vital importancia ya que la cromaticidad de la mezcla de hormigón depende de todos los materiales involucrados en el proceso y el cemento aporta, además de las propiedades necesarias para alcanzar un buen desempeño mecánico y durable, su color. Por lo que hay que distinguir la posibilidad de utilización de cemento coloreado, gris o blanco en el hormigón coloreado con pigmentos, como se trata más adelante.

El Reglamento CIRSOC 201 (1982) establece contenidos mínimos y máximos de cementos a emplear para la dosificación de hormigones, según el nivel de resistencia que se quiera lograr. En el Proyecto de Reglamento CIRSOC 201 (2002), se incorpora específicamente el concepto de vida útil y las condiciones ambientales para evaluar la durabilidad del hormigón, sin hacer referencia a contenidos máximos o mínimos de cemento. Se establecen los tipos de cemento, entre los que se incluye al cemento blanco y hace referencia a que para elaborar hormigones con resistencias a compresión mayores a 20 MPa se deben utilizar cementos de categoría CP-40 o CP-50.

Los cementos se encuentran normalizados en Argentina por la norma IRAM 50000 "Cemento para uso general. Composición, características,

---

evaluación de la conformidad y condiciones de recepción" y por la norma IRAM 50001 "Cementos con propiedades especiales", incluyendo al cemento blanco.

Para la elaboración de hormigones coloreados, la elección del tipo de cemento se debe realizar en forma análoga a la de los hormigones convencionales, considerando las resistencias mecánicas a alcanzar, las condiciones de exposición de la estructura y el grado de agresividad del ambiente, si corresponde. A estos requisitos se debe sumar una exigencia especial con respecto al color que se desea obtener, ya que en algunos países es posible obtener cementos blancos y coloreados.

El color gris del cemento Pórtland es debido generalmente a la presencia de hierro, por lo que la variación del tenor de hierro del clinker se traduce en variaciones de color del cemento; cuando el tenor de hierro disminuye es posible obtener cemento de tonos más claros, hasta la obtención del cemento blanco.

El cemento blanco se logra utilizando como materia prima arcilla y rocas carbonatadas sin hierro, molinos de bolas especiales y combustibles limpios, entre otras particularidades. La mayoría de los cementos coloreados se pueden obtener moliendo pigmentos de óxido de hierro en un 5 a 10 % en masa con clinker blanco, logrando cemento rojo, amarillo marrón o negro. También es posible producir cemento de color a partir de clinker que ya posea el color correspondiente; por ejemplo en Estados Unidos se produce un cemento de color amarillo que se fabrica a partir de un clinker que contiene un tenor de hierro superior al normal, aproximadamente 5 % de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

Según BAYER (2001), cuando un producto con granulometría menor que 0.5 mm es adicionado en la producción de un hormigón o mortero coloreado, éste producto tiene una gran importancia en la coloración final obtenida, por lo que el cemento juega un papel importante en la coloración del hormigón; en este sentido hay varios aspectos a considerar, ya que el color del cemento depende de las materias primas utilizadas y del proceso de fabricación. En los cementos grises, cuanto menor sea la partícula de cemento, más claro será el material final, siendo el cemento blanco un caso especial de finura y composición química. DOWSON

---

(1998) presenta un interesante estudio referido a la variación de los índices de color de cementos de distintos fabricantes, las diferencias en las coordenadas cromáticas adoptando uno de los cementos como control y la influencia en los tonos obtenidos al incorporar pigmentos.

Ya se trate de hormigones blancos, grises o coloreados, habrá una influencia directa del cemento utilizado. Cuando se trabaja con hormigones de color, es importante considerar el color del cemento para lograr el tono deseado en el producto final. Un cemento más oscuro será mas adecuado para colores como el negro o el marrón mientras que dará tonos más apagados si se emplea con pigmentos amarillos o colores claros.

Otro aspecto considerado en la bibliografía por varios autores como PASSUELO (2004), CALAVERA RUIZ (1999), CARVALHO (2000), BAYER (2001), es la importancia de mantener la provisión de la partida de cemento, referencia también exigida en el Proyecto de Reglamento Argentino CIRSOC 201 (2002). Es conocido que el color del cemento varía de un fabricante a otro e incluso entre lotes de un mismo fabricante, por lo que se recomienda usar cemento del mismo fabricante y, en la medida que sea posible, un lote para toda la obra.

En la Fig. 1. 6 se presenta, a modo de ejemplo, una fotografía en la que se aprecia la variación de tonos de dos cementos disponibles comercialmente en la ciudad de Córdoba y que son utilizados en obras de distinta envergadura; esta variación del tono influye en la coloración final del hormigón, aunque no se agreguen pigmentos, por lo que es un factor importante a la hora de tomar una decisión cuando se van a elaborar hormigones que tengan la estética como un requisito especial.



**Figura 1.6 Cementos Pórtland fillerizados disponibles en Córdoba. Se aprecia que la muestra de la izquierda presenta un tono más claro que ubicada a la derecha.**

### 1.3.2 Agregados

Con referencia a los agregados, el Reglamento CIRSOC 201 (1982) establece para los agregados de densidad normal las exigencias generales, considerando sus características, las sustancias perjudiciales y los requisitos de granulometría. En el Proyecto de Reglamento CIRSOC 201 (2002), se hace referencia a los agregados pétreos, de densidad relativa comprendida entre 2.000 kg/m<sup>3</sup> y 3.000 kg/m<sup>3</sup>, procedentes de la desintegración natural o de la trituración de rocas. Los agregados no deben contener sustancias que afecten la resistencia y la durabilidad del hormigón o que ataquen al acero.

Para lograr un hormigón coloreado con un buen aspecto superficial y obtener el color y tono deseado, los agregados deben cumplir con las exigencias requeridas para los hormigones convencionales, además de considerar algunos aspectos particulares vinculados con la naturaleza del agregado y su granulometría.

La roca original de la cual proviene el agregado es responsable por la composición química y mineralógica, las características petrográficas, la masa específica, la dureza, la resistencia, la estabilidad química y física, la estructura de

---

poros y el color. Otras características, como la forma y tamaño de las partículas, la textura superficial y la absorción están relacionadas también con los procesos y condiciones en las cuales fue procesado el material e influyen en la calidad del hormigón fresco o endurecido. (NEVILLE, 1998)

Cuando el color es un parámetro de calidad de los hormigones, la elección del tipo más adecuado de agregado es fundamental, al contrario de lo que sucede en los hormigones convencionales, donde el criterio de selección de los agregados no incluye la selección colorimétrica ni uniformidad de este material.

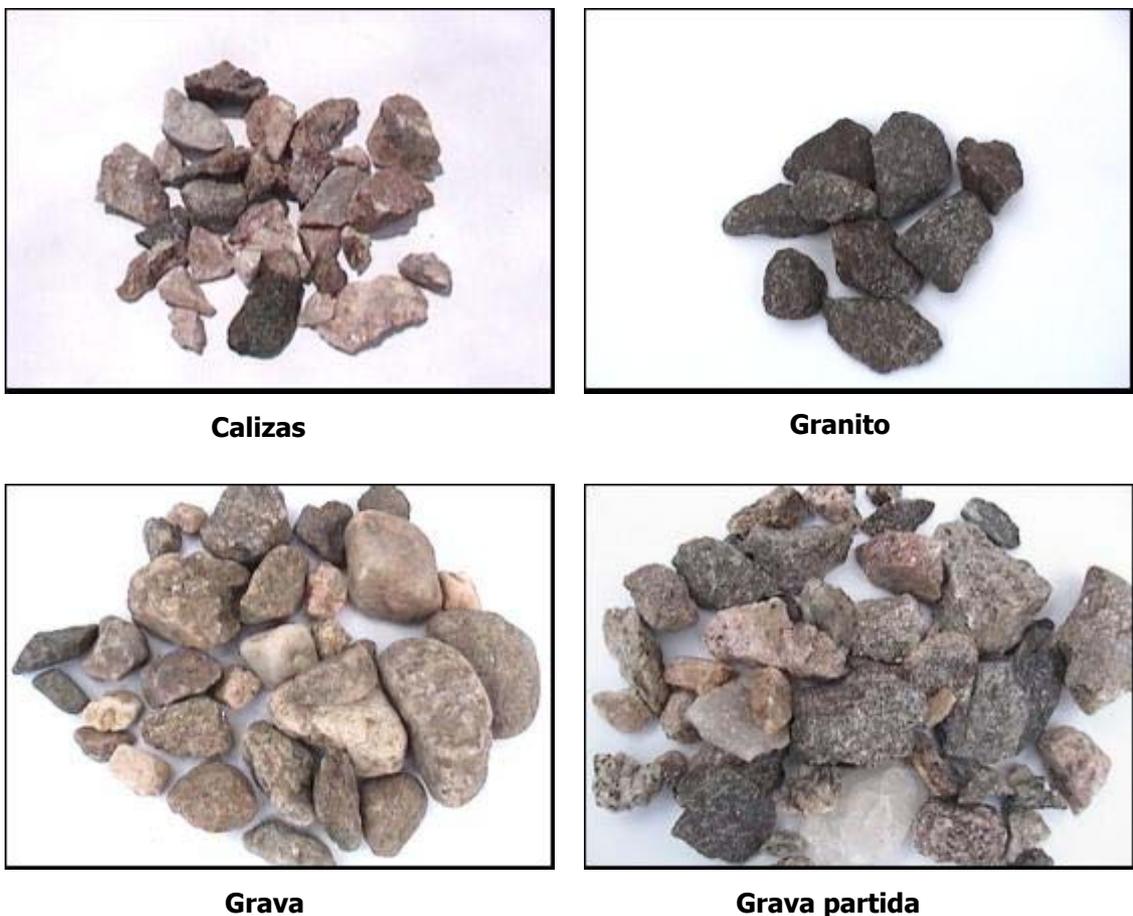
La elección del agregado grueso tiene mayor influencia en las superficies trabajadas, con agregados expuestos mediante técnicas como el martelinado, sopleteado con arena y lavado, mientras que la influencia del agregado fino es decisiva para la coloración de superficies sin ningún tratamiento posterior a la remoción del encofrado. BETOCIB (2000) recomienda prestar especial atención a la regularidad y limpieza del agregado fino ya que termina actuando como un colorante, pintando la mezcla de hormigón con su color característico.

KRASOWSKY (1997) dice que el agregado grueso no tiene un papel importante ya que normalmente no es visible en la superficie del material y tiene poca influencia sobre el color, siempre que no esté contaminado con material pulverulento. BARRERA (2002) considera una función distinta del agregado grueso, ya que menciona que produce un efecto dispersante de las aglomeraciones de pigmento que pudieran producirse durante el mezclado del hormigón, por lo que si el agregado grueso tiene partículas pequeñas, habrá que aumentar el tiempo de mezclado para garantizar la homogeneidad de la mezcla.

PASSUELO y otros (2004) indican que para hormigones blancos es fundamental considerar la utilización de fracciones finas de tonalidad bien claras.

La provincia de Córdoba es una región muy rica desde el punto de vista geológico. Es una fuente de abastecimiento de materia prima para la fabricación de cales y cementos, de agregados para la elaboración de hormigones y de rocas con fines ornamentales, como los mármoles.

Los agregados disponibles para utilizar en la industria de la construcción varían desde los basaltos de la zona de Berrotarán hasta granitos de La Calera, las gravas propias del Río Suquía que atraviesa la ciudad, las calizas blancas del sur de la ciudad de Córdoba, especialmente del Valle de Calamuchita, Alta Gracia y hacia el norte y oeste, La Calera, Dumesnil, el Valle de Punilla y la pampa de Olaen. La Fig. 1.7 presenta agregados locales de distintas procedencias de la provincia; se aprecia la variación de los colores y texturas, aspectos que influyen en el hormigón y que es un requisito que debe considerarse en los hormigones coloreados.



**Figura 1.7 Agregados de la provincia de Córdoba**

### **1.3.3 Agua**

La calidad del agua es importante para el desempeño del hormigón por lo que se debe realizar una evaluación antes de ser utilizada. En el ámbito nacional, el Reglamento CIRSOC 201 (1982) establece restricciones complementarias a las del agua para hormigones (Norma IRAM 1601) cuando se utilicen para hormigones pretensados, indicando que el análisis a realizar debe incluir el aporte de los cloruros provenientes de los agregados, aditivos y agua. El Proyecto de Reglamento CIRSOC 201 (2002) establece que los requisitos a cumplir son los especificados en la Norma IRAM 1601-86 y considera que el agua potable es apta para lavar los agregados, curar y mezclar hormigón.

También NEVILLE (1998) dice que es importante no sólo analizar el agua con que se elabora el hormigón, sino también el agua utilizada en la etapa de curado, el agua que se usa para la limpieza de los equipos y el agua que se usa para lavar los agregados. Hace mención a que las impurezas que contenga el agua pueden afectar el endurecimiento del cemento, la resistencia del hormigón y producir manchas en su superficie, lo que es relevante para la estética de la obra y la obtención de hormigones coloreados, en los que la apariencia superficial es un índice de calidad.

### **1.3.4 Aditivos**

Los aditivos son sustancias que incorporadas al hormigón, mortero o pasta antes o durante el amasado, en una proporción no superior al 5% del peso de cemento, producen la modificación deseada en dicho hormigón, mortero o pasta en estado fresco o endurecido, de alguna de sus características, de sus propiedades habituales o de su comportamiento.

El Reglamento CIRSOC 201 (1982) establece que los aditivos para morteros y hormigones cumplirán con la norma IRAM 1663 que no se opongan a las disposiciones del mismo, coincidiendo con el Proyecto de Reglamento CIRSOC 201 (2002).

---

Según CARVALHO (2000) el empleo de aditivos en el hormigón y con más razón por motivos estéticos en el hormigón coloreado, está condicionado a la realización de ensayos previos con la finalidad de determinar los efectos que ellos puedan tener sobre la coloración del hormigón, con especial atención cuando se utiliza cemento blanco.

En la bibliografía existen antecedentes referidos a la utilización de aditivos en hormigones con pigmentos, especialmente cuando se trabaja con cemento blanco; el uso de los plastificantes ha sido estudiado por BARRERA (2002), CARVALHO (2000), HENDGES (2004) y WERNECK DA COSTA (2004), entre otros autores; la acción de los superfluidificantes también ha sido tratada por COLLEPARDI (2005) y SILVA FILHO (2004). Siempre lo importante es la compatibilidad entre aditivos y cementos, sean cuales sean grises o blancos o coloreados y más aún cuando se incorpora un material muy fino, como los pigmentos; en definitiva debe definirse la compatibilidad o no entre el cemento, las adiciones y el aditivo empleado, aunque no se encuentran referencias en la bibliografía al estudio del tema con pigmentos.

AÏTCIN (2000) presenta dos métodos que empleados en forma adecuada, permiten, en una primera instancia determinar combinaciones eficientes o ineficientes trabajando con pastas cementíceas. Cada uno de los métodos tiene sus ventajas e inconvenientes; el método del cono de Kantro requiere la utilización de poco material, pero su determinación es estática, mientras que en el método del cono de Marsh es necesario utilizar más material, pero la pasta es ensayada en condiciones más dinámicas. El uso simultáneo de ambos métodos es interesante porque sus resultados permiten analizar parámetros reológicos predominantes en cada uno de ellos. Según MONTE (2003) la determinación de la dosis de aditivo correspondiente al punto de saturación por medio de estos ensayos, es adecuada para tener una referencia al diseñar un hormigón.

Esta gran variedad de materiales sumado a la problemática propia de la pasta, justifican los estudios exhaustivos que han venido llevando a cabo muchos investigadores, quedando aún un campo propicio para nuevas investigaciones.

---

### 1.3.5 Pigmentos

Los pigmentos para colorear hormigones deben ser partículas muy finas, químicamente inertes, insolubles, que puedan dotar de color al material al cual se añaden; preferiblemente deben de ser materiales inorgánicos pues los orgánicos a pesar de tener poder colorante, suelen perder el color con la acción de la intemperie en el tiempo.

La demanda del mercado, incorporando la experiencia adquirida, ha hecho que la provisión de pigmentos haya ido cambiando con el transcurso de los años. Si bien se comenzó utilizando pigmentos en polvo, actualmente también se dispone de soluciones acuosas o “slurries” que proporcionan algunas ventajas de manejo y dosificación; sin embargo hay que ser cuidadosos, ya que contienen una proporción relativamente alta de agua, que también influye en los costos de transporte, incrementándolos.

Los pigmentos que se utilizan para colorear al hormigón deben ser insolubles en agua, resistentes a la alcalinidad del cemento, inertes químicamente con respecto al cemento, a los agregados y a los aditivos, resistentes a la intemperie, estables a la luz y a temperaturas extremas. Además deben poseer gran capacidad de pigmentación, posibilidad de obtener el brillo, la luminosidad y el tono para el color deseado, uniformidad en el tamaño y la finura de las partículas que lo componen, así como garantía en el suministro y costo accesible.

En algunos países, el uso del hormigón coloreado ha exigido la regulación de la calidad y composición de los pigmentos, así también como la forma de incorporación a la mezcla. Dentro de esta normativa se destacan:

- ✓ BS 1014 “Specification for pigments for Portland cement and Portland cement products”, de Inglaterra, que establece los requisitos básicos que deben cumplir los pigmentos.
  
- ✓ ASTM C 979 “Standard Specification for Pigments for integrally colored concrete”, de Estados Unidos, que cubre los requisitos básicos de los pigmentos

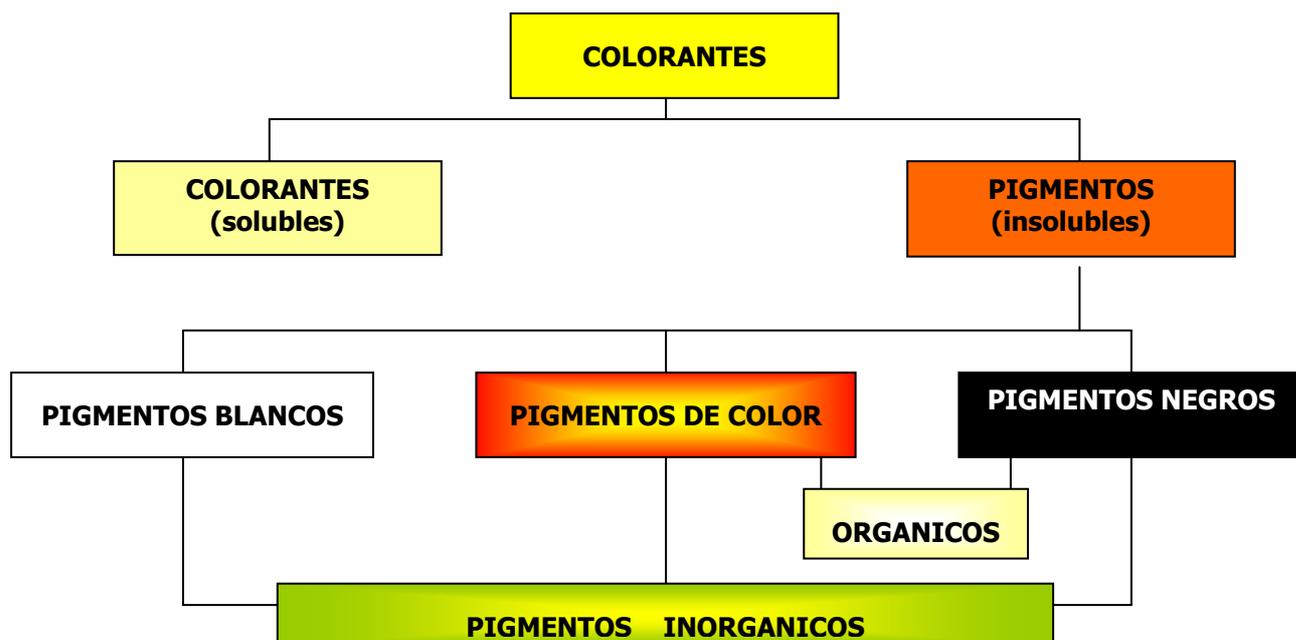
---

en polvo y brinda información adecuada para la selección y el control de las características de los pigmentos.

- ✓ DIN 53 237 “Testing of pigments; pigments for colouration of building materials based on cement or lime”, de Alemania que hace referencia a las condiciones que actualmente se imponen a los pigmentos empleados en la coloración de materiales aglomerados con cemento y cal.
- ✓ Guía ACI 212.3R, destinada al empleo de aditivos en el hormigón. Dedicar un párrafo, el 7.5. a los aditivos colorantes indicando los adecuados según el color deseado y señalando los requisitos exigibles a éstos; se menciona que los pigmentos específicamente preparados para el uso en morteros y hormigones están disponibles tanto a partir de materiales sintéticos como naturales; hace referencia a que los pigmentos naturales generalmente no son molidos tan finamente, ni son tan puros como los sintéticos y no producen un color intenso por unidad de adición.
- ✓ EN 12878, establece requerimientos como la estabilidad en agua, la resistencia a los álcalis, la resistencia a la luz y algunos efectos en el hormigón, entre otros.

En el Reglamento CIRSOC 201 (1982) y en la propuesta del Proyecto de Reglamento Argentino CIRSOC 201 (2002), se hace referencia a las adiciones minerales pulverulentas, pero solamente dice que se pueden incorporar otras adiciones como cenizas volantes, microsílice, polvo de piedra caliza “filler”, pigmentos, metacaolín, etc. También se menciona, que debe demostrarse mediante ensayos de laboratorio que el empleo de la adición en las cantidades previstas, produce el efecto deseado sin perturbar sensiblemente las características del hormigón y que no produce reacciones desfavorables.

Según TEBBE (1992), los agentes colorantes a utilizar para lograr este fin incluyen a los colorantes propiamente dichos, solubles en agua, y a los pigmentos, insolubles en agua; esta clasificación se reproduce en la Fig.1.8.



**Figura 1.8** Esquema de posibles agentes colorantes según TEBBE (1992)

Los pigmentos blancos para uso en el hormigón deben presentar un tenor de dióxido de titanio de 99%. El dióxido de titanio, como una sustancia, es resistente a la intemperie y a la acción de muchas sustancias químicas, no es oxidable y no reacciona con ácidos orgánicos ni con la mayoría de los inorgánicos, ni con sustancias alcalinas o solventes (BAYER, 1991). Se utiliza para aclarar el tono de los hormigones de color y para hacer más “blanco” al hormigón con cemento blanco; también, en otras aplicaciones, es fundamental su uso en tintas para ayudar a mantener los colores debido su alta resistencia a la intemperie.

Los pigmentos de color al igual que los negros, pueden ser orgánicos o inorgánicos, siendo estos últimos los más utilizados en la industria de la construcción.

Otra clasificación es según su forma de obtención. BARRERA (2002), CARVALHO (2000) y BAYER (2000), entre otros autores, los presentan clasificados en:

- ✓ Naturales: provenientes de yacimientos.
- ✓ Sintéticos: manufactura sintética a través de procesos estandarizados.

Los pigmentos naturales son tierras coloreadas de manera natural por óxidos e hidróxidos metálicos, principalmente hierro. Los más conocidos son los ocre, encontrándose minas de óxidos de hierro naturales aún en explotación.

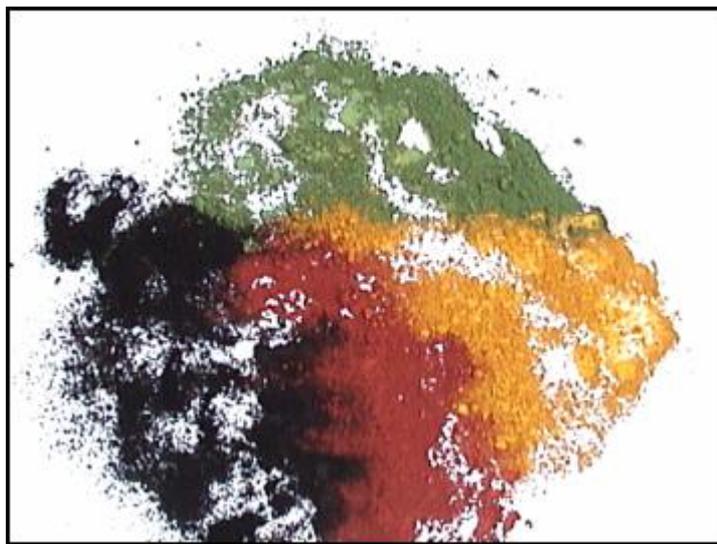
Se calcinan a elevadas temperaturas y se hacen pasar por tamices sucesivos para reducir el tamaño de la partícula y controlar su color. La tierra natural calcinada se tamiza hasta conseguir un tamaño uniforme de los granos de unos 5 a 7 mm. Posteriormente se hace pasar por varios rodillos que reducen el tamaño hasta alcanzar un rango de partículas que va desde las 10 hasta las 50  $\mu\text{m}$ , tamaño mucho mayor que la de los pigmentos sintéticos. Para los pigmentos naturales, en principio sería recomendable que el 99,99% de las partículas no superen 50  $\mu\text{m}$ .

Los únicos pigmentos naturales válidos son los derivados de óxidos de metales y de manera casi exclusiva, los óxidos ferrosos y férricos para la gama de negros, rojos, amarillos y ocre como combinaciones de los dos anteriores, el dióxido de titanio para el color blanco y los óxidos naturales de cromo para la obtención del verde, aunque el óxido de cromo natural no es explotable por su baja concentración.

Únicamente los minerales puros garantizan no afectar la resistencia. Aquellos componentes en cuya formulación entra algún hidroxilado, ávido de oxígeno, como puede ser el humus, azúcares, alcoholes o almidones quedan terminantemente excluidos de usarse como colorantes en el hormigón, por sus efectos perjudiciales.

En general los pigmentos naturales son poco utilizados en hormigones ya que generalmente vienen mezclados con arcillas, cuarzos y otras impurezas. Además son de un tamaño de partícula relativamente grande (CARVALHO, 2000), de tonalidades opacas, de baja viveza, de bajo rendimiento o poder de coloración y de color variable, por lo que su uso puede afectar seriamente las características intrínsecas del hormigón.

Los pigmentos sintéticos presentan cualidades superiores a los pigmentos naturales y están compuestos principalmente por óxidos de hierro, cromo, cobalto y titanio; en la Fig. 1.9 se presentan algunos colores de pigmentos disponibles comercialmente; el nombre común de los pigmentos y sus denominaciones químicas se presentan en la Tabla 1.4.



**Figura 1.9 Colores de pigmentos verde, rojo, amarillo y negro**

Se deben elegir óxidos técnicamente puros, sin aditivos ni constituyentes secundarios. También se debe considerar que tengan gran poder colorante, el cual no sólo depende de la naturaleza y pureza del pigmento sino también de su finura. Con respecto al poder colorante de los pigmentos es posible obtener información confiable realizando un ensayo de laboratorio, mezclando una cantidad fija de pigmento con una cantidad definida de cemento de acuerdo con la norma DIN 53 237.

**Tabla 1.4 Identificación del nombre común y fórmula química de pigmentos a base de óxidos utilizados en hormigones**

Nombre común	Fórmula	Denominación química	Color
Óxido de hierro rojo	$\text{Fe}_2 \text{O}_3$	Óxido férrico	Rojo
Óxido de hierro amarillo	$\text{Fe}(\text{OH})_2$	Hidróxido ferroso	Amarillo
Óxido de hierro negro	$\text{Fe}_3 \text{O}_4$	Óxido ferroso-férrico	Negro
Óxido de hierro marrón	mezcla	---	Marrón
Óxido de cromo	$\text{Cr}_2 \text{O}_3$	Óxido de cromo	Verde
Óxido de cobalto	$\text{Co}(\text{Al}, \text{Cr})_2 \text{O}_4$	Aluminato de cobalto	Azul
Dióxido de titanio	$\text{TiO}_2$	Dióxido de titanio	Blanco

Si bien los pigmentos sintéticos tienen el mismo origen mineralógico que los naturales, al ser obtenidos por procesos controlados y estandarizados, tienen la ventaja de otorgar alta pureza (no tienen ningún tipo de carga), elevado brillo y alto poder de coloración, debido al pequeño tamaño de las partículas.

Las principales características físicas que se deben controlar en los pigmentos en polvo son las de forma y tamaño de partículas y la de absorción de agua. La forma y tamaño de las partículas tiene una importante incidencia en el matiz del color y la uniformidad que se puede lograr en el producto final. Las partículas de los pigmentos son aproximadamente diez veces más finas que las del cemento, con tamaños que van desde 0,01 a 10  $\mu\text{m}$ , lo que corresponde a una superficie específica Blaine aproximada de 500 a 2.000  $\text{m}^2/\text{kg}$ , superior a la mayoría de los cementos que presentan finuras Blaine de 280 a 500  $\text{m}^2/\text{kg}$ .

Fotos de microscopias revelan que las partículas de pigmentos de óxido de hierro amarillo tienen forma de agujas y las partículas de óxidos de hierro negro y rojo, así como las de dióxido de titanio (blanco), óxido de cromo (verde) y aluminato de cobalto (azul) tienen una forma cúbica a esférica. La tonalidad que adquieran los materiales pigmentados dependerá, en parte, de la relación ancho-largo que posean estas partículas. La variación de tamaño de las partículas afecta más la capacidad del pigmento para difractar la luz que lo que influye en la absorción de ésta y una menor absorción de luz (mayor reflejo) confiere tonalidades blancas.

En la Tabla 1.5 se presenta, según BARRERA y otros (2002), el tamaño medio de las partículas de acuerdo con su color.

**Tabla 1.5 Tamaño medio de las partículas de pigmento (óxidos) según BARRERA y otros (2002)**

Color del pigmento	Tamaño medio de las partículas [ $\mu\text{m}$ ]
Rojo	0,09 a 0,7
Negro	0,15 a 0,6
Amarillo	0,1 x 0,8 a 0,2 x 0,8
Verde	0,3 a 0,35
Blanco	0,3 a 0,5

Un aspecto a destacar, importante para la tecnología del hormigón es la absorción de agua; es un índice que expresa la cantidad de agua fijada por 100 gramos de pigmento y se determina por el procedimiento establecido en la norma ASTM D 281 reemplazando el aceite de linaza utilizado en la norma por agua. En la Tabla 1.6 se presentan los porcentajes de absorción de agua para algunos colores de pigmentos.

**Tabla 1.6 Porcentajes indicativos de absorción de agua de óxidos según BARRERA y otros (2002)**

Color del pigmento	Absorción de agua [%]
Rojo	22- 34
Negro	21 – 33
Amarillo	26 – 80
Verde	13 –18
Blanco	13 – 16

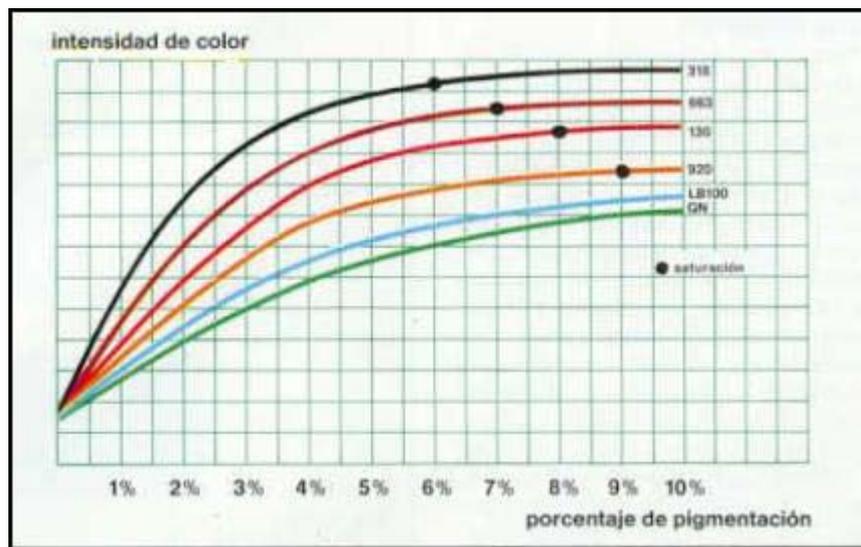
Con respecto a la estabilidad de los pigmentos, en general los óxidos son compuestos estables frente a la acción de la luz ultravioleta, al ácido carbónico, cambios fuertes de humedad, a los ácidos y a los álcalis.

Gran parte de la bibliografía consultada coincide en que los requerimientos básicos que deben cumplir son los que se indican a continuación:

- Ser inertes con los demás componentes del hormigón o mortero.
- Insolubles en agua y sin contenido de sales y ácidos.

- Resistente a los álcalis.
- El pH completamente estable.
- Resistentes a la acción a la luz y a la intemperie.
- Posibilidad de mezclarse fácilmente con el cemento.

La dosificación de los pigmentos se realiza en porcentaje del peso de cemento para un metro cúbico de hormigón. A medida que se incrementa el porcentaje de pigmento la intensidad del color obtenido aumenta hasta llegar a un punto de saturación, a partir del cual si se emplea mayor contenido de pigmento la intensidad del color permanece prácticamente constante. Este punto de saturación varía para los diferentes óxidos y colores y combinaciones con distintos cementos. En la Fig. 1.10 se presenta un gráfico en el cual se indica el punto de saturación para varios colores; se aprecia que para estos pigmentos el punto de saturación está por encima del 6% de porcentaje de pigmentación para todos los colores.



**Figura 1.10 Variación de la intensidad de color en función del porcentaje de pigmentación (BAYER, 1989)**

## 1.4 Propiedades del hormigón coloreado

La influencia de los pigmentos en las propiedades del hormigón y en su durabilidad es aún discutida y muy poco conocida. En estado fresco el porcentaje y tipo de pigmento pueden afectar a la trabajabilidad de la mezcla. En estado endurecido se discute si afectan la resistencia a compresión y en aspectos referidos a la durabilidad, como la estabilidad del color frente a las acciones climáticas, existen pocos trabajos científicos experimentales que demuestren su comportamiento.

Cuando se busca información con respecto a cómo la selección de materiales, dosificación y métodos constructivos influyen sobre las propiedades y la durabilidad de estos hormigones, la bibliografía es dispersa.

### 1.4.1 Propiedades en estado fresco

Son pocos los estudios científicos que tratan el tema de la influencia de los pigmentos en las propiedades en estado fresco del hormigón coloreado. El énfasis está puesto principalmente en determinar cómo afectan la trabajabilidad, medida por el asentamiento. En ese sentido la bibliografía es concurrente en citar que por debajo del 6 % de adición de pigmento no se producen alteraciones significativas.

CARVALHO (2000), ha trabajado con cemento gris y blanco, aditivo plastificante y pigmentos de óxido de hierro rojo, amarillo y negro, en porcentajes comprendidos entre el 1,4% y 3%. Además ha tenido en cuenta los siguientes criterios:

- Un único contenido de cemento
- Utilización del mismo tipo de árido
- Pigmento añadido en seco, dosificado en relación al peso de cemento
- Dos relaciones agua/cemento
- Empleo de aditivo para ajustar el hormigón a la consistencia deseada

La norma EN 12878 presenta información muy interesante con respecto a los requerimientos de ensayos que deben cumplir los pigmentos para colorear materiales distinguiendo dos categorías:

- materiales que contienen cemento o cal, no estructurales y sin armaduras de refuerzo
- hormigón estructural, reforzado con acero

Aunque realiza esta distinción, fija iguales requerimientos para el tiempo de fraguado de la pasta de cemento (no del hormigón), estableciendo un tiempo inicial mínimo de 60 minutos y un tiempo final máximo de 720 minutos. También establece que la máxima diferencia entre el tiempo de fraguado inicial de las mezclas con y sin pigmento debe ser menor de 60 minutos.

La norma ASTM C 979 indica que la adición de pigmento en el hormigón no debe disminuir más de una hora el tiempo inicial de fraguado ni aumentar el tiempo inicial y final más de una hora y media, comparándolo con el hormigón de referencia, sin pigmento. Hace referencia también a que cuando se utiliza aditivo incorporador de aire, la adición de pigmentos no debe modificar el contenido de aire en más del 1 %.

Según LYNSDALE Y CABRERA (1989) la incorporación de pigmentos en el hormigón coloreado en estado fresco se traduce en:

- una reducción de la trabajabilidad del hormigón especialmente cuando se utilizan porcentajes altos de adición.
- no tener efecto significativo sobre el tiempo de fraguado cuando se utilizan en las dosis recomendadas para la mayoría de los pigmentos, aunque los pigmentos negros de carbón pueden producir fraguado instantáneo, citando a MAILVAGANAM (1984)
- no afectar el contenido de aire intencionalmente incorporado, salvo el pigmento negro de carbón y algunos otros que tienen tamaño de partícula

---

muy finas según autores como MAILVAGANAM (1984), TAYLOR (1974) y VAN WALLENDael (1974)

- no afectar adversamente la exudación, aunque citando a MAILVAGANAM (1984), indican que si se utilizan cementos con bajo contenido de C<sub>3</sub>A (aluminato tricálcico), puede reducirse la cohesión y promover la exudación de agua.

RAMACHANDRAN (1995), menciona brevemente que la utilización de pigmentos puede producir diversos efectos sobre las propiedades de hormigones y morteros en estado fresco y se refiere específicamente a:

- Trabajabilidad: con porcentajes de pigmento menores del 6 % no se afecta la consistencia del mortero ni la trabajabilidad del hormigón significativamente; altos dosajes de pigmento incrementan la demanda de agua, particularmente cuando se utilizan pigmentos sintéticos con tamaño de partículas muy finas.
- Características de fraguado: la mayoría de los pigmentos y aditivos multicomponentes, cuando se utilizan en las dosis recomendadas, no producen alteraciones en el fraguado; el pigmento negro de carbón y algunos óxidos de hierro pueden producir fraguado instantáneo.
- Contenido de aire incorporado: el uso de el pigmento negro de carbón y otros pigmentos de alta superficie específica pueden reducir la cantidad de aire incorporado.
- Exudación: los pigmentos, en las dosis recomendadas, no producen alteraciones en la exudación. Los aditivos multicomponentes y dispersiones de pigmentos, cuando se utilizan en dosis más elevadas que las recomendadas o con cementos de bajo contenido de aluminato tricálcico pueden reducir la cohesión y promover la exudación.

BÜCHNER (1991) coincide sobre la influencia de los pigmentos en el asentamiento del hormigón, más concretamente en el aumento de la demanda de agua y hace referencia al contenido de poros en la masa de hormigón.

---

Es posible notar que a pesar de que existen trabajos que analizan la influencia de los pigmentos sobre las propiedades en estado fresco del hormigón, son pocos los que evalúan y discuten este tema con aporte de trabajos experimentales.

#### 1.4.2 Propiedades en estado endurecido

De las escasas publicaciones sobre las propiedades de mortero y hormigón coloreado, varias se refieren a la resistencia a compresión y algunas a propiedades relacionadas con la durabilidad, aunque la información es controvertida.

De acuerdo con CARVALHO (2000), quien ha trabajado con cemento gris y blanco, aditivo plastificante y pigmentos de óxido de hierro rojo, amarillo y negro, las conclusiones para algunas propiedades vinculadas con la durabilidad son:

- Absorción capilar: la influencia de los pigmentos es notable en hormigones con consistencia fluida, cemento portland gris y pigmentos, disminuyendo aproximadamente en un 30 % con respecto al patrón, mientras que este comportamiento se invierte en el caso de cemento blanco; el aumento de la absorción capilar en un 20 % se produce en el hormigón con cemento blanco y pigmento rojo con respecto al mismo hormigón sin pigmento. En hormigones con consistencia plástica, la influencia de la incorporación es despreciable con respecto al efecto de la relación agua/cemento.
- Permeabilidad al agua bajo presión: la adición de pigmentos no resulta desfavorable, salvo en el caso del hormigón con cemento blanco y pigmento amarillo, que supera los 30 mm a los 28 días de edad.
- Porosidad: La incorporación de pigmento lleva asociado un incremento en la porosidad del hormigón, siendo el pigmento amarillo el que produce el mayor aumento.
- Carbonatación: La incorporación de pigmentos lleva asociado un ligero incremento en la profundidad de carbonatación, pero únicamente cuando son adicionados al hormigón con cemento blanco, siendo también en este caso el pigmento amarillo el que produce un mayor aumento.

Según algunos autores tales como BÜCHNER (1986), MOWAT y SYMONS (1982), MAILVAGANAM (1984), la resistencia a compresión de un hormigón pigmentado que tiene la misma consistencia (ajustando la relación agua/cemento) que un hormigón patrón sin pigmento, es prácticamente igual o levemente mayor que la del hormigón de control, aún cuando se utilicen dosis de pigmento mayores que las recomendadas.

BÜCHNER (1991) se refiere a la influencia de la concentración de pigmentos en las propiedades del hormigón endurecido, considerando sólo la resistencia a compresión.

La Revista CONSTRUÇÃO, n°2617 (1998), expresa que "...para varios especialistas, parece ser necesario agregar más cemento al hormigón, para aumentar la resistencia, que sería reducida por el uso de pigmentos...". Algunos autores como HELENE y HARTMANN (2003) no comparten de esa visión incluso porque han batido el record mundial de resistencia de hormigón coloreado utilizando pigmento rojo.

La reducción de resistencia a compresión a los 28 días del hormigón coloreado con respecto al hormigón patrón se limita al 10 % en la norma BS 1014 y también en la norma ASTM C 979.

RAMACHANDRAN (1995), menciona brevemente que la utilización de pigmentos puede producir diversos efectos sobre las propiedades de hormigones y morteros sin presentar resultados experimentales; se refiere específicamente al hormigón endurecido en términos de:

- Resistencia a compresión y tracción: depende del porcentaje de pigmento.
- Permeabilidad: varía con la relación agua/cemento.

Se puede observar, a partir de las publicaciones analizadas, que a pesar de que varias de ellas evalúan la resistencia a compresión de los hormigones con pigmentos, son casi no existen trabajos que evalúen las demás propiedades

---

mecánicas como el módulo de elasticidad, entre otras; estas vacancias del conocimiento ponen de manifiesto la necesidad de caracterización de las propiedades de hormigones coloreados.

### **1.4.3 Propiedades relacionadas con la durabilidad**

Los estudios sobre la durabilidad de morteros y hormigones pigmentados y su performance en distintos medios ambientales son muy limitados. En la literatura se encuentran algunos trabajos en los que se menciona la importancia de la determinación de la resistencia al congelamiento y deshielo y de la permeabilidad al agua del hormigón pigmentado, que se discuten a continuación.

LYNDALE Y CABRERA (1989) presentan brevemente consideraciones favorables con respecto al comportamiento del hormigón coloreado con pigmentos de óxido de hierro, óxido de cromo y negro de carbón; destacan que éste último tiene un comportamiento desfavorable en los ciclos de congelamiento y deshielo. Con respecto a la permeabilidad al agua resaltan que se encuentra muy poca bibliografía específica.

Es interesante notar que CARVALHO (2000) en sus estudios experimentales en hormigones elaborados con cemento pòrtland y cemento blanco, en las condiciones de exposición a las que fueron sometidos, verifica que la incorporación de pigmentos (óxidos de hierro) lleva asociada una disminución de la durabilidad, con una microestructura más porosa y absorbente, con mayor permeabilidad al agua y al dióxido de carbono atmosférico. Este autor ha investigado las variaciones de las coordenadas cromáticas en hormigones con adición de pigmentos inorgánicos sometidos a distintos tratamientos de exposición ambiental, verificando la disminución de la luminosidad, dando tonos más pálidos y la reducción de la saturación de color, resultando tonalidades más apagadas. Este envejecimiento es más acentuado en las tipologías de hormigón fabricados con cemento blanco. La exposición a ciclos de humedad-secado apenas produce alteraciones en los hormigones patrones sin pigmento, pero en los hormigones pigmentados pone de manifiesto una disminución de la viveza de los colores y tonos más pálidos.

Con respecto a la estabilidad del color, la norma ASTM C979 considera que la magnitud de la diferencia de color entre hormigón con pigmento que ha sido curado al aire y el mismo hormigón curado a alta humedad relativa cuando es ensayado según su procedimiento no debe ser mayor que la magnitud de la diferencia de color entre dos muestras de hormigón patrón sin pigmento bajo las mismas condiciones.

Considerando que el deterioro del hormigón no es atribuible a una única causa y a la escasa investigación referida al hormigón coloreado, es que se considera necesario desarrollar estudios en los que se vinculen las propiedades en estado endurecido, las propiedades vinculadas con la durabilidad del hormigón coloreado (incluyendo la estabilidad del color) y las condiciones de exposición.

## **1.5 Sistemas de medición del color**

El color ha estado presente siempre en la vida del hombre a juzgar por el legado que es posible encontrar en las pinturas rupestres. En la historia de la humanidad el hombre ha logrado obtener pinturas y tintas cuyos colores han perdurado a través de los siglos. El método científico y las técnicas de laboratorio sólo pertenecen al mundo moderno, en continuo avance.

LOZANO (1975) presenta una reseña histórica del estudio del color y la evolución de las investigaciones realizadas por varios autores. Destaca la obra de Aristóteles *De coloribus* (384-322 a.C), en la cual manifestaba que el color era una propiedad de la luz y que los objetos aparecían coloreados debido a que “contaminaban”, hoy diríamos absorben, la luz. Desde ahí, pasando por FREISCHER (1571), PORTA (1582), TELESII (1590) se encuentran escritos con reglas empíricas; en el siglo XVII, DOMINIS (1611), MAUROLYCUS (1613), DESCARTES (1637) y MARCI (1648) ya habían publicado obras referentes a la luz y el color, pero fue NEWTON (1672) quien inició el análisis de las propiedades físicas del color, aunque la falta de un método práctico de medir e identificar un color, deja a su obra incompleta.

Según LOZANO (1975), es GOETHE (1810) quien analiza el color incorporando al observador. Así, el estudio del color fue desarrollándose con distintos enfoques por YOUNG (1802), RAYLEIGH (1897), MAXWELL (1860), ADAMS (1923), entre otros.

Pero fue en la primera reunión del CIE, Comisión Internationale de l'Éclairage en 1924 y en las siguientes, en donde se delinearon las pautas a seguir en las investigaciones: cabe mencionar que en nuestro siglo y como solución a una necesidad práctica de las industrias de tener algún sistema de medición, aparecieron sistemas cuya base la constituye un atlas de colores, que continúan en vigencia hasta nuestros días.

Entre los atlas de colores de utilidad general se pueden destacar los de Ostwald, Munsell y DIN, utilizados en Europa, Estados Unidos y Alemania. En Argentina cabe mencionar el Atlas de Villalobos, con más de 7.000 colores, en el que el tamaño de la muestra es un cuadrado de 1 cm de lado con una abertura de 4 mm de diámetro para colocar el color a comparar.

Si bien los atlas de color son métodos sencillos y económicos para cuantificar el color, presentan algunos inconvenientes (CARVALHO, 2000):

- ✓ no evitan el problema de defectos de visión del observador
- ✓ es necesario tener en cuenta que estas cartas de comparación se deterioran con el tiempo
- ✓ no consideran el tipo de iluminante
- ✓ producen terminologías confusas
- ✓ y sobre todo no existe memoria del color por el observador.

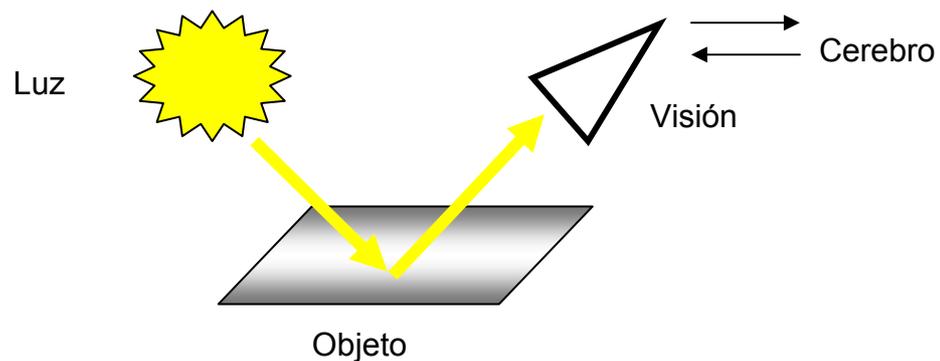
Debido a estas dificultades, se recomienda la utilización de métodos que permitan conocer de forma numérica el color de los objetos y su posible variación.

### 1.5.1 Colorimetría

La colorimetría es la ciencia de la medición del color (MARQUES FILHO, 2001); ha tenido durante varias décadas su objetivo principal en la medición del color y su especificación en sistemas de representación adecuados, pretendiendo algunos de ellos uniformizar el espacio de color.

Según MARQUES FILHO (2001), el principio de percepción visual del color envuelve tres componentes, que se presentan en la Fig. 1.11, que son:

- Luz
- Objeto
- Observador



**Figura 1.11 Componentes de la percepción visual del color (MARQUES FILHO, 2001)**

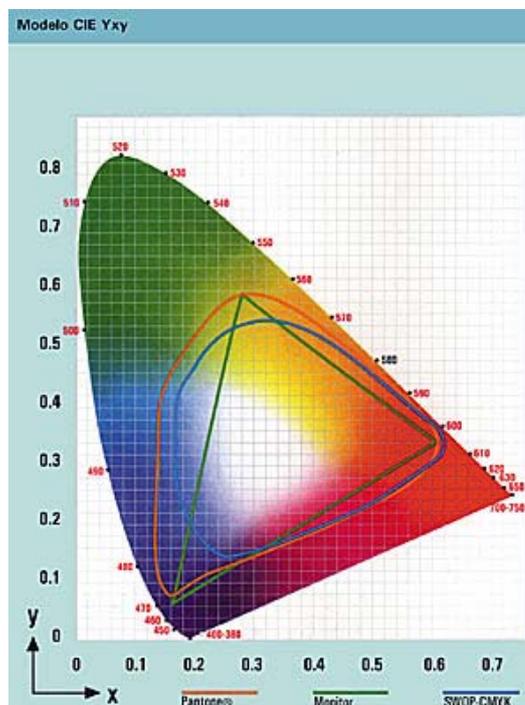
La asociación de estos componentes forma los valores triestímulos que representan determinado color y son el entorno y el sistema visual humano los que interactúan en la creación y percepción del color.

La colorimetría permite que la impresión sensorial “color” pueda ser expresada cuantitativamente por un número, definiendo los requisitos del color con los parámetros cromáticos.

### 1.5.2 Sistemas CIE

La Comisión Internationale de l'Éclairage (CIE) desarrolló en 1931 un sistema básico para especificaciones del color, que luego fuera reformulado en 1964 para un campo visual más grande (MISTRICK, 1993). En 1931 la CIE definió con precisión los tres colores primarios, o valores triestímulo, denominados X (rojo), Y (verde) y Z (azul) a partir de los cuales pueden crearse todos los demás colores visibles para un observador estándar. Más recientemente, se ha introducido el modelo de color CIE Yxy. Todos los colores que tengan la misma claridad están ubicados en un plano aproximadamente triangular.

En la Fig. 1.12, se presenta el modelo CIE Yxy; el eje horizontal "x" indica la cantidad de rojo de los colores y el eje vertical "y" muestra la cantidad de verde de los colores. El eje Y, que representa el valor o claridad de los colores, sólo podría mostrarse en una representación tridimensional del modelo CIE Yxy.



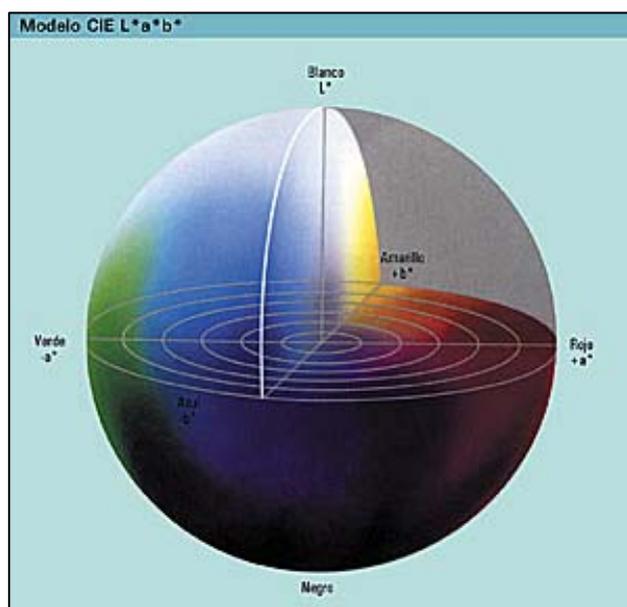
**Fig. 1.12 Modelo CIE Yxy**

Las longitudes de onda de luz pura se encuentran en los bordes curvados de la gama triangular de los colores visibles. El borde recto inferior representa los

colores obtenidos mezclando las longitudes de onda roja y azul de ambos extremos del espectro.

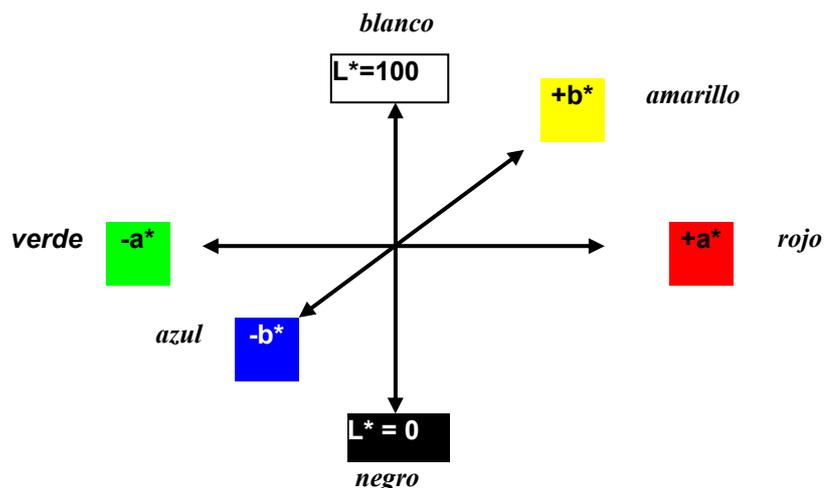
El modelo de color CIE Yxy no lineal fue transformado matemáticamente en el año 1976 para obtener el modelo CIE  $L^*a^*b^*$  uniforme, que se presenta en la Fig. 1.13, en el cual las distancias entre los colores se acercan más a lo que percibimos y proporciona mayor practicidad para trabajar con mediciones del color.

En este sistema todos los colores con la misma claridad se encuentran en un plano circular, a través del cual cruzan los ejes  $a^*$  y  $b^*$ . Los valores  $a^*$  positivos son rojizos; los valores  $a^*$  negativos, verdosos; los valores  $b^*$  positivos, amarillentos; los valores  $b^*$  negativos, azulados. La luminosidad  $L^*$  varía en la dirección vertical, desde el blanco hasta el negro.



**Fig. 1.13 Modelo CIE  $L^*a^*b^*$  del sólido de color**

Simplificando este modelo para realizar mediciones prácticas, el sistema CIELAB o CIE 76 consiste en transformar el volumen de color en un gráfico cartesiano espacial que describe el color de una fuente de luz reflejada por una superficie bajo condiciones de iluminación especificadas. Simplificando aún más el modelo, en la Fig. 1.14 se presenta un esquema del sistema CIELAB en el que se miden las coordenadas cromáticas  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  (que son las que se suelen emplear en la gran mayoría de las normativas de análisis del color).



**Figura 1.14 Esquema del Sistema CIELAB donde se indican las coordenadas cromáticas. La variación sobre el eje L corresponde a cambios en la luminosidad y el centro del diagrama es acromático.**

Su principal ventaja está en que su determinación se realiza con instrumentos de medición como los espectrofotómetros o colorímetros y se evitan los errores de percepción que producen cuando se utilizan las cartas de color, aunque siempre es recomendable realizar comparaciones con las cartas de color.

La posibilidad de “medir el color” permite verificar los cambios con respecto al original dentro de márgenes establecidos y realizar mediciones para evaluar e inclusive interpretar desvíos o diferencias de color con respecto al patrón. Para ello hay que calcular parámetros cromáticos, como por ejemplo la saturación del color  $C^*$ , el color total  $E^*$  y sus variaciones, cuyos cálculos y significado se indican en la Tabla 1.7.

**Tabla 1.7 Parámetros colorimétricos**

Parámetro	Significado	Cálculo
$\Delta L^*$	Diferencia de luminosidad	$L^*_{final} - L^*_{inicial}$
$\Delta a^*$	Diferencia eje rojo-verde	$a^*_{final} - a^*_{inicial}$
$\Delta b^*$	Diferencia eje amarillo-azul	$b^*_{final} - b^*_{inicial}$
$C^*$	Saturación	$\sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2}$
$\Delta C^*$	Diferencia de saturación	$\sqrt{(\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$
$E^*$	Color total	$\sqrt{(L^*)^2 + (a^*)^2 + (b^*)^2}$
$\Delta E^*$	Diferencia total de color	$\sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$

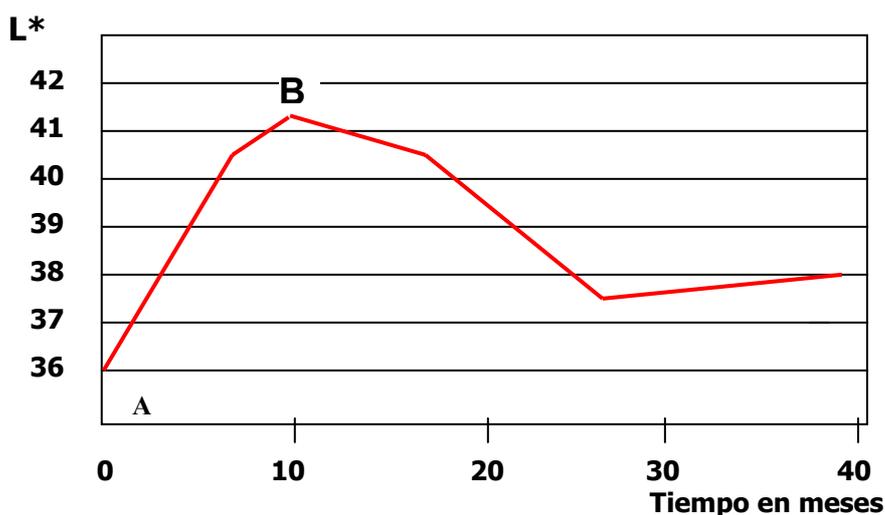
Algunos conceptos importantes relacionados con la medición del color y la interpretación de resultados son:

**Matiz:** posición de  $a^*$  y  $b^*$  en el sistema;  $a^*$  y  $b^*$  pueden ser utilizados para identificar los colores azul, rojo, verde y amarillo así como los matices entre ellos.

**Luminosidad:** variación de  $L^*$  en el sistema; generalmente se dice que un color es más claro o más oscuro.

**Saturación:** corresponde a  $C^*$ ; indica cuando un color es brillante o apagado. Si  $a^*$  y  $b^*$  son iguales a cero, el color es blanco, gris o negro, dependiendo del valor de  $L^*$ .

TEICHMANN (1991) propone otra aplicación de la colorimetría, que es medir la eflorescencia utilizando directamente el valor de la luminosidad  $L^*$ . En la Fig. 1.15 se presenta un gráfico del desarrollo de la eflorescencia durante la exposición a la intemperie en tejas de hormigón negro que han sido expuestas durante un período de 40 meses. Los depósitos blancos de carbonato de calcio pueden ser vistos y medidos sobre el sustrato negro. En el Capítulo 5, Conclusiones, se presenta una transferencia realizada durante el desarrollo de esta tesis para una empresa de premoldeados de hormigón.



**Figura 1.15 Evolución de  $L^*$  con el tiempo de exposición natural. La curva presenta un crecimiento hasta el punto B y luego comienza a disminuir (TEICHMANN, 1991)**

De esta manera con la colorimetría se pueden especificar parámetros que se utilicen en la calificación del hormigón coloreado tales como:

- ✓ Las coordenadas cromáticas,  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$
- ✓ Cromo o saturación,  $C^*$
- ✓ Color total,  $E^*$

La medición del color juega un rol importante en el hormigón coloreado. La luminosidad  $L^*$  es generalmente utilizada como una medida de la intensidad de color, pero sólo si la luminosidad del pigmento difiere significativamente con respecto a la de la pasta de cemento endurecido. Si este no es el caso, el color del hormigón cambiará a medida que se incremente la concentración de pigmento pero la luminosidad no. Entonces será necesario utilizar otra estimación del color además de la luminosidad, por ejemplo la saturación o croma  $C$ , como medición de la intensidad de color.

Otra posibilidad es realizar el análisis con la variación del color total,  $\Delta E^*$ , debido a que el  $\Delta E^*$ , al incluir las variaciones de  $\Delta a^*$ ,  $\Delta b^*$  y  $\Delta L^*$  permite realizar una evaluación global de los cambios de color. Según TEICHMANN (1995), la relación entre  $\Delta E^*$  y la evaluación visual de la diferencia del color en la industria de la pintura es la que se indica en la Tabla 1.8.

**Tabla 1.8 Valores de diferencia de color total y evaluación a simple vista en la industria de la pintura**

$\Delta E^*$	Evaluación de la diferencia de color
menor que 0,2	no visible
0,2 - 0,5	muy leve
0,5 - 1,5	leve
1,5 - 3,0	notable
3,0 - 6,0	muy notable
6,0 - 12,0	grande
mayor que 12,0	muy grande

Sin embargo de acuerdo a su experiencia en la medición del color en superficies rugosas como la del hormigón, valores de  $\Delta E^*$  menores que 1,5 son imperceptibles para el ojo humano y difíciles de medir con instrumentos, lo que estaría indicando un límite a partir del cual los cambios de color en el hormigón son perceptibles a simple vista.

En definitiva, el color se puede medir y habrá que analizar en el caso particular de cada estudio como los componentes de la percepción visual del color (luz, objeto, observador) inciden en las determinaciones para realizar las especificaciones correspondientes.

## **Capítulo 2**

---

### **DURABILIDAD DEL HORMIGÓN COLOREADO**

---

#### **2.1 Introducción**

El estudio de la durabilidad de los hormigones coloreados es tratado escasamente en la bibliografía; son pocas las publicaciones técnico-científicas que lo desarrollan en forma completa y con resultados experimentales; la información se presenta con casos puntuales y prácticamente no existe un consenso y una base sólida para evaluar los factores que pueden afectar las propiedades en estado fresco y endurecido y la durabilidad de las obras construidas con este material (CARVALHO, 2000; PEREZ LUZARDO, 1995).

De acuerdo con MEHTA Y BURROWS (2001), para lograr estructuras de hormigón ambientalmente sustentables es necesario un cambio de paradigma de determinadas creencias y prácticas constructivas. En Estados Unidos se ha demostrado que cuando las resistencias del cemento empezaron a aumentar, también aumentaron los problemas de deterioro del hormigón en toda clase de ambientes, pero especialmente en los de mayor agresividad. En definitiva hubo un avance en el material cemento que no fue acompañado por un avance correspondiente en la calidad de los hormigones y de las estructuras.

El hormigón en estado endurecido está compuesto, además de los agregados, por las sustancias que se han producido en la hidrólisis de los componentes del clinker. Entre estas sustancias se encuentra el hidróxido de calcio,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  o portlandita en cantidad muy importante; su proceso de carbonatación es muy lento y este hidróxido de calcio es un compuesto químico con considerable energía libre y por lo tanto, altamente reactivo, es decir atacable en mayor o menor grado por todos los compuestos de reacción ácida.

Según GOMÁ (1979), los hidrosilicatos e hidroaluminatos formados en la hidrólisis de los compuestos del cemento son también susceptibles de ataque, aunque en menor grado, dada su naturaleza salina de ácidos débiles. El aporte inevitable, según las condiciones de iones del exterior al hormigón dan lugar a posibles reacciones peculiares que es preciso conocer y tener en cuenta antes de construir. Los áridos, según su constitución química, pueden a su vez contener compuestos atacables o transformables.

Lo anteriormente expuesto indica que el hormigón está constituido por un conjunto de sustancias no todas estables, por lo que para lograr un hormigón “durable” será necesario evitar o minimizar las reacciones de transformación. Cualquier transformación química o incluso alotrópica en alguna o algunas sustancias que se encuentran dentro del hormigón ya endurecido, provoca cambios de volumen en mayor o menor extensión, que depende de la propia reacción específica de que se trate y del contenido potencial de la sustancia inestable en sí o frente a las de su entorno de contacto inmediato y con posible reacción.

Para los hormigones coloreados es necesario, al igual que en cualquier tipo de hormigón, conocer, por una parte, la estructura y las propiedades del hormigón y por la otra conocer, evaluar y clasificar el grado de agresividad del ambiente a que va a estar expuesto, con el objetivo de establecer la correspondencia entre la durabilidad de la estructura de hormigón y la agresividad del medio.

La influencia de los pigmentos en las propiedades del hormigón y en su durabilidad es aún discutida y muy poco conocida. Cuando se busca información con respecto a cómo la selección de materiales, dosificación y métodos constructivos influyen sobre las propiedades y la durabilidad de estos hormigones, la bibliografía es dispersa.

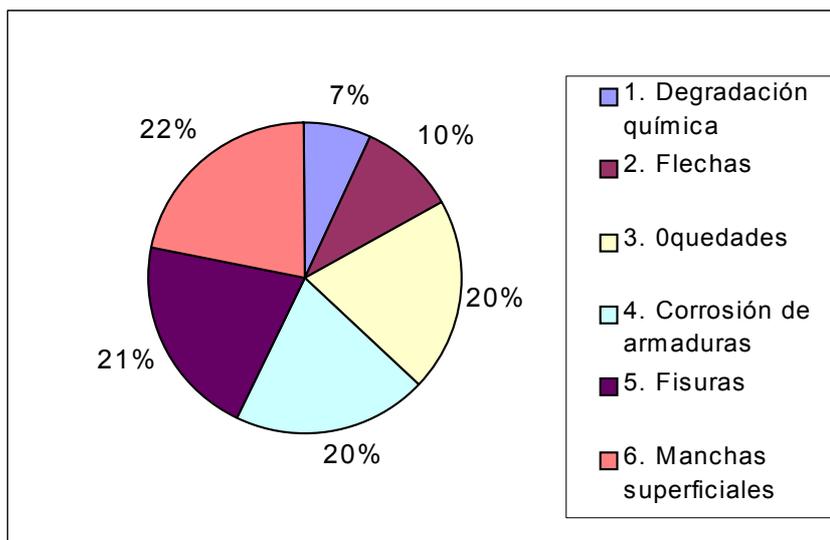
Debido a estas controversias presentadas en la bibliografía, es que se propone en esta tesis el estudio del hormigón pigmentado en estado fresco, en estado endurecido, la vinculación de estas propiedades y otras vinculadas con la durabilidad como una respuesta a la necesidad del conocimiento más profundo del hormigón coloreado.

## **2.2 Causas y Mecanismos de Deterioro: síntomas**

La patología puede ser definida como la parte de la ingeniería que estudia los síntomas, los mecanismos, las causas y los orígenes de los defectos de las obras civiles o sea es el estudio de las partes que componen el diagnóstico de un problema (Manual CYTED, 2003).

Los problemas patológicos, salvo raras excepciones, presentan manifestaciones externas características a partir de las cuales se puede deducir cuál es la naturaleza, el origen, o sea en qué etapa del proceso se produce y los mecanismos de los fenómenos involucrados, así como estimar sus probables consecuencias. Estos síntomas también denominados lesiones, daños, defectos o manifestaciones patológicas pueden ser descritos y clasificados orientando un primer diagnóstico a partir de detalladas y experimentadas observaciones visuales.

Para HELENE y PAZINI, en el Manual de Rehabilitación de Estructuras de Hormigón de CYTED (2003), los síntomas más comunes, de mayor incidencia en el hormigón son las fisuras, las eflorescencias, las flechas excesivas, las manchas en el hormigón arquitectónico, la corrosión de las armaduras, las oquedades superficiales o sea la segregación de los materiales constituyentes del hormigón, cuyos porcentajes se presentan a manera de gráfico en la Fig. 2.1



**Figura 2.1 Distribución relativa de la incidencia de las manifestaciones patológicas en estructuras de hormigón arquitectónico (Manual de Rehabilitación de Estructuras de Hormigón de CYTED 2003)**

Las oquedades (20%), las fisuras (21%), la corrosión de las armaduras (20%) y las manchas superficiales (22%) completan prácticamente el 80% de aspectos que si bien algunos pueden ser graves y de orden estructural, sin dudas afectan la estética de las superficies de hormigón. Estos síntomas se constituyen para los hormigones coloreados en verdaderos problemas que afectan el principal valor agregado de estos hormigones: su apariencia superficial y la belleza de las texturas y acabados.

Si bien en la práctica es difícil clasificar las causas de deterioro del hormigón, a continuación se presenta una distinción que conceptualmente permite distinguir entre causas físicas y químicas.

### 2.2.1 Fenómenos físicos

Según HELENE (2000) la resistencia del hormigón a los diferentes medios agresivos depende de la naturaleza y tipo de sus materiales constituyentes así como de su composición o dosificación:

- ✓ tipo y cantidad de cemento
- ✓ tipo y cantidad de adiciones

- 
- ✓ relación agua/cemento
  - ✓ naturaleza y tamaño máximo del agregado

Estos factores internos se interrelacionan entre sí y son, fundamentalmente, la relación agua/cemento y el grado de hidratación los que influyen en las propiedades vinculadas a la durabilidad, tales como la absorción capilar, la permeabilidad al agua o gases por gradiente de presión, la difusividad de agua o gases, la migración de iones y también en las propiedades mecánicas como la resistencia a la compresión, el módulo de elasticidad, la fluencia, la relajación y la abrasión entre otras.

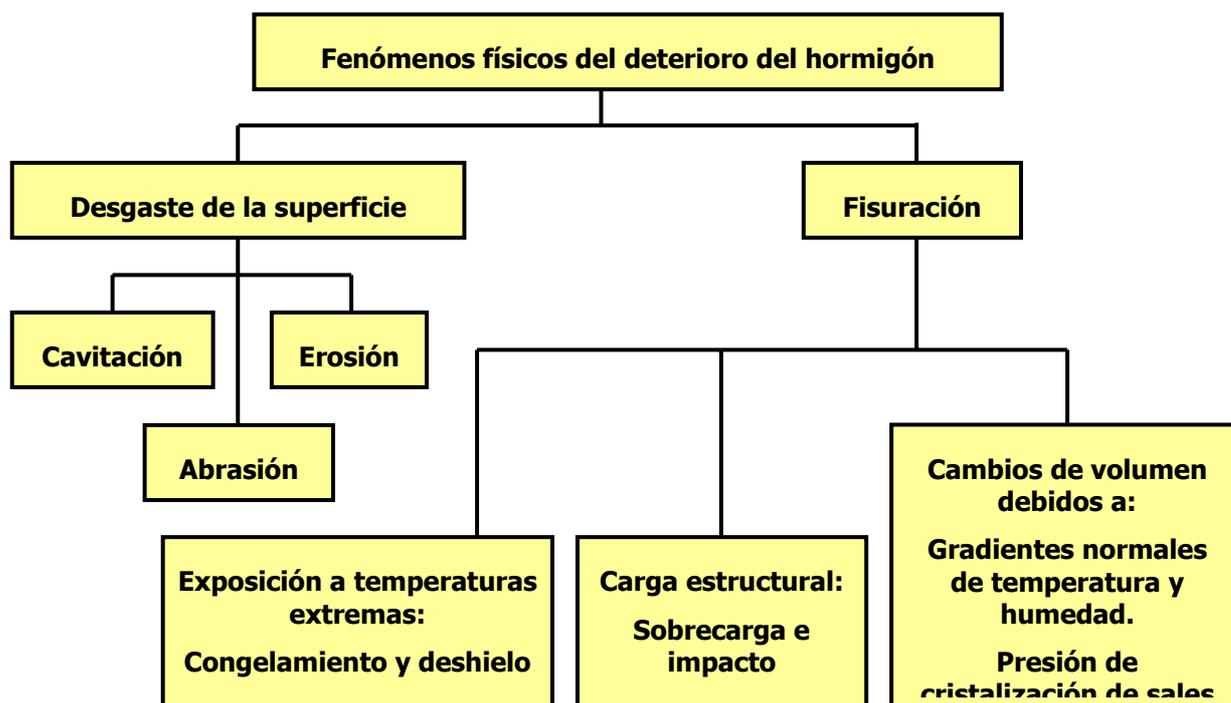
Otro autor, GOMÁ (1979), considera como factores internos:

- ✓ el cemento, sus contenidos de CaO libre, de MgO, de C<sub>3</sub>A y de C<sub>4</sub>AF
- ✓ los agregados, su composición química
- ✓ los aditivos, plastificantes, reductores de agua, incorporadores de aire

Los principales fenómenos físicos del deterioro del hormigón están agrupados por METHA y GERWICK (1982) en dos grandes grupos:

- ✓ desgaste superficial o pérdida de masa por abrasión, erosión y cavitación
- ✓ fisuración debida a gradientes normales de temperatura y humedad, presiones de cristalización en las sales en los poros, carga estructural y exposición a temperaturas extremas tales como congelamiento o fuego.

En la Fig. 2.2 se presenta un diagrama con la clasificación de estas causas físicas que son de especial relevancia para los hormigones coloreados. Además de los hormigones para estructuras, una aplicación de este material se realiza en pisos, en donde el desgaste y la fisuración son requisitos fundamentales.



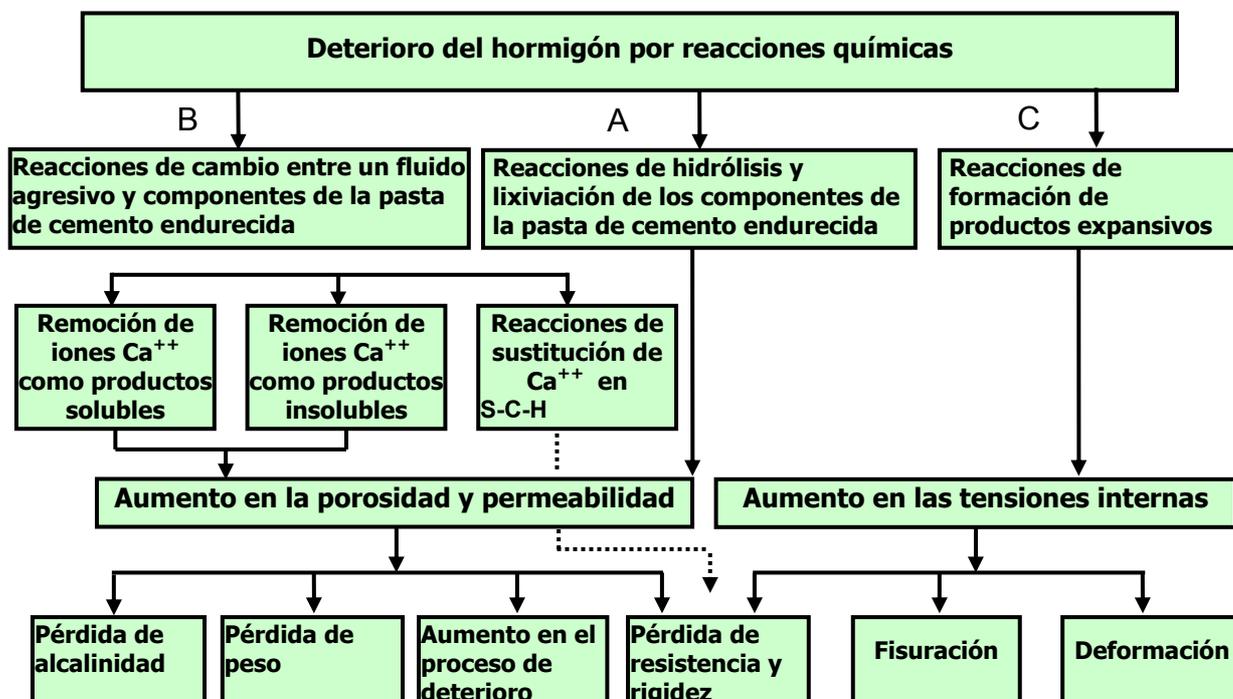
**Figura 2.2 Principales fenómenos físicos del deterioro del hormigón (METHA y GERWICK, 1982)**

### 2.2.2 Fenómenos químicos

La resistencia del hormigón a los procesos destructivos iniciados por reacciones químicas involucra generalmente interacciones químicas entre agentes agresivos presentes en el medio externo y los constituyentes de la pasta de cemento.

En una pasta de cemento bien hidratada, la fase sólida, que es compuesta principalmente de hidratos de calcio relativamente insolubles se encuentran en un estado de equilibrio estable con un fluido en los poros que tiene un alto pH. Teóricamente cualquier medio con pH menor que 10 puede ser calificado como agresivo porque la reducción de la alcalinidad del fluido de los poros llevaría al final a una desestabilización de los productos cementíceos de hidratación (GOMÁ, 1979).

Hay que destacar que las reacciones químicas se manifiestan a través de efectos físicos nocivos tales como el aumento de la porosidad y la permeabilidad, disminución en la resistencia, fisuración y delaminación. Solamente con el objetivo de aclarar conceptualmente el tema, se presenta en la Fig. 2.3, la división en tres subgrupos de las reacciones químicas de deterioro del hormigón.



**Figura 2.3 Principales fenómenos químicos de deterioro del hormigón (METHA y GERWICK, 1982)**

En realidad, los procesos físicos y químicos de deterioro actúan al mismo tiempo y pueden hasta potenciarse mutuamente, interrelacionándose entre sí y mostrando claramente la complejidad de los problemas de durabilidad del hormigón en la práctica.

Como se presenta más adelante, las reacciones de lixiviación cobran importancia en una de las principales aplicaciones de los hormigones coloreados, los bloques y adoquines. Esto es así debido a que estos hormigones tienen una baja compacidad, manifestándose a través de la presencia de eflorescencias, con manchas blancas que si bien disminuyen con el tiempo, causan problemas de orden estético durante los primeros meses de vida de la obra.

Los factores extrínsecos que pueden afectar la durabilidad del hormigón son aquellos a los que está expuesto el material y que pueden producir daños de distinta consideración.

CARVALHO (2000) considera las variaciones de color y textura superficial en función de distintas condiciones de exposición de los hormigones coloreados. Con respecto a las variaciones de color hace referencia al grado de presencia de eflorescencias, ensuciamiento y variaciones de los parámetros cromáticos, siendo en este último aspecto, más sensibles los hormigones coloreados.

En los Comentarios del Proyecto de Reglamento CIRSOC 201 (2002), se incorpora el concepto de prestaciones para el hormigón donde se menciona que las disposiciones tomadas en el diseño de la estructura no son suficientes para asegurar la vida útil en servicio de la estructura. Se debe completar con una correcta elección de los materiales, la elaboración y puesta en obra del hormigón y el curado de la estructura construida, por su influencia en los mecanismos de degradación del hormigón. Por ello se considera al medio ambiente como una acción sobre la estructura y debe ser identificado para luego establecer los criterios de protección correspondientes.

En la propuesta del Proyecto de Reglamento CIRSOC 201 (2002) se presentan los requisitos de durabilidad a cumplir por los hormigones, en función del tipo de exposición de la estructura (factor extrínseco), donde se establecen las relaciones  $a/c$  máxima y los valores de resistencia a compresión mínimas (factores intrínsecos).

Las clases de exposición generales que producen corrosión de armaduras se presentan en la Tabla 2.1 reproducida parcialmente del Proyecto de Reglamento.

**Tabla 2.1 Clases de exposición generales que producen corrosión de armaduras (adaptado del Proyecto de Reglamento CIRSOC 201, 2002)**

Designación.	Clase	Subclase	Tipo de proceso
A1	No agresiva		Ninguno
A2	Ambiente normal	Temperatura moderada y fría, sin congelación. Humedad alta y media o con ciclos de mojado y secado	Corrosión por carbonatación
A3	Climas tropical y subtropical		Corrosión por carbonatación
M1	Húmedo o sumergido con cloruros de origen diferente del medio marino		Corrosión por cloruros
A3	Marino	Al aire	Corrosión por cloruros
M1		Al aire	Corrosión por cloruros
		Sumergidos	Corrosión por cloruros
M2		Sumergidos mas fondo que 3 m	No hay corrosión importante

En cuanto a las clases específicas de exposición que pueden producir degradación distinta de la corrosión de armaduras se presentan en la Tabla 2.2.

**Tabla 2.2 Clases específicas de exposición que pueden producir degradación distinta de la corrosión de armaduras (adaptado del Proyecto de Reglamento CIRSOC 201, 2002)**

Designación	Clase	Subclase	Tipo de proceso
C1	Congelación y deshielo	Sin sales descongelantes	Ataque por congelación y deshielo
C2		Con sales descongelantes	Ataque por congelación y deshielo y por sales descongelantes
Q1	Ambientes con agresividad química	Moderado	Ataque químico
Q2		Fuerte	
Q3		Muy fuerte	

Los factores de degradación son los factores externos que pueden afectar el desempeño del hormigón coloreado, como por ejemplo los factores que intervienen en la exposición a la intemperie, los biológicos, aquellos factores

producidos por tensiones o por el uso; una clasificación de estos factores, propuesta por ASTM, se presenta en la Tabla 2.3.

**Tabla 2.3 Clasificación de los factores de degradación y definición de las características más importantes (ASTM E 632)**

Factor de degradación	Características
de resistencia	son factores en los que la degradación se produce por el resultado de la aplicación de cargas periódicas o sostenidas.
de uso	son factores en los que la degradación resulta del diseño del sistema, instalación y procedimientos de mantenimiento y uso abusivo.
de exposición a la intemperie o desintegración por acción de la atmósfera	son los factores de degradación asociados con la exposición natural, incluyendo radiación, temperatura, lluvia y otras formas de agua, congelamiento y deshielo, constituyentes normales de aire, contaminantes del aire y del viento.
de degradación biológica	son factores directamente asociados con organismos vivos, incluyendo microorganismos, hongos y bacterias.

Es importante conocer como actúan estos factores aisladamente o en conjunto para poder simular en el laboratorio su acción sobre el hormigón coloreado ya sea a través de métodos de ensayo existentes, para mejorar los métodos existentes o para desarrollar métodos nuevos.

Ya se presentaron en las secciones anteriores las diversas aplicaciones que tiene el hormigón coloreado en productos con funciones muy distintas como por ejemplo la impermeabilización de un techado en tejas, la provisión de una superficie resistente al desgaste en la capa de rodamiento de un pavimento o la capacidad resistente de un elemento estructural de un edificio. Estas funciones hacen que las decisiones con respecto los requisitos, criterios y propiedades impliquen evaluar “el material de construcción” más que “la materia” en sí misma.

### 2.3 Mecanismos de transporte de agentes agresivos

La relación que existe entre la porosidad y la durabilidad se refleja en prácticamente todos los reglamentos y códigos. Por lo general se indica que para obtener una adecuada durabilidad frente a distintas condiciones de exposición, es condición necesaria pero no suficiente que la relación agua cemento sea menor que cierto valor indicativo. Podría decirse entonces que la porosidad es un parámetro condicionante de primer orden para asegurar la durabilidad del hormigón (FERNÁNDEZ LUCO, 2001). La porosidad del hormigón es una red de poros, canales y capilares, no siempre comunicados entre sí, que permiten que el hormigón presente permeabilidad a los líquidos y a los gases (ANDRADE, 1992; KUMAR y BHATTACHARJEE, 2002).

BUENFELD (2000) destaca en un resumen los casos más relevantes de transferencia de fluidos en el hormigón relacionados con la exposición del hormigón, que se presenta en la Tabla 2.4. El caso más interesante de mecanismo compuesto o acoplado es el de “efecto mecha”, que ocurre cuando una cara del hormigón está siempre saturada y la otra cara está al aire, sufriendo un proceso de secado por evaporación. El transporte se realiza por un efecto combinado de penetración de agua bajo presión, absorción capilar y vaporización del agua en los poros del hormigón.

**Tabla 2.4 Transferencia de fluido y procesos de transporte en el hormigón BUENFELD (2000)**

Proceso en el hormigón	Exposición del hormigón	Proceso de transporte
Penetración de sustancias disueltas en agua	Saturado	Difusión iónica
	Bajo carga hidrostática	Movimiento de agua intersticial. Permeabilidad
	Cara saturada / cara al aire	Efecto mecha
	Mojado y secado	Absorción capilar
Penetración de agua	Bajo carga hidrostática	Movimiento de agua intersticial. Permeabilidad
	Cara saturada/cara al aire	Efecto mecha
	Cara al aire (húmedo) y cara al aire (seco)	Difusión de vapor
Carbonatación	Dióxido de carbono	Difusión + carbonatación

Según NEVILLE (1997) lo que determina cuál es el mecanismo de transporte dominante en el hormigón es la configuración de poros (tipo y distribución del tamaño de los poros o microfisuras) y el porcentaje en que están llenos con agua, junto con las microfisuras en la matriz de la pasta de cemento hidratada y la interface pasta-agregado (FIB BULLETINS, 1999). FERNANDEZ LUCO (2001) destaca que es evidente que dos materiales con idéntica porosidad pero con distinta conectividad entre los poros se comportarán en forma diferente en lo que respecta a impedir el ingreso de agentes agresivos, siendo el material con poros interconectados más susceptible.

Muchos investigadores como GARBOCZI (1990), HELENE (1993), FREY y otros (1994), MACDONALD y otros (1995), NEVILLE (1997), JONES y otros (1997), OLLIVIER (1998), FERNÁNDEZ LUCO (2001), IRASSAR (2001), señalan que tanto la difusividad, determinada por las leyes de Fick y la permeabilidad, medida por la Ley de Darcy, no representan la realidad ya que se considera a los poros de la materia analizada como poros continuos.

NEVILLE (1997) distingue tres mecanismos de entrada y circulación de fluidos a través del hormigón:

- ✓ Penetración de agua bajo presión: se refiere al escurrimiento del agua bajo una presión diferencial.
- ✓ Succión capilar: es el resultado de movimientos capilares en los poros del hormigón abiertos al medio ambiente.
- ✓ Difusión: proceso en el cual un fluido se transporta por efecto de una diferencia de concentración.

Además de estos tres mecanismos, el FIB BULLETINS (1999) cita la migración, que es el efecto de un campo eléctrico que puede ser oriundo de la deflagración de pilas de corrosión electroquímicas o de una diferencia de potencial generada por una fuente externa (HELENE, 1993).

### 2.3.1 Penetración de agua bajo presión

Según METHA y MONTEIRO (1994), la penetración del agua bajo presión puede ser definida como la facilidad con que un fluido puede escurrir a través de un sólido, bajo un gradiente de presión externa, siendo determinada por la continuidad y tamaño de los poros presentes en la estructura del sólido. FERNANDEZ LUCO (2001) destaca que el gradiente de presión puede ser causado por una diferencia de presiones hidrostáticas (caso de una presa), por efecto de tensiones capilares (ascenso capilar y secado parcial) u otras situaciones equivalentes.

De acuerdo con HOFFMANN (2001) la permeabilidad depende de factores tales como:

- ✓ Presión ejercida
- ✓ Geometría de los vacíos
- ✓ Viscosidad del líquido
- ✓ Espesor del material
- ✓ Presencia de aire en los poros
- ✓ Edad

PEREIRA (2001), citando a RASHEDUZZAFAR (1992), destaca que los principales factores que determinan la formación de la estructura de poros del hormigón, que tiene influencia en la facilidad con que los fluidos, líquidos o gases penetran y se transportan en el hormigón, son:

- ✓ Tipo de cemento
- ✓ Relación agua/cemento
- ✓ Grado de hidratación
- ✓ Tenor y tipo de adición
- ✓ Presencia de microfisuras o fisuras

Con respecto al grado de hidratación y su relación con la fracción de poros conectados que permite el transporte de fluidos en el hormigón, ROSELL y

VÀZQUEZ (2000), citan que BENTZ y GARBOCZI un una simulación por computación muestran la existencia de un “umbral”, que define el punto en que la estructura de capilares deja de ser continua. Según estos autores, si la continuidad de poros se pierde para un valor crítico de la hidratación, el parámetro “fracción conectada “ tiende a cero. Este umbral existe para todas las relaciones agua/cemento menores que 0,6. Por encima de este valor resulta imposible encontrar este umbral y el sistema de capilares no perderá nunca la conexión, concordando con los trabajos experimentales de POWERS (1959).

METHA Y MONTEIRO (1994) señalan que no hay proporcionalidad entre la disminución de la porosidad con el proceso de hidratación del cemento; indican que cuando la relación agua/cemento es alta y el grado de hidratación es bajo, la pasta de cemento tendrá alta porosidad capilar, contendrá un número relativamente elevado de poros grandes y bien conectados, por lo que el coeficiente de penetración de agua bajo presión será alto. Sin embargo, a medida que progrese la hidratación, los poros reducirán su tamaño perdiendo también su conexión.

CARVALHO y CALAVERA (2002) investigaron la influencia del tipo de cemento (blanco y gris), la relación agua/cemento y la incorporación de pigmentos al hormigón. Los valores obtenidos con relación a la permeabilidad indican que el hormigón elaborado con cemento blanco es más permeable que el fabricado con cemento gris y que la adición de pigmentos no resulta desfavorable, salvo en el caso del pigmento amarillo incorporado al hormigón con cemento blanco.

### 2.3.2 Succión capilar

Dadas las características del sistema de poros de la estructura de la pasta de cemento endurecida, los fenómenos capilares tienen una influencia significativa en los mecanismos de transporte. Según FERNÁNDEZ LUCO (2001), cuando el transporte de líquidos en sólidos porosos se debe a la tensión superficial que actúa en los capilares, el transporte de líquido está influenciado por:

- ✓ Las características del líquido: viscosidad, densidad y tensión superficial.

---

✓ Las características del sólido poroso: estructura de poros, energía superficial.

De hecho, la absorción capilar es el mecanismo de transferencia de líquidos más rápido y la determinación de la capacidad de absorción capilar constituye una herramienta confiable para caracterizar la estructura de poros en forma comparativa (FERNANDEZ LUCO, 2001).

HELENE (1993) diferencia el mecanismo de transporte por succión capilar del mecanismo de penetración de agua bajo presión. El primero puede ser medido a través de la absorción capilar que según HELENE (1993) es la propiedad medida cuando el proceso de transporte actuante es el de penetración de agua bajo la acción de la presión atmosférica normal: la ocupación de los vacíos ocurre sin estímulo de un gradiente de presión aplicado. Por lo tanto, la succión capilar medida por la absorción capilar, es una propiedad de los materiales no saturados, situación en la que se encuentra el hormigón en muchas de las estructuras comunes.

Cuanto menor es el diámetro de los poros capilares, mayores son las presiones capilares y consecuentemente, mayor es la altura de ascensión capilar. Por otro lado, cuanto mayor es el diámetro de los capilares, menor será la ascensión capilar por lo que la cantidad de agua absorbida será mayor por unidad de área. Para HELENE (1993) la absorción capilar del hormigón es uno de los factores más difíciles de ser controlados.

Según NEVILLE (1997) el tamaño de los poros varía a lo largo del tiempo en función del grado de hidratación, por lo que la absorción capilar también variará con el tiempo.

La succión capilar de agua en el hormigón está directamente relacionada con la porosidad, que a su vez está originada por el exceso de agua utilizada en la mezcla en estado fresco para conseguir la plasticidad adecuada a los métodos de compactación y a geometría de la pieza (ROSELL y VÁZQUEZ, 2000).

### 2.3.3 Difusión

Por difusión se designa el proceso de transporte de un constituyente dentro de un medio cualquiera bajo el efecto de su agitación aleatoria a escala molecular. FERNÁNDEZ LUCO (2001) explica que cuando existe una diferencia de concentración entre dos puntos del medio, aparece una “resultante” del movimiento aleatorio que genera un transporte global del constituyente considerado, desde la zona con mayor concentración hacia la zona de menor concentración.

Los transportes por difusión pueden ocurrir en fase líquida o en fase gaseosa. El primero involucra el transporte de sustancias en solución en la fase acuosa intersticial y son ejemplos de este caso el ataque por agua de mar o por ácido carbónico de un suelo rico en materia orgánica.

El transporte de gases en los hormigones se produce en general por difusión en el aire contenido en los poros y fisuras del material. La difusión en fase gaseosa involucra al proceso de desecación del hormigón ya parcialmente seco (transferencia de vapor de agua, así como a la penetración de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y oxígeno ( $\text{O}_2$ )). NEVILLE (1997) destaca que la difusión de estos gases es de gran interés debido a que el primero lleva a la carbonatación de la pasta de cemento y el segundo hace posible la corrosión de las armaduras.

Al contrario de los mecanismos anteriores, la difusión, no depende del flujo de fluidos (SILVA FILHO, 1994). Cuando el gradiente se mantiene a través de la entrada y salida continua de la sustancia en el sentido del extremo de mayor concentración al de menor, se obtiene un flujo continuo también llamado estacionario.

Según ATKINSON y NICKERSON (1984), el efecto de la tortuosidad de la estructura capilar, con existencia de poros relativamente grandes, aislados entre sí pero interconectados por poros muy finos (del orden del nanómetro) retarda fuertemente los fenómenos difusivos.

## 2.4 Fenómenos de degradación de la superficie

Los fenómenos de degradación de la superficie son complejos y se interrelacionan entre sí. La Tabla 2.5, adaptada del Manual de la Red Rehabilitar de CYTED (2003), reúne los principales mecanismos de degradación de las superficies de hormigón. En una de sus columnas se destaca cómo las consecuencias inherentes al proceso de degradación producen alteraciones en el color y manchas en la superficie del hormigón, efectos que cobran importancia en el hormigón coloreado.

Estos mecanismos de degradación, salvo el producido por hongos y moho, pueden ser provocados por ensayos de envejecimiento acelerado, a los que se podría incorporar el mecanismo de degradación del color por efecto de la radiación solar, temperatura y agua, en el caso del hormigón coloreado; con relación a este tema la investigación es escasa.

**Tabla 2.5 Principales mecanismos de deterioro de las superficies de hormigón. (Manual de la Red Rehabilitar de CYTED, 2003)**

Mecanismos de degradación			
Agresividad		Consecuencias inherentes al proceso	
Naturaleza del proceso	Condiciones particulares	Alteraciones de color/ manchas	Alteraciones físico-químicas
Carbonatación	HR 60% a 85%	En general más clara	Reducción del pH Corrosión del acero Fisuración superficial
Lixiviación	Atmósfera ácida, aguas blandas	Oscurece con manchas blancas de eflorescencias	Reducción del pH Corrosión del acero Disgregación superficial
Contracción	Mojado/ secado Ausencia de curado	Manchas y fisuras	Fisuración Reducción del pH Corrosión del acero
Moho	Atmósferas urbanas e industriales	Manchas oscuras	Reducción del pH Corrosión del acero
Hongos	Zonas húmedas y salinas	Manchas oscuras y verdosas	Reducción del pH Corrosión del acero Disgregación superficial
Concentración salina	Atmósfera marina e industrial	Blanquecino	Despasivación del acero Disgregación superficial

### 2.4.1 Fisuración y abrasión

Las condiciones de fisuración del hormigón, habitualmente limitadas por condiciones de durabilidad, pueden requerir un control más estricto por condiciones estéticas.

CALAVERA RUIZ (1996) presenta un gráfico procedente de los trabajos de CAMPBELL-ALLEN (1979), que se reproduce como Fig. 2.4, en la que vincula el ancho de fisuras aceptables desde el punto de vista estético con la distancia a la que se puede situar el observador y lo que denomina el nivel de prestigio de la estructura.

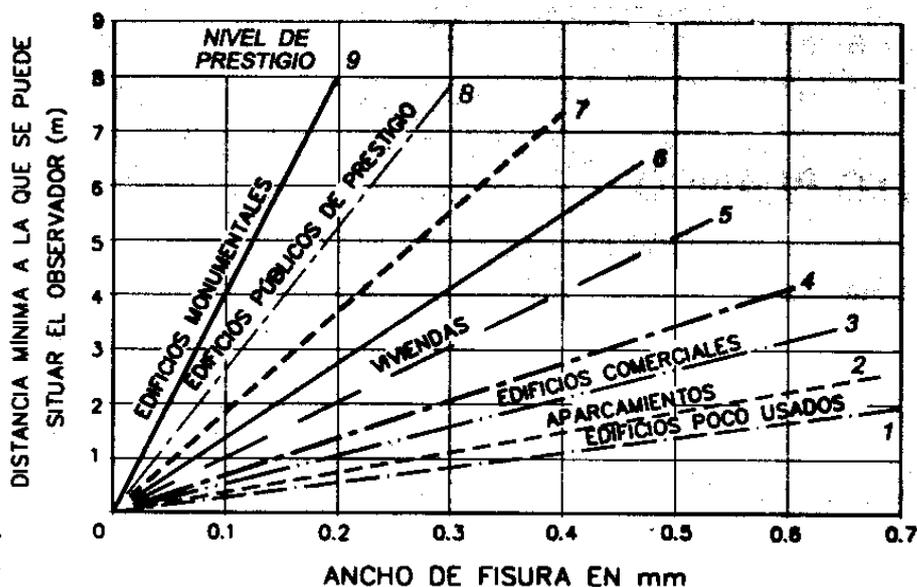


Figura 2.4 Ancho de fisura aceptables desde el punto de vista estético (CALAVERA RUIZ, 1996)

Este requisito define un criterio más exigente por ejemplo para edificios monumentales que para viviendas o edificios comerciales, ya que para un observador situado a 2 m de la estructura, el ancho de fisura aceptable será aproximadamente de 0.05, 0.3 y 0.4 mm respectivamente.

Con respecto a otro tipo de sollicitación vinculada a la degradación de la superficie, el desgaste superficial del hormigón se puede producir por abrasión (tema que es tratado en la Guía para hormigón durable, Capítulo 3 del ACI 201), erosión o cavitación. Por ejemplo el deslizamiento o rozamiento puede causar desgaste por abrasión, en el caso de estructuras hidráulicas la acción de sólidos

abrasivos llevados por el agua generalmente conduce a la erosión del hormigón y en aliviaderos de presas o estructuras hidráulicas la cavitación se relaciona con grandes fallas y pérdida de material. Estos últimos temas en obras hidráulicas se estudian en detalle en el Comité 210 del ACI.

En obras construidas con hormigones comunes o coloreados, por ejemplo con adoquines, en pisos industriales o pavimentos, las acciones asociadas a esfuerzos que provocan el desgaste de la superficie expuesta del hormigón se pueden agrupar como fenómenos de abrasión y desgaste, aunque más específicamente se considera abrasión cuando hay una acción mecánica por arrastre de sólidos sobre la superficie.

La resistencia al desgaste está asociada a la resistencia intrínseca del hormigón y los daños que se producen en las estructuras pueden variar desde lesiones estéticas, leves, hasta la desagregación del agregado y la pasta de cemento, con la exposición de la armadura, cuando el hormigón es armado (MANUAL RED REHABILITAR, 2003).

NEVILLE (1997) destaca que el hormigón que exuda poco tiene una capa superficial más fuerte y por lo tanto es más resistente a la abrasión; presenta varios métodos de ensayo y afirma que debido a las condiciones arbitrarias de los mismos no es posible comparar cuantitativamente los valores obtenidos, pero en todos los casos la resistencia a la abrasión es proporcional a la relación agua / cemento, coincidiendo con LIU (1994) quien encontró una buena correlación entre ese parámetro y la resistencia del hormigón a la abrasión.

En algunos casos la abrasión no tiene relevancia estructural, pero la producción del polvo resultante puede ser objetada para determinadas condiciones de servicio como en el caso de pisos de ciertas instalaciones industriales o por la pérdida de planicidad y máxima rugosidad requeridas para el uso de equipos especiales.

Por todas estas razones es deseable conocer la resistencia del hormigón a la abrasión. Sin embargo esto es difícil de evaluar ya que la acción perjudicial

varía, dependiendo de la causa de deterioro y prácticamente no hay un procedimiento de ensayo que sea satisfactorio para cuantificar la resistencia del hormigón en esas condiciones de uso, si bien la norma ASTM C 779 describe métodos opcionales.

GUTIERREZ (2004) presenta un interesante estudio, realizado en Uruguay, para definir nuevas condiciones normativas del ensayo de desgaste para adoquines de hormigón, basado en el ensayo de desgaste Dorry. Expresa que se trata de un ensayo lento y de alto costo, presentando un análisis de la influencia de los siguientes parámetros de ensayo:

- ✓ presión normal
- ✓ longitud de recorrido de desgaste
- ✓ uso o no de agua, tipo de arena
- ✓ valores de desgaste límite admisible.

Este autor realiza algunas consideraciones, luego de ensayar 884 probetas:

- ✓ la magnitud del desgaste es independiente de la presión ejercida sobre la probeta
- ✓ el desgaste aumenta en forma lineal con la distancia recorrida
- ✓ el agua aumenta el desgaste, haciendo también más sucio el ensayo.

CARVALHO (2000) citando a SZADKOWSKI, destaca que el color del hormigón puede cambiar debido a la erosión de la matriz de pasta cementicia; la erosión puede ser provocada por distintas causas, tales como el agua, el viento, la contaminación ácida, el rozamiento, sin embargo, tiene siempre el mismo efecto: la desaparición de la capa de finos superficiales, volviendo visible el árido empleado. Como consecuencia, el color final del hormigón resulta ser una combinación óptica de los puntos de áridos y el fondo que permanece. Sin embargo, en la bibliografía consultada no se han encontrado estudios referidos al análisis y medición de los cambios de color por desgaste del hormigón.

### 2.4.2 Lixiviación y Eflorescencia

La lixiviación es un proceso por el cual el agua blanda o pura en contacto con el hormigón o la pasta de cemento tiende a descomponer o hidrolizar los productos de hidratación de base cálcica, ya que su solubilidad es relativamente alta en este medio. El agua es considerada blanda o pura cuando contiene una muy baja proporción de sales disueltas en su composición (IRASSAR, 2001).

HELENE (2000) considera a la lixiviación como uno de los mecanismos preponderantes y frecuentes de envejecimiento y deterioro del hormigón. La sintomatología básica se presenta como eflorescencias de carbonato, pudiendo llegar a manifestar una superficie arenosa o con áridos expuestos sin la pasta superficial, lo cual representa un inconveniente importante para la estética del hormigón, más aún en el hormigón coloreado.

IRASSAR (2001) informa que el mecanismo de degradación por lixiviación puede modelarse teniendo en cuenta que el principal ion que lixivia es el calcio,  $\text{Ca}^{+2}$ , que proviene de la disolución del hidróxido de calcio (CH) y luego de la descomposición del silicato de calcio hidratado (C-S-H). Por este motivo la velocidad de degradación es determinada por la tasa de disolución y el movimiento del  $\text{Ca}^{+2}$  dentro del hormigón.

El incremento de la relación agua/cemento, que produce un aumento de la porosidad y conectividad de la estructura de poros, afecta considerablemente la vulnerabilidad del hormigón frente al ataque de aguas puras. BICZOK (1972) presenta interesantes resultados de investigaciones mostrando, inclusive, la pérdida de resistencia de pastas de cemento Pórtland por la lixiviación.

Más allá de la pérdida de resistencia, la lixiviación del hidróxido de calcio del hormigón representa un gran problema estético para los hormigones, especialmente cuando se trata de hormigones arquitectónicos y más aún en hormigones coloreados, dependiendo justamente del color y su contraste con la eflorescencia.

Frecuentemente el producto lixiviado reacciona con el dióxido de carbono del aire precipitando carbonato de calcio insoluble en la superficie: este fenómeno es conocido como eflorescencia (DAL MOLIN, 2000). Este proceso puede repetirse en sucesivas absorciones y posteriores migraciones de agua a la superficie, como por ejemplo, debido a la lluvia.

Con el paso del tiempo el carbonato cálcico formado sigue combinándose con el dióxido de carbono transformándose en bicarbonato cálcico, el cual sí es soluble, desapareciendo normalmente con el agua de lluvia. KRESSE (1990) estudió el proceso de desaparición de las eflorescencias mostrando que puede durar entre 1 y 2 años, dependiendo de las características del hormigón y de las características climáticas de la zona a la que está expuesto el hormigón.

CARVALHO (2000) a partir de los datos experimentales obtenidos en el desarrollo de su trabajo de investigación en hormigones con pigmentos y del análisis de los resultados presentados, afirma que la reducción de la saturación de color parece estar originada, a cortas edades, por la formación abundante de eflorescencias, y a largo plazo por procesos asociados a la carbonatación del hormigón.

### **2.4.3 Carbonatación**

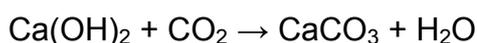
Según HELENE (1993) la elevada alcalinidad del hormigón se debe fundamentalmente a las reacciones de los compuestos principales del cemento, los silicatos de calcio, el silicato tricálcico ( $C_3S$ ) y el silicato dicálcico ( $C_2S$ ), que liberan cierto porcentaje de hidróxido de calcio. La cantidad total de hidróxido de calcio, para pastas totalmente hidratadas, puede alcanzar 25% de la masa de cemento utilizada en la dosificación del hormigón. También la alcalinidad del hormigón es debida a la presencia de hidróxidos disueltos en la fase acuosa o precipitados como el hidróxido de calcio,  $Ca(OH)_2$ , el hidróxido de sodio,  $NaOH$  y el hidróxido de potasio,  $KOH$ . Se debe considerar que el  $Ca(OH)_2$  es menos soluble que los otros álcalis y se encuentra en forma de cristales mientras que los otros están disueltos en forma de iones. La solubilidad del  $Ca(OH)_2$  depende de la

concentración de  $\text{OH}^-$  en la solución intersticial. Así la carbonatación comienza por los álcalis de sodio y potasio siguiendo por hidróxido de calcio.

La carbonatación ocurre en tres estados:

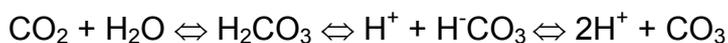
- ✓ Difusión de anhídrido carbónico (gas carbónico),  $\text{CO}_2$  en los pequeños poros capilares intercomunicados.
- ✓ Disolución del  $\text{CO}_2$  en la película de agua
- ✓ Neutralización del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  por el gas carbónico

De esta forma, las principales reacciones de carbonatación en el hormigón por la conversión del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y del óxido de calcio,  $\text{CaO}$  del silicato de calcio hidratado del cemento en carbonato de calcio, tal como se presenta en las ecuaciones 2.1 y 2.2.



**Ecuación 2.1**

Para que esta reacción ocurra naturalmente es necesario que el anhídrido carbónico sea solubilizado según se presenta en la ecuación 2.2 (KAZMIERCZAK, 1995).

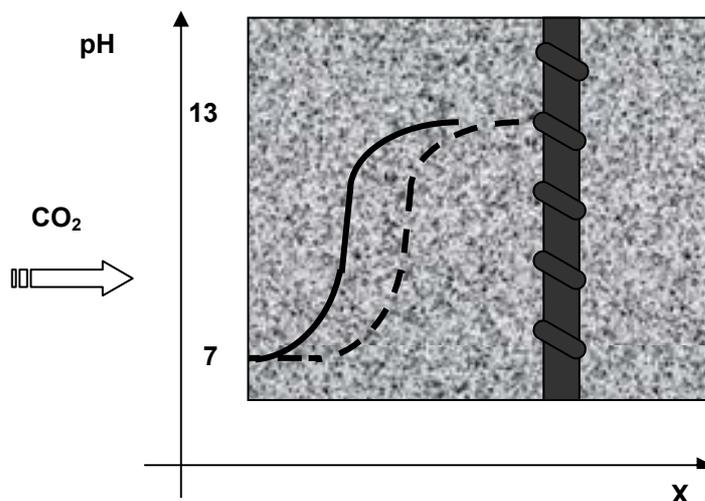


**Ecuación 2.2**

La carbonatación es relativamente lenta, según SATO (1998) y provoca una serie de alteraciones en la pasta endurecida, alterando su estructura y reduciendo su porosidad. El carbonato de calcio hidratado contribuye para obstruir los poros disminuyendo principalmente los poros menores, alterando menos los poros de mayores dimensiones. Así, la carbonatación reduce la difusividad y la permeabilidad, siendo su efecto mayor en los materiales de menor relación agua/cemento.

Según KAZMIERCZAK y LINDENMEYER (1996) la reacción comienza en las capas superficiales y avanza progresivamente para el interior del hormigón. Una característica del proceso de carbonatación es la existencia de un frente de avance del proceso que presenta dos zonas de pH muy diferentes: una con pH próximo a 8 y otra con pH mayor que 12, no carbonatada (HELENE, 1993), tal

como se presenta en la Fig. 2.5, adaptada del Manual de Inspección y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado, CYTED (1998).



**Figura 2.5 Variación de pH en el hormigón debido a la carbonatación. Manual de Inspección y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado, CYTED (1998)**

Si la estructura de hormigón está armada, cuando la reacción alcanza la armadura, ocurre la despasivación de la misma como consecuencia de la disminución del pH, existiendo posibilidades de corrosión. El tiempo que lleva esa reacción para alcanzar la superficie de la armadura, despasivándola, depende de varios factores. Algunos autores como HOUST y WITTMANN (2002) y JOHN y TUDISCO (1993), entre otros, consideran entre los más importantes:

- ✓ Espesor de recubrimiento de la armadura
- ✓ Composición química del cemento
- ✓ Consumo de cemento por metro cúbico de hormigón
- ✓ Composición del hormigón
- ✓ Compactación del hormigón
- ✓ Condiciones de curado
- ✓ Condiciones ambientales

CARVALHO (2000) investigó la influencia del tipo de cemento (blanco y gris), la relación agua/cemento y la incorporación de pigmentos al hormigón. Este autor considera que el empleo de uno u otro cemento no afecta significativamente la profundidad de carbonatación; con respecto a la incorporación de pigmentos, indica que lleva asociado un ligero incremento en la profundidad de

---

carbonatación, pero únicamente cuando son adicionados al hormigón con cemento blanco, siendo el pigmento amarillo el que produce mayor aumento de la profundidad de carbonatación.

#### **2.4.4 Envejecimiento del color**

Según LOZANO (1978) muchas veces no sólo interesan las propiedades cromáticas de un material, sino también la permanencia de las mismas cuando el material es expuesto a la acción deterioradora de la radiación solar y los agentes climáticos: o sea que uno de los resultados de la acción de la intemperie puede ser la decoloración del color o pérdida de la solidez del color. Desde el punto de vista de los ensayos de resistencia a la decoloración existen diversos aparatos que tratan de simular el proceso de exposición de los materiales a la intemperie, tema que se desarrolla en la Sección 2.5 de esta tesis.

CARVALHO (2002) destaca que el envejecimiento del color en el hormigón coloreado frente a diversas condiciones de exposición lleva asociado un aumento de la luminosidad del hormigón, dando tonos más pálidos y una reducción de la saturación del color resultando tonos más apagados, posiblemente debido a edades tempranas a la presencia de eflorescencias y a largo plazo por procesos asociados a la carbonatación y lixiviación.

Según JOHN y TUDISCO (1993) los avances en la comprensión de la microestructura y composición química del hormigón y de sus mecanismos de degradación posibilitan proyectar las estructuras considerando no solamente la estabilidad estructural sino también la vida útil deseada frente a determinados factores de degradación. En el hormigón coloreado se torna imprescindible el desarrollo de investigaciones que esclarezcan la resistencia del color frente a la acción de la intemperie.

Los agentes provenientes de la atmósfera, tales como la radiación ultravioleta, la temperatura y la humedad actúan de forma sinérgica, potenciándose y produciendo un efecto mayor que la suma de los mismos agentes actuando individualmente y deben ser considerados cuando se analiza la

---

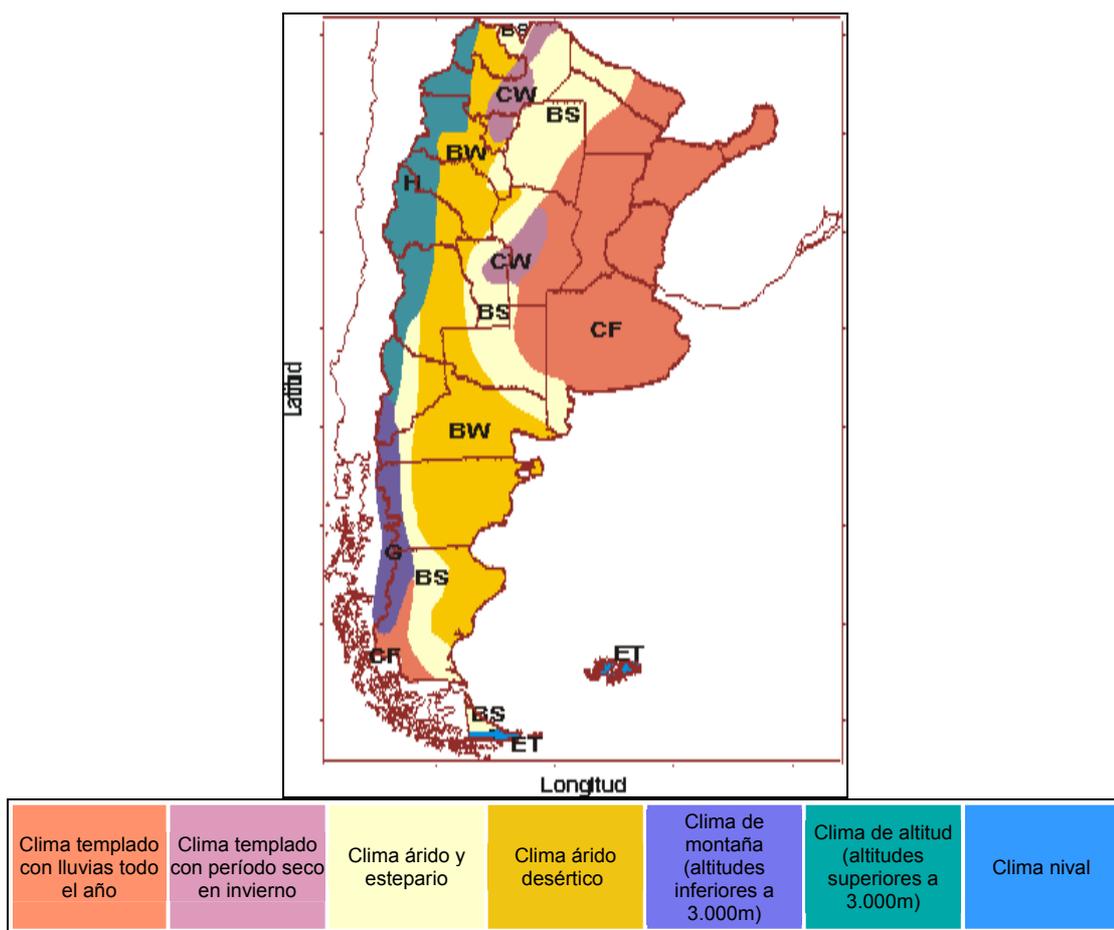
estabilidad del color. Sintéticamente se presentan a continuación algunos conceptos para la mejor comprensión del problema.

- ✓ La radiación solar, particularmente radiación ultravioleta (UV). La radiación solar comprende varias fajas de longitudes de onda. Las tres fajas de interés para el deterioro de materiales son: ultravioleta (200 a 300 nanómetros), visible (380 a 750 nanómetros) e infrarrojo (750 a 25.000 nanómetros). La distribución de su energía en el espectro solar, que alcanza la superficie de la Tierra es aproximadamente: 5 % de ultravioleta, 43 % de visible y 52 % de infrarrojo. La radiación con menor longitud de onda y con gran energía o sea la ultravioleta es la responsable del fotodeterioro de algunos materiales; la faja visible de infrarrojo puede ocasionar aumento de la temperatura en el material, originando un proceso de deterioro térmico. Hay que considerar también que la radiación solar varía su composición con la ubicación geográfica, la hora del día, la presencia de nubosidad y la polución ambiental.
- ✓ La temperatura, baja y elevada y los ciclos. El efecto de la temperatura puede ser tanto físico como químico y depende de los valores de la temperatura en la superficie y en el ambiente, del período en que se mantienen y de las variaciones cíclicas. La temperatura también influye en la velocidad de las reacciones.
- ✓ El agua, en estado líquido (lluvia, condensación), en estado gaseoso (vapor de agua, humedad relativa elevada), en estado sólido (congelamiento, hielo). El agua puede lixiviar el hidróxido de calcio del hormigón aumentando su permeabilidad, el riesgo de corrosión de armaduras y produciendo manchas blancas. Arrastrando partículas sólidas produce erosión en la superficie del hormigón, que se traducen en cambios de color.
- ✓ La polución ambiental, cuando la estructura está localizada en ambiente urbano, puede afectar el color debido a depósitos de polvo, suciedad, hollín que se deposita en la superficie del hormigón: en ciudades densamente pobladas la atmósfera contiene impurezas en forma de óxidos de azufre y lluvia ácida.
- ✓ El período de exposición durante el que actúan los agentes de deterioro; este es un factor importante que se debe definir para la duración de los ensayos acelerados.

Estas variables se encuentran presentes en la República Argentina en su extenso territorio, definiendo climas con considerables amplitudes térmicas, variaciones en los niveles de precipitación y condiciones de humedad; esto ejerce una gran influencia en los procesos de degradación de las obras de hormigón.

Según el SERVICIO METEOROLÓGICO DE LA FUERZA AREA ARGENTINA (2004), el clima es la síntesis de las condiciones meteorológicas en un lugar determinado, caracterizada por estadísticas a largo plazo (valores medios, varianzas, probabilidades de valores extremos, etc.) de los elementos meteorológicos en dicho lugar. El monitoreo del clima se realiza registrando las observaciones a largo plazo de las variables que describen el estado de la atmósfera y la superficie terrestre. Estas variables son los elementos climáticos, que son las propiedades o condiciones de la atmósfera que, tomadas en conjunto, definen el clima en un lugar determinado, por ejemplo, temperatura, humedad, precipitaciones. Los factores climáticos están determinados por condiciones físicas, que no sean los elementos climáticos, que influyen en el clima, como por ejemplo, la latitud, altura, distribución de la tierra y el mar, topografía, corrientes oceánicas, etc.

En la Fig. 2.6 se presenta un mapa de la República Argentina en el que se indican los climas presentes en el territorio nacional. Esta variedad de condiciones de exposición a las que pueden estar sometidas las estructuras de hormigón es un llamado de atención sobre la necesidad del conocimiento de las condiciones ambientales al estudiar la degradación del material, incluyendo la degradación del color.



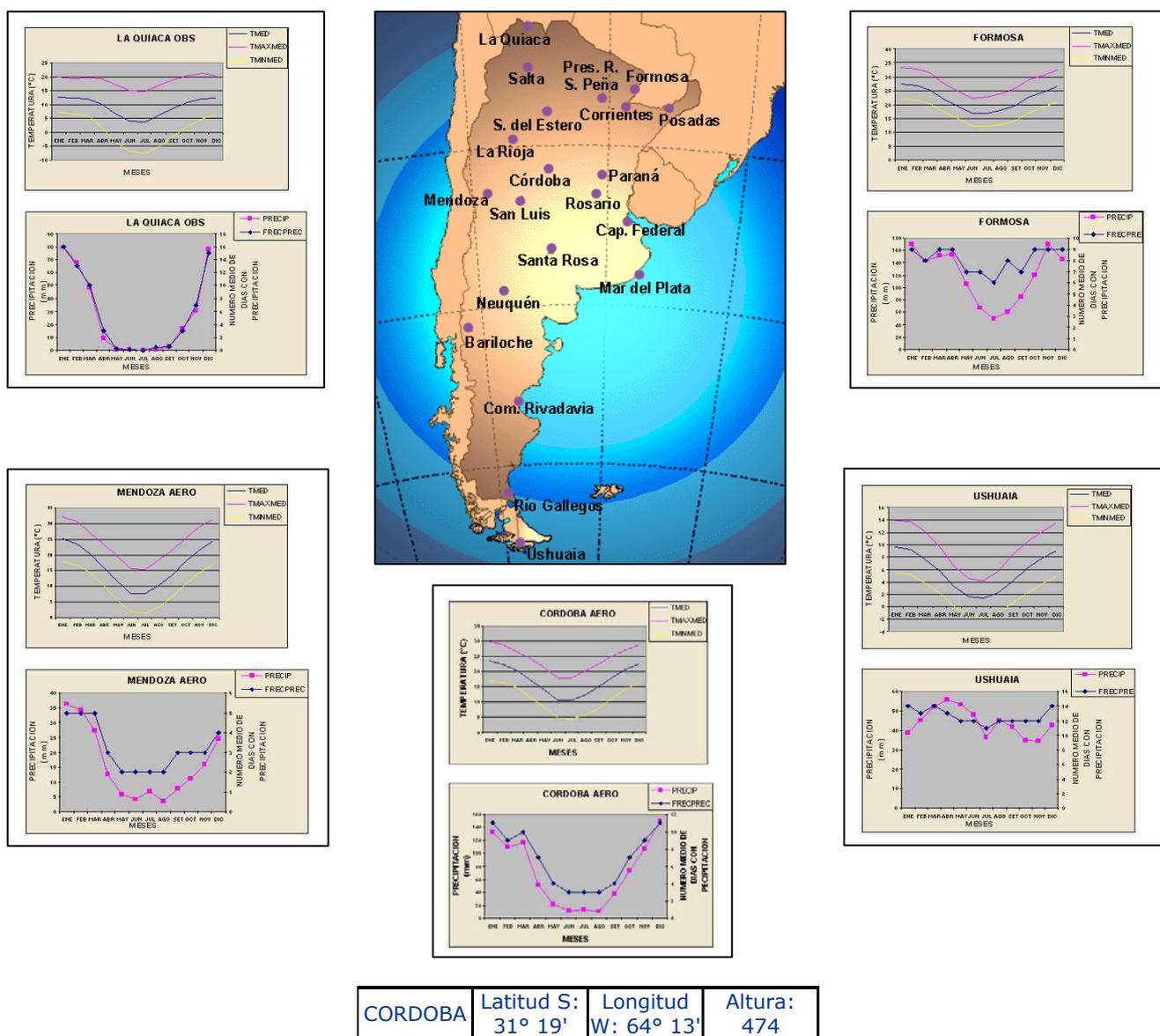
**Figura 2.6 Mapa de la República Argentina en el que se indican los climas presentes en el territorio nacional (Fuerza Aérea Argentina, Servicio Meteorológico Nacional, 2004)**

Las variaciones térmicas del ambiente, según LIMA Y MORELLI (2003), ejercen influencia importante en los procesos físicos y químicos de degradación de las estructuras de hormigón. ALMUSALLAM (2001) coincide y afirma que la temperatura del aire, la humedad relativa y la velocidad del viento afectan las propiedades tanto del hormigón fresco como del hormigón endurecido. Por ejemplo, la temperatura elevada y la baja humedad relativa aceleran la retracción plástica del hormigón. Debido al fenómeno de retracción, surgen tensiones que generan fisuras, las cuales degradan al hormigón, principalmente porque permiten la penetración del oxígeno y humedad en el material, dando origen a la corrosión de las armaduras, por ejemplo.

DAL MOLIN (1988) coincide también en que además de la temperatura ambiente, se debe considerar la acción del viento y la radiación solar que, en conjunto, tienen influencia en la variación de la temperatura en el interior del

hormigón. Sin embargo, según LENCIONI Y GEIMBA DE LIMA (2004) su influencia tiende a ser ignorada en las definiciones de los procesos de degradación.

En la Fig. 2. 7 se presenta un mapa de la República Argentina en el que se ubican algunas ciudades con los datos de valores normales de temperatura media mensual, máxima media mensual y mínima media mensual y valores normales de precipitación mensual y frecuencia mensual de días con precipitación mayor o igual a 0.1 mm para el período 1961-1990, datos proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional de la Fuerza Aérea Argentina.



**Figura 2.7 Valores normales de temperatura y de precipitación mensual para el período 1961-1990, en ciudades de la República Argentina (Fuerza Aérea Argentina, Servicio Meteorológico Nacional, 2004)**

En la bibliografía consultada no se registra mucha información sobre experiencias de correlación de resultados de ensayos de envejecimiento acelerado y exposición a la intemperie de muestras de hormigón coloreado con el objetivo de verificar como las condiciones ambientales y el clima a los cuales esa estructura está expuesta afectan su durabilidad, especialmente en lo que se refiere a degradación del color, señalando la necesidad de investigaciones en ese sentido.

## 2.5. Envejecimiento acelerado del color

Los ensayos acelerados contribuyen al conocimiento de los materiales, pero no siempre están normalizados. La Norma ASTM E 632 propone una metodología interesante de cómo evaluar la durabilidad con ensayos de desarrollo acelerado para la predicción de la vida útil de materiales y elementos de la construcción. En esta norma se discute lo dificultoso que resulta desarrollar métodos de envejecimiento acelerado para su uso en la predicción del desempeño a largo plazo por las siguientes razones:

- ✓ los mecanismos de degradación de los materiales de construcción son complejos y rara vez bien entendidos.
- ✓ los factores externos son numerosos y difíciles de cuantificar, de manera que existen algunos procedimientos que no incluyen todos los factores de importancia considerados en la exposición en servicio.
- ✓ los materiales son ensayados en condiciones diferentes de aquellas que se utilizan en servicio.

No obstante sus limitaciones, estos ensayos pueden ser utilizados para proporcionar información importante sobre cómo varía el color cuando el material es expuesto a ciertas condiciones establecidas de exposición a ultravioleta, agua y temperatura, acelerando los ciclos a los que está sometido el hormigón coloreado en la exposición natural a la acción de la intemperie.

En la Fig. 2.8 se presenta un esquema sintético de la metodología propuesta por la norma ASTM E 632 para evaluar el desempeño de los materiales.

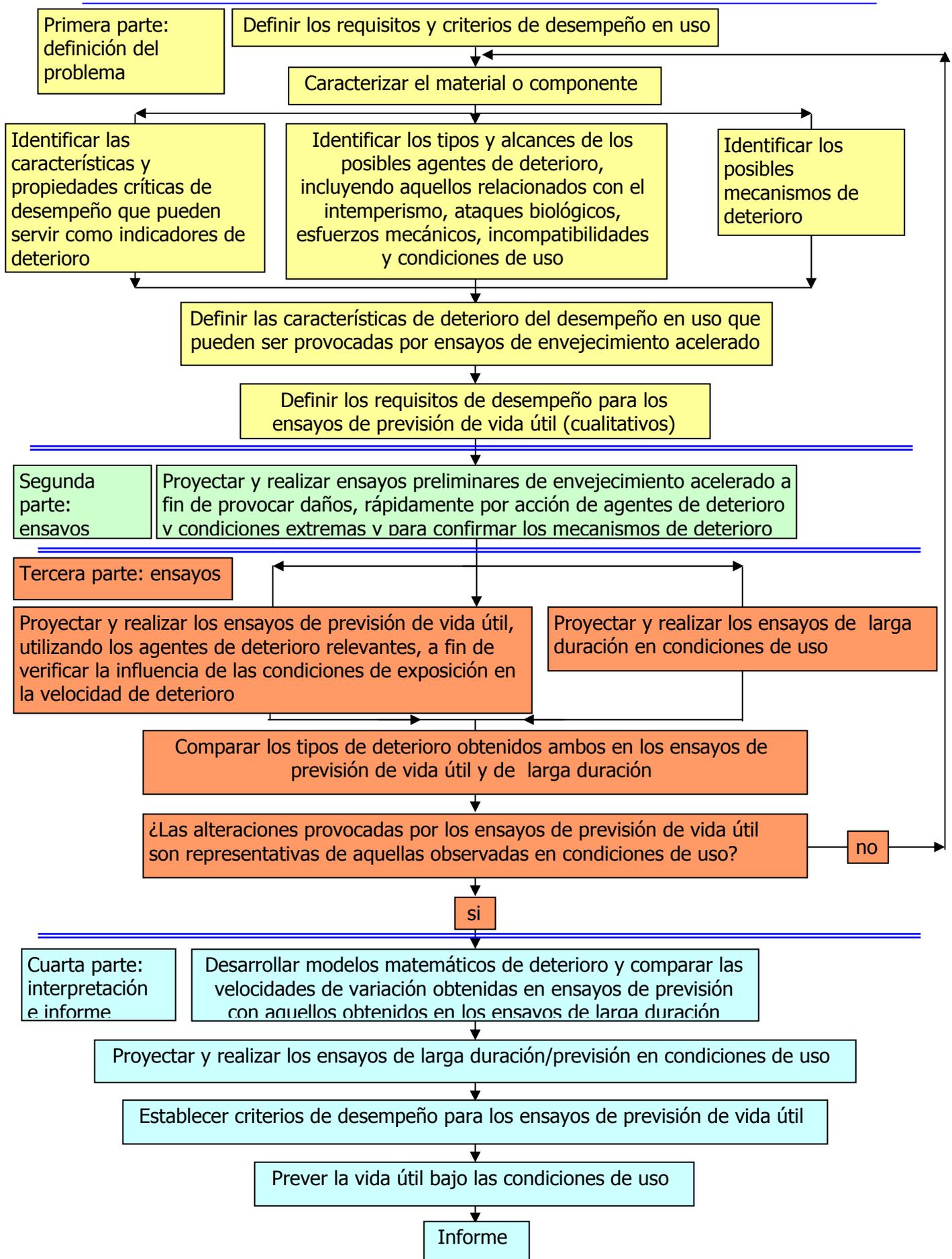


Figura 2.8 Metodología propuesta por ASTM E 632 (adaptado de ASTM E 632)

### 2.5.1 Métodos de medición y ensayo de características y propiedades

Con el objetivo de indicar distintos tipos de ensayos y la posibilidad de correlacionarlos, la norma ASTM E 632 propone una clasificación de los ensayos que se pueden realizar en los materiales, que se presenta en la Tabla 2.6.

**Tabla 2.6 Clasificación y definición de los tipos de ensayos a realizar en materiales (adaptado de ASTM E 632)**

Ensayo		Definición
En servicio		Es un ensayo en el que los elementos o materiales de construcción son expuestos a factores de degradación bajo condiciones de servicio.
De medición de propiedades		Es un ensayo para medición de una o más propiedades de materiales o elementos de construcción.
De envejecimiento	normal	Es un ensayo en el que los elementos de construcción o materiales son sometidos o expuestos a factores que se piensa que causan degradación.
	acelerado	Es un ensayo en el que la degradación de los elementos de construcción o materiales es intencionalmente acelerada por encima de lo esperado en servicio.
De predicción de la vida útil		Es un ensayo que combina un ensayo de medición de una propiedad y un ensayo de envejecimiento; permite predecir la vida útil o comparar las durabilidades relativas de materiales.

Los ensayos de medición de propiedades, como la resistencia a compresión, el módulo de elasticidad, la porosidad, la permeabilidad al agua, están normalizados y proporcionan datos para caracterizar al hormigón coloreado y establecer criterios de calificación para verificar los requisitos de resistencia y durabilidad.

Los ensayos de envejecimiento son aquellos en los cuales los elementos o materiales de construcción son sometidos o expuestos a factores que se piensa que causan degradación. Cuando la degradación es intencionalmente acelerada por encima de lo esperado en servicio, se denomina ensayo de envejecimiento acelerado; sus resultados son útiles cuando pueden relacionarse con los ensayos de envejecimiento naturales, tema que se desarrolla en la sección 2.5.2.

Por ejemplo, en lo que se refiere a durabilidad, las cámaras de carbonatación o niebla salina, se utilizan para realizar ensayos exponiendo al hormigón a factores intencionalmente acelerados por encima de lo esperado en servicio, acortando el tiempo de exposición; estos ensayos se podrían clasificar como ensayos de envejecimiento acelerado.

Desde el punto de vista de la realización de ensayos acelerados para estudiar la resistencia a la decoloración de los materiales existen equipos que intentan simular el proceso de exposición a la intemperie.

Algunos equipos están integrados por una cámara que simula los efectos de la intemperie, combinando varios factores de degradación: temperatura, luz y agua; estas cámaras pueden ser usadas para ensayar la durabilidad relativa de los materiales. En pocos días o semanas produce daños que podrían ocurrir en varios meses o años de exposición a la intemperie, dependiendo del material en estudio (Operating Manual Q-SUN Xenon Test Chamber, 1999).

Los efectos dañinos de la luz del sol pueden ser simulados usando lámparas de xenón o de arco de carbón y la lluvia y el rocío son simulados utilizando un sistema de spray de agua opcional. La secuencia de períodos de luz, oscuridad y spray se controla automáticamente.

Una de las dificultades está en no “acelerar” demasiado el proceso de manera que no se produzcan cambios en el mecanismo de deterioro y en la posibilidad de vincular los resultados con la exposición ambiental natural.

Otro aspecto interesante es que relacionando los datos proporcionados por ensayos de envejecimiento acelerado o natural y ensayos de propiedades, que podrían denominarse ensayos de previsión de vida útil del color y ensayos de larga duración del color, se realizarían contribuciones con respecto a las previsiones a tomar para mantener el color en la estructura.

### 2.5.2 Correspondencia entre los ensayos acelerados y la exposición natural

En la bibliografía consultada no se registran investigaciones consistentes en las que se correlacionen los resultados obtenidos de ensayos de envejecimiento acelerado del color con mediciones a escala real, debido a que son muchos los factores que intervienen, como se ha venido expresando en las secciones anteriores. Según LOZANO (1978) los ensayos acelerados sirven sólo de modo indicativo y no pueden reemplazar la observación real. El problema es la variable tiempo. Este autor presenta una interesante propuesta, con respecto a la evaluación del aspecto visual de las pinturas, en la que indica que sería conveniente en Argentina tener muestras expuestas a la intemperie en cinco zonas:

- ✓ marítima (por ejemplo Mar del Plata)
- ✓ de alta radiación (por ejemplo Mendoza)
- ✓ de vientos y polvos (por ejemplo Comodoro Rivadavia)
- ✓ fría (por ejemplo Ushuaia)
- ✓ cálida y húmeda (por ejemplo Resistencia o Chaco)

Este autor propone que debería buscarse la correlación entre la decoloración evaluada según alguna fórmula de diferencia del color como la CIELAB 1976 y las siguientes variables climáticas:

- ✓ horas de asoleamiento y nivel de radiación
- ✓ composición integrada por zonas (infrarrojo, visible, ultravioleta)
- ✓ temperatura y humedad
- ✓ nivel y duración de lluvia y/o nieve
- ✓ intensidad y dirección del viento
- ✓ análisis químico de la composición del aire, polución ambiental
- ✓ salinidad

Un estudio con estos datos sería muy importante no sólo para contribuir al conocimiento de los aspectos visuales de los materiales de construcción, sino también para la durabilidad, ya que no se encuentran muchos antecedentes fuertes al respecto.

## Capítulo 3

---

### PLAN EXPERIMENTAL Y RESULTADOS DE ENSAYOS

---

#### 3.1. Planeamiento general

La idea rectora en esta investigación ha sido valorar la influencia de la adición de pigmentos en las propiedades de los hormigones en estado fresco y endurecido, estudiar la durabilidad de la familia de hormigones de referencia y coloreado y la estabilidad del color.

Para tal fin se ha elaborado una familia de hormigones de consistencia plástica, con asentamiento constante de 80+/-10 mm y relación agua/cemento variable, orientándose específicamente a la coloración integral del hormigón, considerando que para obtener hormigón coloreado con pigmentos, los métodos a emplear pueden ser la coloración integral de la masa de hormigón o la aplicación superficial del color luego que éste ha fraguado y endurecido.

Se han planteado tres grupos de hormigones con distinta proporción de áridos y cemento; cada grupo está integrado por un hormigón patrón, de referencia, el cual no posee pigmento y tres hormigones con distintos colores de pigmentos (óxidos de hierro) e igual porcentaje agregado en función del peso de cemento por metro cúbico de hormigón. Esto integra la familia de 12 mezclas, cuya composición se indica más adelante, en la sección 3.3.2.

---

### 3.2. Variables dependientes, independientes e intervinientes

Para la dosificación de los hormigones se consideraron las siguientes variables independientes:

- ✓ Tipo de cemento: se utilizó cemento Pórtland con filler calcáreo; se han realizado los ensayos físicos y químicos para determinar sus características y requisitos.
- ✓ Tipo y color de pigmento: se han utilizado pigmentos inorgánicos, de tres colores. Los pigmentos son óxidos de hierro que obtienen su color debido a procesos de fabricación distintos que les otorga características especiales.
- ✓ Porcentaje de pigmento: se adoptó un porcentaje del 6 % en peso del cemento; de acuerdo a la bibliografía hay un porcentaje óptimo a partir del cual no se obtienen cambios significativos en el color.
- ✓ Consistencia: Se fijó para la consistencia un valor de asentamiento de 80 +/- 10 mm.
- ✓ Edad: las edades de ensayo se establecieron en 28, 91 y 182 días a los efectos de determinar la evolución de las características y propiedades en función del tiempo.
- ✓ Proporción cemento/ áridos: se adoptaron proporciones 1:4, 1:5 y 1:6 en peso.

Como variables intervinientes se consideran las siguientes:

- ✓ Contenido de cemento por metro cúbico
- ✓ Contenido de agua por metro cúbico
- ✓ Peso de la unidad de volumen
- ✓ Temperatura ambiente
- ✓ Humedad ambiente

Las variables dependientes consideradas en esta investigación fueron:

En estado fresco:

- ✓ Tiempo de fraguado: el tiempo de fraguado inicial y final del hormigón son datos importantes para la colocación del hormigón en obra, por lo cual se ha considera necesario determinar si el uso de pigmentos puede tener algún efecto sobre este requisito.
- ✓ Exudación: la velocidad de exudación y la capacidad de exudación son afectadas por el uso de pigmentos, ya que están constituidos por partículas muy finas.

En estado endurecido:

- ✓ Resistencia a compresión: la resistencia a compresión es el indicador más importante para la tipificación de hormigones.
- ✓ Módulo de elasticidad: es necesario para conocer el comportamiento elástico del material.
- ✓ Succión capilar: es el mecanismo de transferencia de líquidos más rápido.
- ✓ Permeabilidad: es la facilidad con que un fluido puede escurrir a través de un sólido, bajo un gradiente de presión externa.
- ✓ Porosidad: es un índice de la durabilidad del material, que se refleja en muchos reglamentos y códigos y es un parámetro de primer orden.
- ✓ Absorción: la absorción por inmersión está relacionada con la porosidad; los poros del hormigón pueden ser vías de acceso de agentes contaminantes.
- ✓ Profundidad de carbonatación: la carbonatación produce una disminución del pH posibilitando la corrosión de armaduras.
- ✓ Abrasión: la abrasión es una exigencia importante en hormigones expuestos a desgaste superficial.
- ✓ Efecto de la luz en el color: según el tipo, porcentaje y color del pigmento puede haber variaciones en el color del hormigón en función de su edad, lo que se ha evaluado por un método acelerado.

### 3.3. Materiales y Dosificaciones

#### 3.3.1. Caracterización de los materiales componentes

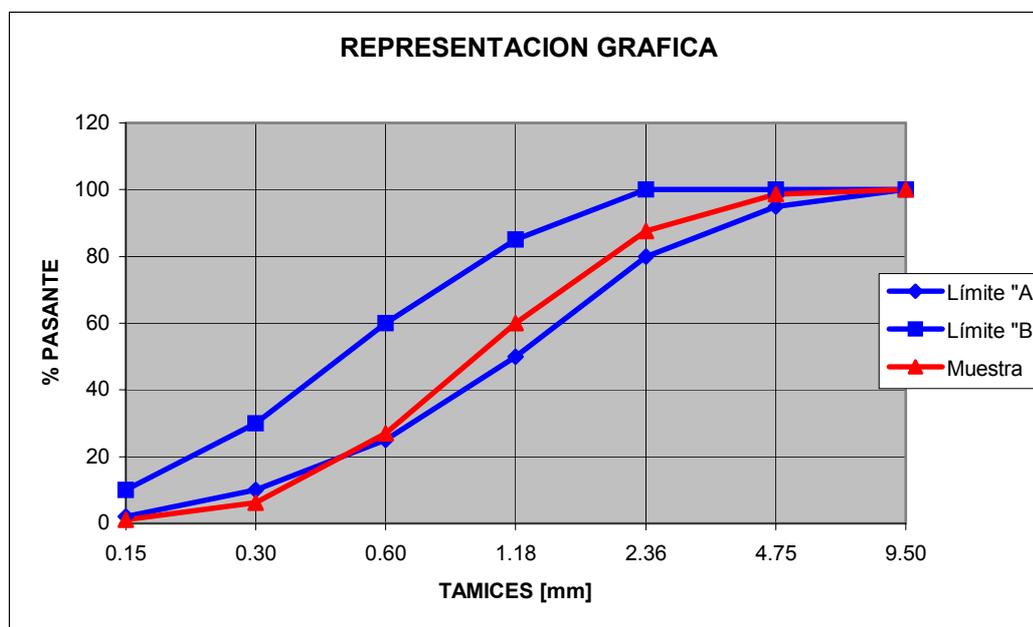
##### Agregado fino

Se ha utilizado una arena silíceica natural de origen local; los resultados de caracterización del material se presentan en la Tabla 3.1

**Tabla 3.1 Resumen de los resultados de ensayos realizados al agregado fino.**

Módulo de finura IRAM 1505:1987	Peso específico saturado a superficie seca [g/cm <sup>3</sup> ] IRAM 1520: 1970	Peso específico seco [g/cm <sup>3</sup> ] IRAM 1520: 1970	Absorción [%] IRAM 1520:1970
3,20	2,63	2,61	0,80

En la Fig. 3.1 se presenta la curva granulométrica, con los límites establecidos por el reglamento CIRSOC 201 y la Norma IRAM 1627.



**Figura 3.1 La curva granulométrica es continua, presentando una granulometría típica para las arenas de procedencia local, ligeramente gruesas**

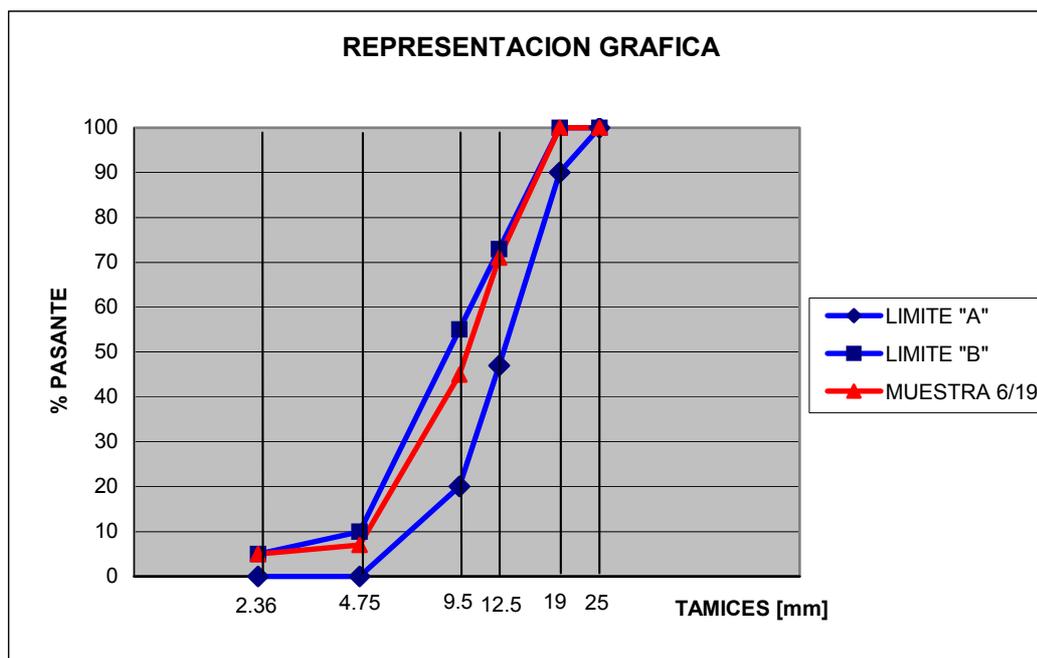
### Agregado grueso

Se ha utilizado un agregado grueso triturado de origen local; los resultados de ensayos realizados se presentan en la Tabla 3.2.

**Tabla 3.2 Resumen de los resultados de ensayos realizados al agregado grueso.**

Tamaño máximo [mm] IRAM 1505:1987	Peso específico saturado a superficie seca [g/cm <sup>3</sup> ] IRAM 1533: 1970	Peso específico seco [g/cm <sup>3</sup> ] IRAM 1533: 1970	Absorción [%] IRAM 1533: 1970
19	2,70	2,67	1,00

En la Fig. 3.2 se presenta la curva granulométrica, que cumple con los límites establecidos por el reglamento CIRSOC 201 y la Norma IRAM 1627:1997.



**Figura 3.2** La curva granulométrica es continua y está comprendida entre las curvas límites

## Pigmentos

Los pigmentos inorgánicos que se han utilizado en esta tesis son óxidos de hierro sintéticos, rojo, amarillo y negro, cuyas denominaciones se presentan en la Tabla 3.3.

**Tabla 3.3 Identificación de los pigmentos utilizados**

Nombre común	Fórmula	Denominación química	Color
Óxido de hierro rojo	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	Óxido férrico	Rojo
Óxido de hierro amarillo	$\text{Fe}(\text{OH})_2$	Hidróxido ferroso	Amarillo
Óxido de hierro negro	$\text{Fe}_3\text{O}_4$	Óxido ferroso-férrico	Negro

La dosificación del pigmento se realiza en porcentaje del peso de cemento para un metro cúbico de hormigón, utilizándose en estos hormigones un porcentaje del 6% para todas las mezclas pigmentadas, ya que como se presentó en el Capítulo 1, Sección 1.3.5, aproximadamente en ese porcentaje se alcanza el punto de saturación y si se emplea mayor contenido de pigmento la intensidad del color permanece prácticamente constante. En la Tabla 3.4 se presenta un resumen de las características de los pigmentos utilizados.

**Tabla 3.4 Características de los pigmentos utilizados**

Datos técnicos	Norma	Rojo	Amarillo	Negro
Retención malla 325 vía húmeda	-	0.3	0.3	-
Humedad [%] a 110 °C	ASTM D-280	0.8	1.4	3.5
Contenido $\text{Fe}_2\text{O}_3$ [%]	ASTM D-50	94-96	85	89-95
pH suspensión 10%	ASTM D-1208	5-7	4-6	4-8
Densidad aparente [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	-	0.65-0.75	0.25-0.35	1-1.40
Sales hidrosolubles [máx. %]	ASTM D-1208	0.5	0.5	1.5
Pérdida por calcinación a 1000 °C	-	2.57	12.4	-
Color Index Pigmento	-	Red 101	Yellow 42	Black 11
Número color index	-	77491	77492	77493
Tamaño predominante de partículas [ $\mu\text{m}$ ]		0.17	0.2	0.1 x 0.6
Absorción de agua *	--	28	30	80

\* El índice de absorción de agua expresa la cantidad de agua fijada por 100g de pigmento. Se determina por el mismo procedimiento que la absorción de aceite (DIN ISO 53 199), sustituyéndose por agua al aceite de linaza utilizado en esta norma. Los valores obtenidos deben considerarse como aproximados.

## Cemento pórtland

Las tendencias del mercado en Argentina, tanto por razones económicas como ecológicas, impulsan la utilización de cementos con filler calcáreo; en este estudio se utilizó un cemento Pórtland con filler calcáreo (CPF 40) cuyos análisis físico y resistencias mecánicas se indican en la Tabla 3.5.

**Tabla 3.5 Resultados de ensayos físicos y resistencia a compresión del cemento portland**

<b>Cemento Portland Con Filler Calcáreo- CPF 40</b>			
ENSAYOS FISICOS	Unidades	RESULTADOS	Requisito IRAM 1592 (1998)*
Retenido tamiz 75 µm	[g/100g]	1.2	<15
Superficie específica (Blaine)	[m <sup>2</sup> /kg]	393.5	>250
Expansión en autoclave	[%]	-0.01	<1
Tiempo de fraguado inicial	[h:min]	02:30	>0:45
Tiempo de fraguado final	[h:min]	03:30	<10:00
Resistencia a la compresión (2 días)	[MPa]	20.7	>10
Resistencia a la compresión (7 días)	[MPa]	34.9	no hay
Resistencia a la compresión (28 días)	[MPa]	44.7	>40 y <60

\* Actualmente esta norma está incluida en la IRAM 50000 (2000), Cementos para uso general, que facilita la tarea del usuario en lo que hace a la selección del tipo de cemento a emplear, pero no introduce ninguna modificación desde el punto de vista técnico en los requisitos de los cementos.

## Agua

Se utilizó agua potable, que cumple con los requisitos establecidos en el reglamento CIRSOC 201 y en la Norma IRAM 1601.

### 3.3.2 Dosificaciones

Las dosificaciones de los hormigones se plantearon con el Método de la Universidad de San Pablo, que permite elaborar familias de hormigones, manteniendo en este trabajo el asentamiento constante y variando la relación agua/cemento.

Esta metodología permite mediante el trazado de los diagramas de dosificación, obtener rapidez en la modificación de las proporciones para hormigones elaborados con los mismos materiales componentes.

El cuerpo teórico del método se basa en los siguientes conceptos fundamentales:

- 1) La relación agua/cemento es el parámetro más importante del hormigón estructural.
- 2) Definida una relación agua/cemento y definidos ciertos materiales, la resistencia del hormigón pasa a ser única.
- 3) El hormigón es más económico mientras mayor es el tamaño máximo del agregado grueso y menor es el asentamiento del tronco de cono o sea la consistencia es más seca.
- 4) Se asumen las siguientes “leyes de comportamiento”:

- Ley de Abrams:  $f_{cj}' = \frac{k_1}{k_2^{a/c}}$
- Ley de Lyse:  $m = k_3 + k_4 \cdot a/c$
- Ley de Molinari:  $C = 1000 / (k_5 + k_6 \cdot m)$
- Porcentaje de mortero seco:  $\alpha = (1 + f) / (1 + m)$
- Relación agua/materiales secos:  $m = f + g$

donde:

$f'_{cj}$ : resistencia a compresión axial a la edad  $j$  en MPa;

$a/c$ : relación agua/cemento en masa, en kg/kg;

$f$ : relación agregado fino seco/cemento en masa en kg/kg;

$m$ : relación agregados secos/cemento en masa en kg/kg;

$\alpha$ : porcentaje de mortero seco; constante para una determinada situación, en kg/kg;

$g$ : relación agregado grueso seco/cemento en masa en kg/kg;

$k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$ : constantes que dependen exclusivamente de los materiales (cemento, agregados finos y gruesos, aditivos).

5) Diagrama de dosificación: es el modelo de comportamiento del hormigón.

Para trazar este diagrama son necesarios por lo menos tres puntos que permiten correlacionar la propiedad estudiada con la relación agua/cemento, la proporción de materiales y el consumo de cemento.

En la Fig. 3.3 se presenta un ejemplo del diagrama de dosificación en el cual se muestra la ventaja de visualizar en un solo diagrama los parámetros más importantes resultantes de un estudio experimental y la vinculación, en este ejemplo, de esos parámetros con la resistencia a compresión del hormigón.

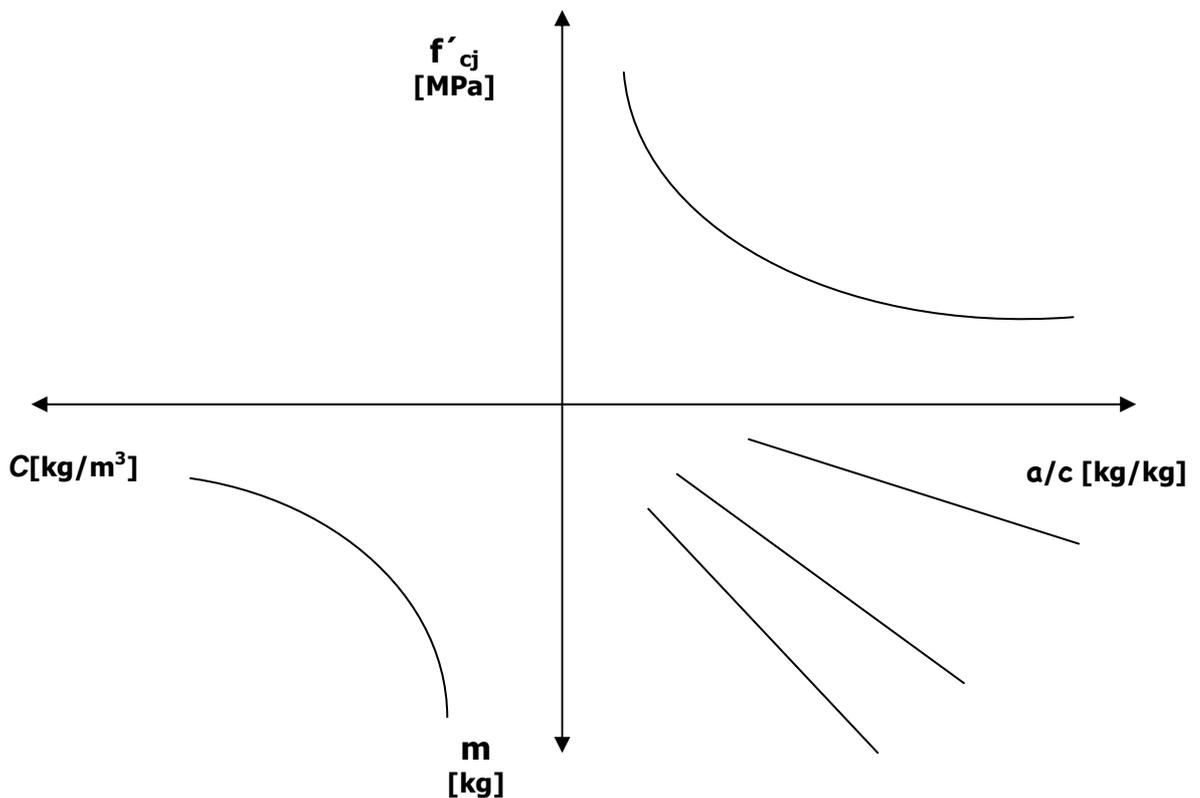


Figura 3.3 Ejemplo de diagrama de dosificación

## 6) Leyes complementarias

$$\text{Consumo de cemento por metro cúbico de hormigón: } C = \frac{\gamma}{1 + f + g + a/c}$$

$$\text{Consumo de cemento por metro cúbico de hormigón: } C = \frac{(1.000 - \text{aire})}{\frac{1}{\gamma_c} + \frac{f}{\gamma_f} + \frac{g}{\gamma_g} + a/c}$$

$$\text{Consumo de agua por metro cúbico de hormigón: } C \cdot a/c$$

donde:

$a$  : relación agregado fino seco/cemento en peso

$C$  : consumo de cemento por metro cúbico de hormigón en  $\text{kg/m}^3$ ;

$\gamma$  : masa específica del hormigón medida in-situ, en  $\text{kg/m}^3$ ;

$\gamma_c$  : masa específica del cemento medida in-situ, en  $\text{kg/m}^3$ ;

$\gamma_f$  : masa específica del agregado fino, en  $\text{kg/m}^3$ ;

$\gamma_g$  : masa específica del agregado grueso, en  $\text{kg/m}^3$ ;

*aire*: porcentaje de aire incorporado y/o aprisionado por metro cúbico, en  $\text{dm}^3/\text{m}^3$ .

## 7) Costo del hormigón por metro cúbico (materiales).

$$\text{Costo/m}^3 = C \cdot \$c + C \cdot f \cdot \$f + C \cdot pig \cdot \$pig + C \cdot g \cdot \$g + C \cdot a/c \cdot \$a$$

donde:

$C$ : consumo de cemento por metro cúbico de hormigón en  $\text{kg/m}^3$ ;

$\$c$ : costo del kg de cemento

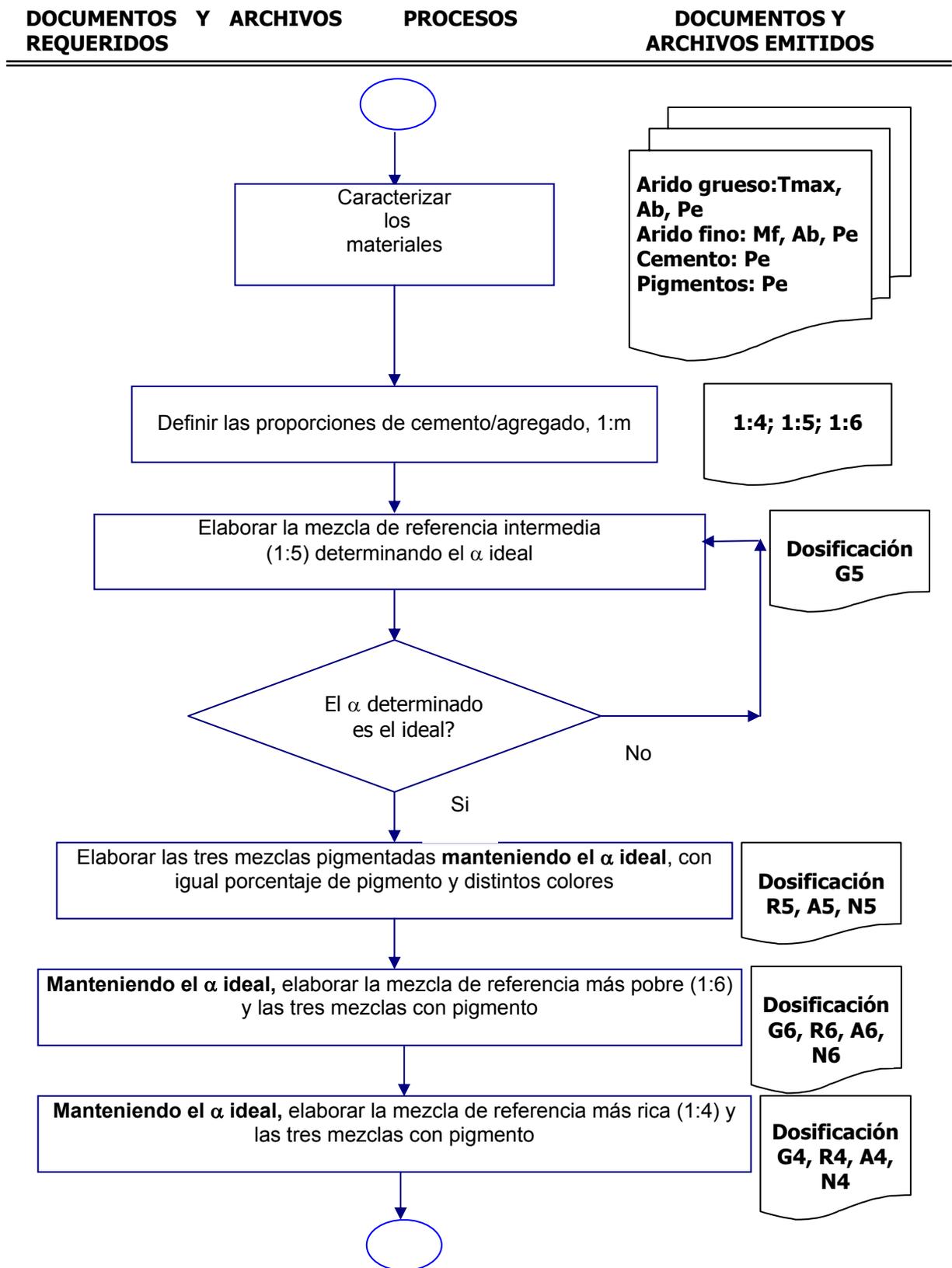
$\$pig$ : costo del pigmento

$\$f$ : costo del kg de agregado fino

$\$g$ : costo del kg de agregado grueso

$\$a$ : costo del kg de agua potable

En la Fig. 3.4, a los efectos de aclarar conceptualmente el procedimiento para la dosificación de los hormigones seguido en esta investigación, se presenta un diagrama de flujo que incluye desde la caracterización de los materiales hasta obtener la última dosificación del hormigón coloreado elaborado durante el desarrollo de esta tesis.



**Figura 3.4 Diagrama de flujo para el procedimiento de dosificación. Se presentan los pasos seguidos y la documentación necesaria y resultante del proceso**

El estudio experimental se realizó considerando las variables determinadas en la Sección 3.2. En la primera etapa se adoptó una mezcla de proporción 1:5 (cemento:agregados secos totales en peso) hasta encontrar el porcentaje de mortero seco que permitiera obtener las características del hormigón en estado fresco adecuadas, tales como la cohesión y el asentamiento previsto. La determinación del porcentaje de mortero seco es uno de los procesos más importantes en el estudio de dosificación ya que es uno de los factores que determina las condiciones óptimas de la mezcla en estado fresco.

Esta primera mezcla es el hormigón de referencia para el grupo 5; a partir de esta experiencia se elaboraron los hormigones con pigmento, para lo cual se consideró al pigmento como un material inerte y se reemplazó por una parte del agregado fino, determinando su cantidad como un porcentaje del peso del cemento.

Luego, teniendo en cuenta la información obtenida de esta mezcla se procedió a elaborar dos mezclas de referencia más, con proporciones 1:6 (mezcla más pobre o sea menor contenido de cemento por metro cúbico de hormigón) y 1:4 (mezcla más rica o sea mayor contenido de cemento por metro cúbico de hormigón) y las mezclas pigmentadas para cada grupo.

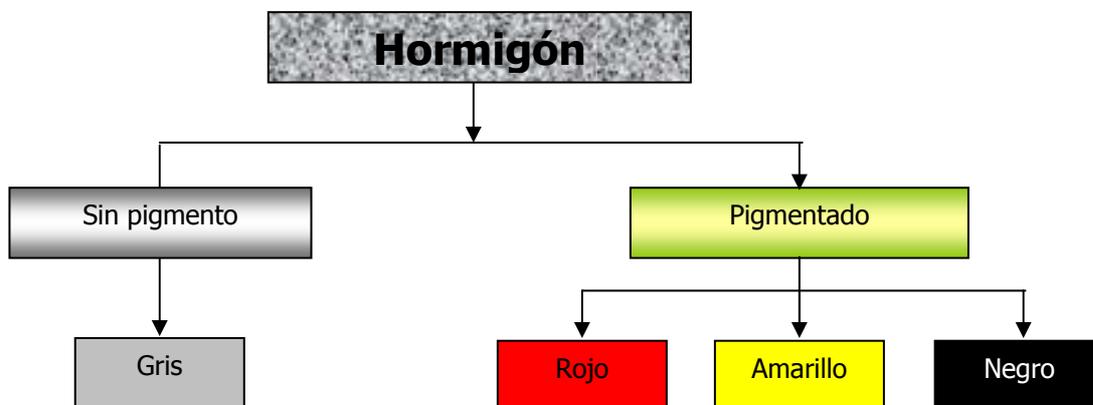
Para la identificación de los hormigones se ha adoptado un criterio que consiste en una letra seguida de un número; la letra identifica el color del hormigón y el número, un parámetro de la mezcla que es la proporción de cemento/agregados; esta nomenclatura se presenta en la Tabla 3.6.

**Tabla 3.6 Nomenclatura utilizada para la familia de hormigones identificando los tres grupos según el contenido de agregados y los colores de pigmentos utilizados**

Designación Hormigón	Color	Relación cemento/áridos en peso
<b>G4</b>	Gris	1:4
<b>R4</b>	Rojo	
<b>A4</b>	Amarillo	
<b>N4</b>	Negro	
<b>G5</b>	Gris	1:5
<b>R5</b>	Rojo	
<b>A5</b>	Amarillo	
<b>N5</b>	Negro	
<b>G6</b>	Gris	1:6
<b>R6</b>	Rojo	
<b>A6</b>	Amarillo	
<b>N6</b>	Negro	

Por lo tanto cada grupo, como se presenta en la Fig. 3.5, está integrado por cuatro tipos de hormigón:

- ✓ Un hormigón patrón, de referencia, **G**, gris
- ✓ Tres hormigones pigmentados: **R**, pigmento rojo.  
**A**, pigmento amarillo.  
**N**, pigmento negro.



**Figura 3.5 Familias de hormigones sin pigmento y pigmentados**

Las dosificaciones resultantes para cada grupo de hormigón se presentan en las Tablas 3.7, 3.8 y 3.9, en las que hay que considerar que se expresan los materiales en peso para elaborar un metro cúbico de hormigón con agregados en estado seco y también en estado saturado a superficie seca.

**Tabla 3.7 Dosificaciones para el grupo de hormigones 5**

Proporción en peso	Identificación	G5			R5			A5			N5					
	1:m	1:5			1:5			1:5			1:5					
	1:f:p:g	1	2.41	2.59	1	2.35	0.06	2.59	1	2.35	0.06	2.59	1	2.35	0.06	2.59
Mortero seco, alfa [%]		0.57			0.57			0.57			0.57					
H		0.111			0.100			0.103			0.100					
<b>PROPORCION EN PESO (ARIDOS SECOS) PARA UN METRO CUBICO DE HORMIGON</b>																
A. Grueso Seco	[kg]	897			922			913			922					
A. Fino seco	[kg]	838			841			832			840					
Pigmento	[kg]	-			21			21			21					
Cemento	[kg]	347			357			354			357					
Agua	[kg]	231			213			220			213					
Relación agua/cemento		0.67			0.60			0.62			0.60					
Asentamiento	[mm]	90			70			70			70					
Peso Unidad de Volumen	[kg/m <sup>3</sup> ]	2313			2354			2340			2353					
<b>PROPORCION EN PESO (ARIDOS SSS) PARA UN METRO CUBICO DE HORMIGON</b>																
A. Grueso SSS	[kg]	920			947			938			947					
A. Fino SSS	[kg]	858			861			853			861					
Pigmento	[kg]	-			22			21			22					
Cemento	[kg]	353			363			360			363					
Agua	[kg]	219			200			207			200					
Relación agua/cemento		0.62			0.55			0.58			0.55					
Peso Unidad de Volumen	[kg/m <sup>3</sup> ]	2350			2393			2379			2393					

Tabla 3.8 Dosificaciones para el grupo de hormigones 6

Proporción en peso	Identificación	G6			R6			A6			N6					
	1:m	1:6			1:6			1:6			1:6					
	1:f:p:g	1	2.99	3.01	1	2.93	0.06	3.01	1	2.93	0.06	3.01	1	2.93	0.06	3.01
Mortero seco, alfa [%]		0.57			0.57			0.57			0.57					
H		0.101			0.093			0.097			0.094					
<b>PROPORCION EN PESO (ARIDOS SECOS) PARA UN METRO CUBICO DE HORMIGON</b>																
A. Grueso Seco	[kg]	912			932			921			920					
A. Fino seco	[kg]	905			906			895			913					
Pigmento	[kg]	-			18			18			18					
Cemento	[kg]	303			310			306			306					
Agua	[kg]	214			200			209			203					
Relación agua/cemento		0.71			0.65			0.68			0.66					
Asentamiento	[mm]	90			70			70			70					
Peso Unidad de Volumen	[kg/m <sup>3</sup> ]	2334			2366			2349			2360					
<b>PROPORCION EN PESO (ARIDOS SSS) PARA UN METRO CUBICO DE HORMIGON</b>																
A. Grueso SSS	[kg]	936			958			946			945					
A. Fino SSS	[kg]	928			929			918			936					
Pigmento	[kg]	-			19			19			19					
Cemento	[kg]	308			315			311			311					
Agua	[kg]	201			187			196			190					
Relación agua/cemento		0.65			0.59			0.63			0.61					
Peso Unidad de Volumen	[kg/m <sup>3</sup> ]	2373			2408			2390			2401					

Tabla 3.9 Dosificaciones para el grupo de hormigones 4

Proporción en peso	Identificación	G4			R4			A4			N4					
	1:m	1:4			1:4			1:4			1:4					
	1:f:p:g	1	1.85	2.15	1	1.79	0.06	2.15	1	1.79	0.06	2.15	1	1.79	0.06	2.15
Mortero seco, alfa [%]		0.57			0.570			0.57			0.57					
H		0.096			0.096			0.106			0.096					
<b>PROPORCION EN PESO (ARIDOS SECOS) PARA UN METRO CUBICO DE HORMIGON</b>																
A. Grueso seco	[kg]	928			932			910			932					
A. Fino seco	[kg]	799			776			758			776					
Pigmento	[kg]	-			26			25			26					
Cemento	[kg]	432			434			424			434					
Agua	[kg]	207			209			226			208					
Relación agua/cemento		0.48			0.48			0.53			0.48					
Asentamiento	[mm]	80			70			70			70					
Peso Unidad de Volumen	[kg/m <sup>3</sup> ]	2366			2377			2343			2376					
<b>PROPORCION EN PESO (ARIDOS SSS) PARA UN METRO CUBICO DE HORMIGON</b>																
A. Grueso SSS	[kg]	953			956			934			956					
A. Fino SSS	[kg]	818			795			776			795					
Pigmento	[kg]	-			26			26			26					
Cemento	[kg]	439			441			430			441					
Agua	[kg]	195			196			214			196					
Relación agua/cemento		0.44			0.45			0.50			0.44					
Peso Unidad de Volumen	[kg/m <sup>3</sup> ]	2405			2414			2380			2414					

En las Tablas 3.10 y 3.11 se resumen las dosificaciones empleadas para facilitar el análisis de los hormigones en estudio, según el estado de humedad de los agregados. En definitiva no hay una variación en las mezclas, sino una manera distinta de expresar los resultados; por lo cual la relación agua/cemento, el peso de los agregados y el del agua, por ejemplo no cambian en la realidad, pero si en las planillas.

**Tabla 3.10 Resumen de las dosificaciones considerando los agregados en estado seco**

<b>PROPORCION EN PESO (ARIDOS SECOS) PARA UN METRO CUBICO DE HORMIGON</b>													
Materiales	Unidad	G4	G5	G6	R4	R5	R6	A4	A5	A6	N4	N5	N6
A. Grueso Seco	[kg]	928	897	912	932	922	932	910	913	921	932	922	920
A. Fino seco	[kg]	799	838	905	776	841	906	758	832	895	776	840	913
Pigmento	[kg]	-	-	0	26	21	18	25	21	18	26	21	18
Cemento	[kg]	432	347	303	434	357	310	424	354	306	434	357	306
Agua	[kg]	207	231	214	209	213	200	226	220	209	208	213	203
Relación agua/cemento		0.48	0.67	0.71	0.48	0.60	0.65	0.53	0.62	0.68	0.48	0.60	0.66
Asentamiento	[mm]	80	90	90	70	70	70	70	70	70	70	70	70
Peso Unidad de Volumen	[kg/m <sup>3</sup> ]	2365	2313	2334	2376	2355	2366	2343	2340	2350	2376	2354	2360

**Tabla 3.11 Resumen de las dosificaciones considerando los agregados en estado saturado a superficie seca**

<b>PROPORCION EN PESO (ARIDOS SSS) PARA UN METRO CUBICO DE HORMIGON</b>													
Materiales	Unidad	G4	G5	G6	R4	R5	R6	A4	A5	A6	N4	N5	N6
A. Grueso Seco	[kg]	953	920	936	956	947	958	934	938	946	956	947	945
A. Fino seco	[kg]	818	858	928	795	861	929	776	853	918	795	861	936
Pigmento	[kg]	-	-	-	26	22	19	26	21	19	26	22	19
Cemento	[kg]	439	353	308	441	363	315	430	360	311	441	363	311
Agua	[kg]	195	219	201	196	200	187	214	207	196	196	200	190
Relación agua/cemento		0.44	0.62	0.65	0.45	0.55	0.59	0.50	0.58	0.63	0.44	0.55	0.61
Asentamiento	[mm]	80	90	90	70	70	70	70	70	70	70	70	70
Peso Unidad de Volumen	[kg/m <sup>3</sup> ]	2404	2350	2373	2414	2394	2407	2380	2378	2390	2414	2393	2400

Por lo anteriormente mencionado, de aquí en adelante siempre se presentarán resultados vinculados al estado de los agregados saturados a superficie seca. Como se verá en las secciones que se presentan más adelante, los diagramas de dosificación se trazaron con las relaciones agua/cemento en estas condiciones.

### 3.4. Métodos y resultados de ensayos

#### 3.4.1. Elaboración de pastones

Las mezclas se elaboraron en una hormigonera de eje inclinado en ambiente de laboratorio, siguiendo las reglas del buen arte. El orden de colocación de los materiales y especialmente el momento de colocación del pigmento es un aspecto discutido en la bibliografía. Para lograr una buena dispersión del pigmento, la mayoría de los autores consultados sugieren incorporarlo con los áridos, por lo que el orden de colocación fue el siguiente:

- ✓ Árido grueso
- ✓ Cemento
- ✓ Árido fino
- ✓ Pigmento
- ✓ 80% de agua, aproximadamente
- ✓ Resto del agua para lograr el asentamiento deseado

Luego del tiempo de mezclado, se homogeneizó la mezcla y se comenzó la preparación las muestras para la realización de los ensayos en estado fresco y moldeo de probetas para la realización de ensayos en estado endurecido; en la Fig. 3.6 se presenta el mezclado y moldeo de probetas cilíndricas para un pastón de hormigón con pigmento rojo.



**Figura 3.6 Moldeo de probetas cilíndricas con hormigón pigmentado rojo**

### 3.4.2 Ensayos sobre hormigón en estado fresco

#### Determinación de la consistencia

La determinación de la consistencia se realizó según norma IRAM 1536, utilizando el método del tronco de cono, tal como se presenta en la Fig. 3.7, lo que permitió además verificar la cohesión de las mezclas y la trabajabilidad.



**Figura 3.7** Medición del asentamiento en hormigón con pigmento rojo.

En la Tabla 3.12 se presentan los resultados de asentamiento para las mezclas de referencia y pigmentadas estudiadas.

**Tabla 3.12** Resultados de asentamientos obtenidos de los ensayos para los hormigones de referencia y pigmentados

Hormigón	Pigmento	Asentamiento [mm]
<b>G4</b>	Referencia	80
<b>G5</b>		90
<b>G6</b>		90
<b>R4</b>	Rojo	70
<b>R5</b>		70
<b>R6</b>		70
<b>A4</b>	Amarillo	70
<b>A5</b>		70
<b>A6</b>		70
<b>N4</b>	Negro	70
<b>N5</b>		70
<b>N6</b>		70

### Determinación del peso de la unidad de volumen

El peso unitario del hormigón en estado fresco se determinó según la norma IRAM 1562. En la Fig. 3.8 se presenta el recipiente con una muestra de hormigón con pigmento rojo, durante su compactación.



**Figura 3.8 Procedimiento para la compactación de la muestra**

En la Tabla 3.13 se presentan los resultados obtenidos para el peso de la unidad de volumen teórico y el promedio de los resultados de ensayo para las mezclas estudiadas.

**Tabla 3.13 Resultados promedio del peso de la unidad de volumen (PUV) para los hormigones en estudio**

Pigmento	Hormigón	PUV teórico [kg/m <sup>3</sup> ]	PUV ensayo [kg/m <sup>3</sup> ]
Referencia	<b>G4</b>	2363	2327
	<b>G5</b>	2310	2278
	<b>G6</b>	2331	2285
Rojo	<b>R4</b>	2371	2355
	<b>R5</b>	2349	2278
	<b>R6</b>	2364	2285
Amarillo	<b>A4</b>	2339	2321
	<b>A5</b>	2337	2313
	<b>A6</b>	2349	2250
Negro	<b>N4</b>	2371	2311
	<b>N5</b>	2349	2278
	<b>N6</b>	2349	2320

### Determinación de la exudación

La determinación de la exudación de agua del hormigón fresco se realizó siguiendo el procedimiento establecido en la norma IRAM 1604. La recolección del agua acumulada en la superficie a intervalos de tiempo establecidos permite calcular:

- ✓ el volumen de agua exudada por unidad de superficie,  $V$  ( $\text{cm}^3 / \text{cm}^2$ )
- ✓ la relación entre el volumen total de agua exudada y el volumen de agua de mezclado,  $H$  (%)

Este parámetro resulta más interesante a la hora de analizar los resultados, como se presenta en el capítulo 4, ya que independiza el análisis del tamaño de la muestra.

En la Fig.3.9 se presenta una etapa de la recolección del agua de exudación en una muestra de hormigón pigmentado.



**Figura 3.9 Procedimiento para la determinación del agua exudada**

En la Tabla 3.14 se presentan los resultados del volumen de agua exudada por unidad de superficie,  $V$  [ $\text{cm}^3 / \text{cm}^2$ ] y de la relación entre el volumen total de agua exudada y el volumen de agua de mezclado,  $H$ [%].

Tabla 3.14 Resultados del ensayo de exudación

Pigmento	Hormigón	V [cm <sup>3</sup> /cm <sup>2</sup> ]	H [%]	a/c
Referencia	<b>G4</b>	0.059	1.39	0.44
	<b>G5</b>	0.207	4.37	0.62
	<b>G6</b>	0.229	5.32	0.65
Rojo	<b>R4</b>	0.066	1.53	0.45
	<b>R5</b>	0.123	2.90	0.55
	<b>R6</b>	0.127	3.23	0.59
Amarillo	<b>A4</b>	0.052	1.10	0.50
	<b>A5</b>	0.083	1.84	0.58
	<b>A6</b>	0.167	4.07	0.63
Negro	<b>N4</b>	0.036	1.61	0.44
	<b>N5</b>	0.103	2.42	0.55
	<b>N6</b>	0.094	2.23	0.61

### Determinación del tiempo de fraguado

El tiempo de fraguado se determinó por el método de resistencia a la penetración, según lo establecido en la norma IRAM 1662, que se corresponde con la norma MERCOSUR NM 9 “Hormigón. Determinación del tiempo de fraguado mediante resistencia a penetración”.

Esta norma indica, en su campo de aplicación, que el método puede emplearse para determinar los efectos sobre el tiempo de fraguado de variables tales como la temperatura, la proporción de las mezclas y la incorporación de adiciones y aditivos; justamente las distintas proporciones de las mezclas y la incorporación de pigmentos son variables consideradas en este trabajo.

Algunos conceptos importantes para analizar el efecto de los pigmentos son el tiempo inicial de fraguado, que esta norma define como al tiempo transcurrido a partir del contacto inicial entre el cemento y el agua de mezclado, hasta alcanzar una resistencia a la penetración de 3,4 MPa y el tiempo final de fraguado, que es el tiempo transcurrido desde el contacto inicial entre el cemento y el agua de mezclado, hasta alcanzar una resistencia a la penetración de 27,4 MPa.

Las determinaciones a intervalos regulares de tiempo permiten obtener una curva uniforme. En la Fig. 3.10 se muestra la preparación de las muestra mediante tamizado del hormigón, que es un requisito del método y la determinación de la resistencia a la penetración en el mortero resultante del procedimiento anterior con el dispositivo para medir la penetración.



**Figura 3.10 Procedimiento de tamizado del hormigón y dispositivo de medición de la fuerza de penetración**

En la Tabla 3.15 se presentan los resultados de los ensayos realizados para la familia de hormigones en estudio.

**Tabla 3.15 Resultados del ensayo de tiempo de fraguado**

Pigmento	Hormigón	Resistencia a la Penetración [MPa]										
		Tiempo [horas]										
		2:00	2:30	3:00	3:30	4:00	4:30	5:00	5:30	6:00	6:30	7:00
Referencia	<b>G4</b>	0.31	0.31	0.46	1.54	4.62	8.62	18.75	50.77	-	-	-
	<b>G5</b>	0.30	0.30	2.56	-	15.38	-	34.38	-	-	-	-
	<b>G6</b>	0.46	0.92	1.54	3.08	5.38	7.69	10.46	61.54	93.75	-	-
Rojo	<b>R4</b>	0.31	0.62	1.23	3.08	4.62	10.77	18.13	60.00	-	-	-
	<b>R5</b>	0.15	-	0.31	-	1.38	-	3.38	-	14.38	-	35.38
	<b>R6</b>	0.31	0.62	1.38	2.15	6.15	10.46	46.15	46.15	62.50	-	-
Amarillo	<b>A4</b>	0.15	0.31	0.77	1.08	2.31	9.23	13.85	38.46	109.38	-	-
	<b>A5</b>	0.46	0.77	1.08	2.62	4.62	10.77	31.25	35.38	53.13	-	-
	<b>A6</b>	0.31	0.77	1.54	2.31	3.08	7.38	10.77	17.50	38.46	-	-
Negro	<b>N4</b>	0.31	0.46	1.69	3.54	9.85	27.69	46.15	-	-	-	-
	<b>N5</b>	0.15	0.46	0.77	1.08	1.85	4.46	5.54	9.38	18.75	90.63	-
	<b>N6</b>	0.15	0.62	0.92	2.00	3.08	8.92	9.54	22.50	52.31	-	-

En la Tabla 3.16 se presentan los resultados de los tiempos de fraguado inicial y final obtenidos para la familia de hormigones en estudio.

**Tabla 3.16 Tiempos de fraguado inicial y final**

<b>Hormigón</b>	<b>a/c</b>	<b>As [mm]</b>	<b>Tiempo inicial de fraguado [horas]</b>	<b>Tiempo final de fraguado [horas]</b>
<b>G4</b>	0,44	80	4:00	5:15
<b>R4</b>	0,45	70	3:40	5:00
<b>A4</b>	0,50	70	4:10	5:25
<b>N4</b>	0,44	70	3:30	4:20
<b>G5</b>	0,62	90	3:30	4:30
<b>R5</b>	0,55	70	5:00	6:45
<b>A5</b>	0,58	70	3:40	5:10
<b>N5</b>	0,55	70	4:20	6:00
<b>G6</b>	0,65	90	3.30	5:00
<b>R6</b>	0,59	70	3:40	5:00
<b>A6</b>	0,63	70	4:00	5:40
<b>N6</b>	0,61	70	4:10	5:15

### 3.4.3 Ensayos sobre hormigón endurecido

#### Moldeo y acondicionamiento de las probetas

Debido a que fue necesario realizar ensayos para determinar las propiedades mecánicas, las propiedades vinculadas a la durabilidad y a la estabilidad del color, se moldearon probetas de varios tamaños, de acuerdo al ensayo a realizar, como se presenta en la Tabla 3.17.

**Tabla 3.17 Resumen de dimensiones de las probetas según el ensayo a realizar**

Forma	Dimensiones [cm]			Ensayo a realizar
	Diámetro	Altura		
Cilíndrica	10	20		Compresión. Absorción por inmersión
	15	30		Módulo de elasticidad. Permeabilidad al agua
	15	5		Succión capilar, carbonatación y coordenadas cromáticas
	5	10		Abrasión
Prismática	Lado	Lado	Altura	Determinación de coordenadas cromáticas
	7	7	3	

Las probetas se mantuvieron en curado húmedo en pileta de agua hasta la edad de ensayo, dependiendo del ensayo a realizar. Para la determinación de la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad se encabezaron las probetas con mezcla de azufre, según indica la norma IRAM 1553.

#### Determinación de la resistencia a compresión

Los ensayos de resistencia a compresión se realizaron a las edades de 28, 91 y 182 días, siguiendo la metodología de la norma IRAM 1546; la prensa utilizada fue una prensa hidráulica. En la Fig. 3.11 se presentan muestras de probetas cilíndricas de hormigón con pigmento amarillo ensayadas a compresión.



**Figura 3.11 Rotura normal de probetas de hormigón con pigmento amarillo sometidas al ensayo de compresión**

En la Tabla 3.18 se presentan los resultados de obtenidos y la edades de ensayo. Cada resultado es el promedio de ensayo de tres probetas para las edades de ensayo de los hormigones en estudio.

**Tabla 3.18 Resultados de ensayos a compresión, organizados por color**

Pigmento	Hormigón	Relación a/c	f'c Promedio [MPa]		
			28 días	91 días	182 días
Referencia	<b>G4</b>	0,44	36.9	39,9	41,4
	<b>G5</b>	0,62	25.1	31,3	31,7
	<b>G6</b>	0,65	20.1	23,9	29,6
Rojo	<b>R4</b>	0,45	33.5	38,7	42,8
	<b>R5</b>	0,55	27.2	30,0	30,6
	<b>R6</b>	0,59	21.0	25,6	32,6
Amarillo	<b>A4</b>	0,50	37.7	40,9	41,9
	<b>A5</b>	0,58	29.6	30,9	42,8
	<b>A6</b>	0,63	20.3	25,1	31,4
Negro	<b>N4</b>	0,44	38.9	35,2	41,2
	<b>N5</b>	0,55	26.4	29,8	43,4
	<b>N6</b>	0,61	21.2	29,6	37,2

Estos mismos resultados se presentan en la Tabla 3.19 organizados por grupos de hormigones para comparar entre los diferentes colores y ver el efecto del pigmento.

Tabla 3.19 Resultados de ensayos a compresión, organizados por grupos

Grupo	Hormigón	Relación a/c	f'c Promedio [MPa]		
			28 días	91 días	182 días
4	G4	0,44	36.9	39,9	41,4
	R4	0,45	33.5	38,7	42,8
	A4	0,50	37.7	40,9	41,9
	N4	0,44	38.9	35,2	41,2
5	G5	0,62	25.1	31,3	31,7
	R5	0,55	27.2	30,0	30,6
	A5	0,58	29.6	30,9	42,8
	N5	0,55	26.4	29,8	43,4
6	G6	0,65	20.1	23,9	29,6
	R6	0,59	21.0	25,6	32,6
	A6	0,63	20.3	25,1	31,4
	N6	0,61	21.2	29,6	37,2

### Determinación del módulo de elasticidad estático

Para los ensayos de módulo de elasticidad se siguió la norma ASTM C469-94, ya que no existen normas nacionales, determinándose el módulo de elasticidad estático e instantáneo, secante al 40% de la resistencia a compresión. Las edades de ensayo fueron de 28, 91 y 182 días. En la Fig. 3.12 se presenta el equipo de dos aros metálicos y flexímetro utilizado.



Figura 3.12 Probeta de hormigón con el equipo para la determinación del módulo de elasticidad estático

En la Tabla 3.20 se presentan los resultados de módulo de elasticidad promedio de tres probetas de ensayo para cada edad y hormigón en estudio.

**Tabla 3.20 Resultados del ensayo de módulo de elasticidad, organizados por colores**

Pigmento	Hormigón	Relación a/c	Ec Promedio [GPa]		
			28 días	91 días	182 días
Referencia	<b>G4</b>	0,44	27.77	30.13	31.48
	<b>G5</b>	0,62	26.26	24.85	27.83
	<b>G6</b>	0,65	24.15	27.14	24.59
Rojo	<b>R4</b>	0,45	25.78	29.00	32.90
	<b>R5</b>	0,55	24.23	27.65	34.25
	<b>R6</b>	0,59	24.15	25.83	24.90
Amarillo	<b>A4</b>	0,50	26.73	29.46	28.99
	<b>A5</b>	0,58	24.20	26.89	28.54
	<b>A6</b>	0,63	22.69	26.52	25.08
Negro	<b>N4</b>	0,44	25.37	28.75	31.32
	<b>N5</b>	0,55	25.90	27.55	29.84
	<b>N6</b>	0,61	23.71	25.66	27.65

Estos mismos resultados se presentan en la Tabla 3.21 organizados por grupos de hormigones para facilitar su lectura, permitir comparar entre los diferentes colores y ver el efecto del pigmento.

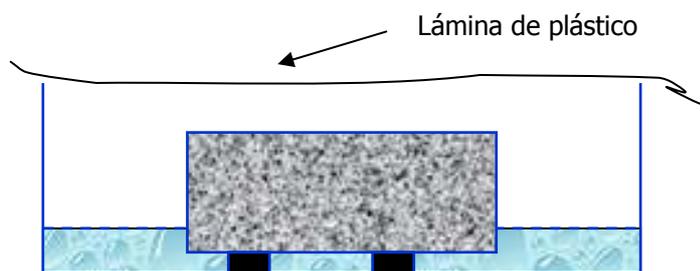
**Tabla 3.21 Resultados del ensayo de módulo de elasticidad, organizados por grupos**

Grupo	Hormigón	Relación a/c	Ec Promedio [GPa]		
			28 días	91 días	182 días
4	<b>G4</b>	0,44	27.77	30.13	31.48
	<b>R4</b>	0,45	25.78	29.00	32.90
	<b>A4</b>	0,50	26.73	29.46	28.99
	<b>N4</b>	0,44	25.37	28.75	31.32
5	<b>G5</b>	0,62	26.26	24.85	27.83
	<b>R5</b>	0,55	24.23	27.65	34.25
	<b>A5</b>	0,58	24.20	26.89	28.54
	<b>N5</b>	0,55	25.90	27.55	29.84
6	<b>G6</b>	0,65	24.15	27.14	24.59
	<b>R6</b>	0,59	24.15	25.83	24.90
	<b>A6</b>	0,63	22.69	26.52	25.08
	<b>N6</b>	0,61	23.71	25.66	27.65

### Determinación de la succión capilar

La propiedad que mejor refleja la capacidad para absorber y transmitir agua por capilaridad es la absorción capilar. Esta técnica no se encontraba todavía reglamentada en el ámbito nacional en el momento de realizar los ensayos; durante el desarrollo de esta tesis se aprobó la norma IRAM 1871 para determinar la capacidad y la velocidad de succión capilar de agua del hormigón endurecido.

Por este motivo en este trabajo, para la determinación de la succión capilar, se siguió la Recomendación RILEM –CEMBUREAU TC 116-PCD y las edades de ensayo establecidas fueron los 28, 91 y 182 días. El método consiste en determinar la ganancia de masa de una muestra constituida por una rodaja de hormigón sometida a la acción del contacto con agua en una de sus caras. Con los hormigones en estudio se moldearon probetas cilíndricas de 150 x 50 mm las que fueron curadas por inmersión en agua hasta las edades de ensayo.



**Figura 3.13 Muestras impermeabilizadas lateralmente y sumergidas en agua hasta una altura de 5 mm y cubiertas con una lámina de plástico**

Previo al ensayo las probetas fueron secadas en estufa hasta peso constante; luego se sellaron las superficies laterales con pintura impermeabilizante y posteriormente se colocaron en un recipiente con agua dejando inmersos sólo 5 mm, tal como se presenta en el esquema de la Fig. 3.13.

La cantidad de agua absorbida se obtuvo como la ganancia de masa a los 10 minutos, 1, 4 y 24 horas.



**Figura 3.14 Disposición de las probetas durante el ensayo de succión capilar**

En la Fig. 3.14 se presenta la disposición y pesado de las muestras en ambiente de laboratorio y en las Tablas 3.22, 3.23 y 3.24 se presentan los resultados de succión capilar obtenidos en los hormigones de referencia y pigmentados, a las edades de 28, 91 y 182 días. Cada resultado corresponde al promedio de tres probetas ensayadas para cada edad de ensayo y hormigón estudiado.

**Tabla 3.22 Resultados del ensayo de succión capilar a los 28 días de edad**

Pigmento	Hormigón	Succión capilar [g/m <sup>2</sup> ] Edad 28 días			
		10 min	1h	4h	24h
Referencia	<b>G4</b>	1225	2079	4463	7365
	<b>G5</b>	1526	2621	4651	7558
	<b>G6</b>	1445	2385	3654	8088
Rojo	<b>R4</b>	1031	2008	3840	6996
	<b>R5</b>	1287	2496	4880	8119
	<b>R6</b>	1220	2063	3767	5575
Amarillo	<b>A4</b>	1868	2253	4076	5825
	<b>A5</b>	1639	2885	5222	7816
	<b>A6</b>	1679	2900	5679	7344
Negro	<b>N4</b>	2066	2459	4443	6593
	<b>N5</b>	540	1741	3928	7484
	<b>N6</b>	1409	2588	4682	6578

**Tabla 3.23 Resultados del ensayo de succión capilar a los 91 días de edad**

Pigmento	Hormigón	Succión capilar [g/m <sup>2</sup> ] Edad 91 días			
		10 min	1h	4h	24h
Referencia	<b>G4</b>	1532	2497	4621	7169
	<b>G5</b>	1602	2868	5318	7897
	<b>G6</b>	1423	2779	4657	6843
Rojo	<b>R4</b>	859	2031	4205	7148
	<b>R5</b>	596	2234	4549	6902
	<b>R6</b>	1366	1366	3588	5463
Amarillo	<b>A4</b>	1212	2205	3343	6599
	<b>A5</b>	1599	2471	4530	7656
	<b>A6</b>	2126	3381	5953	8173
Negro	<b>N4</b>	1392	2640	4068	7121
	<b>N5</b>	755	1681	3822	6671
	<b>N6</b>	1281	1281	3384	5998

**Tabla 3.24 Resultados del ensayo de succión capilar a los 182 días de edad**

Pigmento	Hormigón	Succión capilar [g/m <sup>2</sup> ] Edad 182 días			
		10 min	1h	4h	24h
Referencia	<b>G4</b>	1199	1632	2133	3872
	<b>G5</b>	1431	<b>2061</b>	2815	4952
	<b>G6</b>	1529	2443	3754	7741
Rojo	<b>R4</b>	859	2011	4103	4269
	<b>R5</b>	1013	1584	1584	4269
	<b>R6</b>	1246	2071	2988	6776
Amarillo	<b>A4</b>	964	1558	1899	3435
	<b>A5</b>	1116	1729	2421	4936
	<b>A6</b>	1563	2589	3795	6561
Negro	<b>N4</b>	1089	1527	2212	3718
	<b>N5</b>	1013	1563	2049	3857
	<b>N6</b>	1533	2211	3098	5187

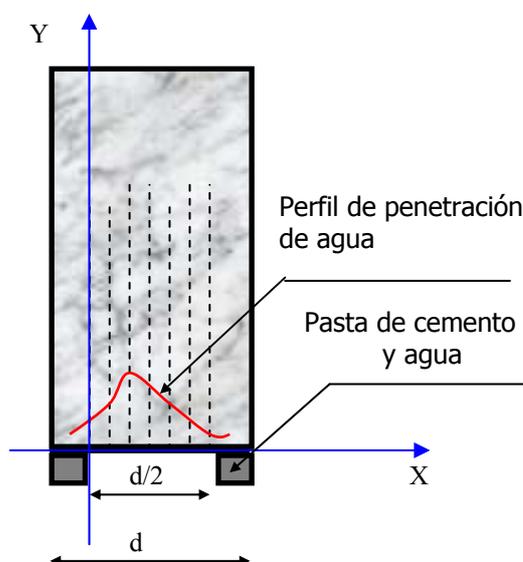
### Determinación de la penetración de agua a presión

Los ensayos de penetración al agua se realizaron siguiendo la norma IRAM 1554; las edades de ensayo previstas sufrieron variaciones debido a que la capacidad de ensayo del equipo no permitía cumplir exactamente con las edades preestablecidas en el plan de trabajo.

Este método somete a las muestras a una secuencia y tiempo de mantenimiento de presiones de agua, finalizado el último ciclo la probeta se divide en dos mitades lo que permite:

- ✓ medir la penetración máxima del agua en milímetros
- ✓ el cálculo de la media aritmética
- ✓ configurar un diagrama característico considerando la forma y profundidad de la penetración del agua

En la Fig. 3.15 se presenta un esquema de la probeta con la preparación de la cara en contacto con el agua a presión y un esquema típico del perfil de penetración de agua.



**Figura 3.15 Esquema del ensayo de permeabilidad al agua. Indicación del perfil de penetración de agua en el corte de la probeta cilíndrica de hormigón**

En la Tabla 3.25 se presentan los resultados promedios del perfil de penetración de agua, el promedio de la penetración máxima y la edades de ensayo. Cada resultado es el promedio de dos probetas de ensayo para cada edad y hormigón en estudio.

**Tabla 3.25 Resultados del ensayo de permeabilidad al agua**

<b>Pigmento</b>	<b>Hormigón</b>	<b>Edad</b>	<b>Penetración Prom. [mm]</b>	<b>Penetración Max. Prom. [mm]</b>
Referencia	<b>G4</b>	60	23	28
		186	30	45
	<b>G5</b>	50	35	40
		137	29	43
	<b>G6</b>	39	42	47
		123	39	55
Rojo	<b>R4</b>	76	22	28
		238	29	37
	<b>R5</b>	39	30	34
		123	30	41
	<b>R6</b>	55	34	41
		202	33	37
Amarillo	<b>A4</b>	67	22	27
		236	27	34
	<b>A5</b>	34	34	41
		118	29	35
	<b>A6</b>	41	42	47
		252	52	58
Negro	<b>N4</b>	65	23	27
		238	24	27
	<b>N5</b>	32	29	35
		123	36	41
	<b>N6</b>	60	32	38
		243	42	48

### **Determinación de la absorción agua por inmersión e índice de vacíos**

Se trata de un ensayo que ofrece información sobre la calidad del hormigón. Se puede considerar una medida indirecta de la resistencia del hormigón a la penetración de agentes agresivos en situaciones en las que el material está sumergido, saturado o húmedo permanentemente.

La determinación de la absorción de agua por inmersión, índice de vacíos y masa específica fue realizada siguiendo el procedimiento de ensayo del método establecido en la norma ASTM C642. Los resultados obtenidos para la edad de 360 días se presentan en la Tabla 3.26.

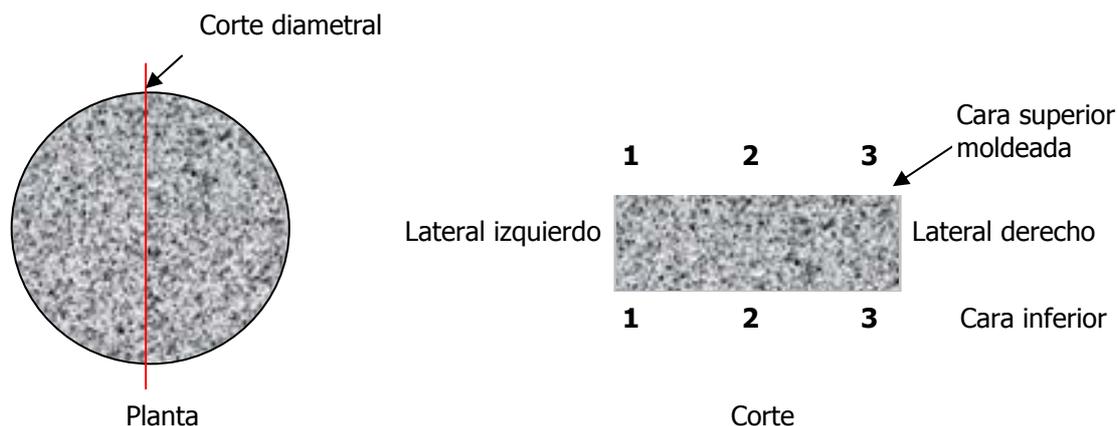
**Tabla 3.26 Resultados del ensayo de absorción e índice de vacíos**

Pigmento	Hormigón	Absorción después de inmersión	Absorción después de inmersión y hervor	Índice de vacíos después inmersión	Índice de vacíos después de inmersión y hervor
		[%]	[%]	[%]	[%]
Referencia	<b>G4</b>	3,6	3,4	5,9	5,6
	<b>G5</b>	5,2	5,0	8,5	8,4
	<b>G6</b>	6,0	6,0	8,8	8,6
Rojo	<b>R4</b>	3,6	3,5	5,9	5,8
	<b>R5</b>	4,7	4,8	7,8	7,6
	<b>R6</b>	4,8	4,8	8,0	8,0
Amarillo	<b>A4</b>	3,9	3,9	6,4	6,4
	<b>A5</b>	4,5	4,5	7,5	7,5
	<b>A6</b>	5,0	5,0	8,3	8,3
Negro	<b>N4</b>	3,5	3,5	5,9	5,8
	<b>N5</b>	4,2	4,2	6,9	6,8
	<b>N6</b>	4,6	4,6	7,7	7,7

### Determinación de la carbonatación

El ensayo de medición de la profundidad fue realizado luego de dos años de exposición de las probetas al ambiente natural. Las dimensiones de las probetas utilizadas fueron de 15 cm de diámetro por 5 cm de altura, realizándose un corte según un diámetro, obteniéndose dos muestras por cada probeta.

En la Fig. 3.16 se presenta un esquema de la probeta, en planta, con la indicación del corte realizado para lograr una superficie expuesta fresca; en corte, se indica la ubicación de los puntos en los que se determinaron las profundidades de carbonatación.



**Figura 3.16 Esquema del corte de las probetas y ubicación de los puntos en los que se determinó la profundidad de carbonatación**

La determinación de la profundidad de carbonatación fue realizada con un indicador químico que evidencia la diferencia de pH entre el hormigón no carbonatado y el frente de carbonatación; se utilizó una solución de fenoftaleína, preparada en alcohol a una concentración de 1%, que es incolora.

Los resultados de este ensayo son de interpretación inmediata. Antes de aplicar la solución de fenoftaleína se tomó la precaución de quitar el polvo superficial y el agua proveniente del corte de las probetas para evitar errores en la determinación de la profundidad de carbonatación; luego se aplicó la fenoftaleína con un rociador sobre la zona recién fracturada del hormigón, antes que la superficie expuesta pudiese carbonatar por contacto con el aire.

Si la zona impregnada mantiene su color original, indica que esa zona ya está carbonatada; por el contrario, en las zonas en que se produce un cambio en la coloración, tornándose rosada o violeta, indica que el hormigón aún no está carbonatado. Con este procedimiento es posible determinar la profundidad del frente de carbonatación.

En la Fig. 3.17 se presenta una fotografía de las probetas de hormigón con pigmento amarillo en las que se ha aplicado fenoftaleína, mostrando el cambio abrupto de pH; se aprecia una zona perimetral, no coloreada y la zona interior que ha cambiado de color, aún no carbonatada, que mantiene un pH alto.



**Figura 3.17** Probetas de hormigón con pigmento amarillo con aplicación de fenofaleína en la que se aprecia el frente de carbonatación

En la Tabla 3.27 se presentan los promedios de los resultados de medición de la profundidad de carbonatación obtenidos para la cara superior de las probetas para los hormigones de referencia y pigmentados.

**Tabla 3.27** Resultados de la determinación de la profundidad de carbonatación

Pigmento	Hormigón	Profundidad de carbonatación [mm]
Referencia	<b>G4</b>	2
	<b>G5</b>	5
	<b>G6</b>	6
Rojo	<b>R4</b>	3
	<b>R5</b>	4
	<b>R6</b>	5
Amarillo	<b>A4</b>	2
	<b>A5</b>	4
	<b>A6</b>	4
Negro	<b>N4</b>	3
	<b>N5</b>	3
	<b>N6</b>	3

### Determinación de la abrasión. Ensayo de desgaste superficial

En obras construidas con hormigones comunes o coloreados, por ejemplo con adoquines, en pisos industriales o pavimentos, las acciones asociadas a esfuerzos que provocan el desgaste de la superficie expuesta del hormigón se pueden agrupar como fenómenos de abrasión y desgaste, aunque más específicamente se considera abrasión cuando hay una acción mecánica por arrastre de sólidos sobre la superficie. De ahí la importancia de conocer la influencia de los pigmentos en esta propiedad.

El método de ensayo utilizado corresponde a la norma IRAM 1522, Baldosas aglomeradas con cemento con cara vista plana, en el que se utiliza la máquina de Dorry, que se presenta en la Fig. 3.18 y un abrasivo constituido por arena silícea de granulometría establecida.



**Figura 3.18 Máquina de Dorry. Detalle de los portamuestras y las sobrepesas necesarias para garantizar la presión indicada en la norma**

Se prepararon tres probetas cilíndricas de 5 cm x 10 cm, para cada serie de hormigones, ensayándose a 360 días. El procedimiento de ensayo comienza con el secado en estufa hasta peso constante de las probetas; luego se identificaron tres generatrices ubicadas en la sección circular a 120° en cada probeta cilíndrica para determinar su longitud promedio.

Las probetas se colocan en el dispositivo de ensayo graduado de modo que se ejerza una presión indicada por la norma sobre la superficie expuesta al desgaste. Se hace funcionar el dispositivo hasta alcanzar un recorrido de 300 m cuidando que la incorporación del abrasivo se efectúe en forma continua y uniforme, tal como se presenta en la Fig. 3.19.



**Figura 3.19 Incorporación del abrasivo constituido por arena sílicea**

El desgaste, en milímetros, se obtiene como la diferencia promedio de las mediciones de la longitud de las tres probetas de cada serie, antes y después del ensayo, en las generatrices separadas regularmente ( $120^\circ$ ). La profundidad de desgaste promedio para cada hormigón se presenta en la Tabla 3.28.

**Tabla 3.28 Resultados del ensayo de desgaste**

<b>Pigmento</b>	<b>Hormigón</b>	<b>Profundidad de desgaste promedio [mm]</b>
Referencia	<b>G4</b>	0.98
	<b>G5</b>	0.96
	<b>G6</b>	1.02
Rojo	<b>R4</b>	0.97
	<b>R5</b>	0.95
	<b>R6</b>	1.07
Amarillo	<b>A4</b>	0.72
	<b>A5</b>	0.51
	<b>A6</b>	0.81
Negro	<b>N4</b>	0.61
	<b>N5</b>	0.85
	<b>N6</b>	0.77

### Determinación de las coordenadas cromáticas

Para la medición del color se utilizó un Colorímetro Micro Color II Dr. Lange, que se presenta en la Fig. 3.20, cuyo principio es la medición del color y sus diferencias de acuerdo al método de los valores triestímulos de la norma DIN 5033. El equipo está integrado por una sonda de medición de esfera combinada con lámpara de xenón; la lámpara proporciona una iluminación difusa sobre la muestra a medir, la que es reflejada y medida a un ángulo de  $8^\circ$ .

Otros datos técnicos del equipo son:

- Geometría :d/8.
- Iluminante standard: D 65.
- Fuente de luz: lámparas de xenón.
- Repetibilidad:  $0,1 \Delta E^*$  para el blanco.



**Figura 3.20** En la fotografía izquierda se observa el equipo con la sonda, el display y la placa de calibración y en la derecha, la determinación de las lecturas

En este trabajo se midieron las coordenadas cromáticas  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  que son las que se suelen emplear en la gran mayoría de las normativas de análisis del color. Su principal ventaja está en que con su determinación se evitan los errores de percepción que producen cuando se utilizan las cartas de color. Se utilizó el sistema CIELAB, que ya se presentó en el Capítulo 1.

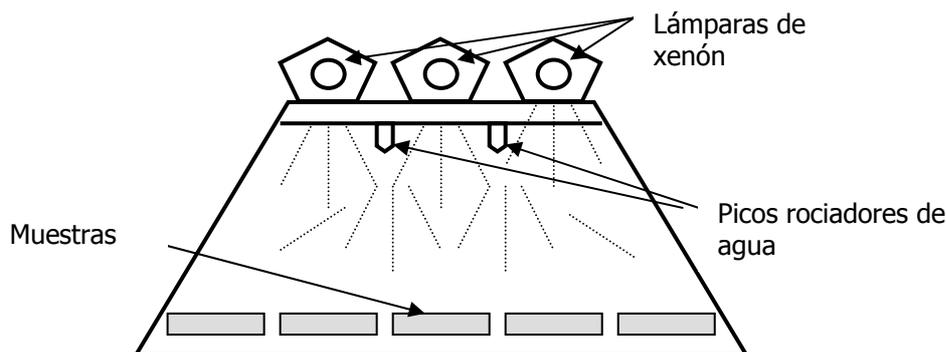
Para el ensayo de envejecimiento acelerado del color, se utilizó una equipo Q SUN 3000 Xenon Test Chamber, que se presenta en la Fig. 3.21. Esta cámara simula los efectos perjudiciales y dañinos de la exposición a la intemperie y se utiliza para ensayar, bajo ciertos aspectos, la durabilidad de los materiales.

Este equipo sigue las normas ASTM G151 (Exposing Nonmetallic Materials in Accelerated Test Devices that Use Laboratory Light Sources) y ASTM G155 (Operating Xenon Arc Light Apparatus for Exposure of Nonmetallic Materials). En pocos días o semanas puede producir daños que en el ambiente natural llevaría meses o años de exposición. El efecto perjudicial de la luz del sol es simulado utilizando lámparas de xenón. La secuencia de luz, oscuridad y períodos de spray de agua se controlan automáticamente.



**Figura 3.21 Equipo Q SUN 3000 Xenon Test Chamber. Detalle de la placa portamuestras**

El ciclo predeterminado para la exposición de las muestras, de acuerdo a lo sugerido en el manual del equipo ya que en la bibliografía no se encuentran datos específico para hormigones, fue de una hora y cuarenta y dos minutos de ultravioleta y dieciocho minutos de spray con agua. El tiempo total de exposición fue de 1145 horas realizándose observaciones visuales y mediciones de las coordenadas cromáticas  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$ , cada 100 horas aproximadamente. El esquema de la cámara y la posición de las muestras de hormigón se presenta en la Fig. 3.22.



**Figura 3.22 Esquema de la cámara de envejecimiento acelerado. Se indica la posición de las lámparas y picos rociadores de agua**

Para los ensayos de medición del color se moldearon, para cada hormigón, tres probetas prismáticas cuya sección expuesta fue un cuadrado de 7 cm x 7 cm de lado. Durante el moldeo se tuvo en cuenta la terminación superficial cuidando que se lograra en la probeta, una superficie plana, uniforme en color y brillo, limpia y libre de defectos, con la textura propia del hormigón y representativa del grupo estudiado. Estas precauciones tuvieron como objetivo obtener una buena precisión en la evaluación de la diferencia del color durante la realización de los ciclos de envejecimiento, en especial en lo que se refiere a lograr que las muestras tuvieran inicialmente similar brillo y textura.

Se determinaron las coordenadas cromáticas iniciales (tiempo cero) y luego cada 100 horas aproximadamente, registrándose los resultados a las 75, 231, 350, 454, 527, 643, 783, 856, 948, 1070 y 1145 horas. Cumplidas las 856 horas se observó que durante los dos períodos inmediatos anteriores prácticamente no había variación de las coordenadas cromáticas y que la superficie presentaba eflorescencias superficiales. Por este motivo se decidió aplicar una técnica de limpieza superficial, en los cuatro últimos períodos, que consistió en frotar la superficie con paño de algodón y registrar las coordenadas cromáticas antes y después de la limpieza.

En la Tabla 3.29 se presentan los resultados de la medición de las coordenadas cromáticas durante la exposición en la cámara, promedio de tres probetas y tres determinaciones en cada probeta, para los hormigones elaborados.

**Tabla 3.29** Coordenadas cromáticas obtenidas para los períodos de tiempo establecidos, antes y después de la limpieza superficial

Hormigón	Coord. Prom.	TIEMPO [Horas]															
		Sin limpieza								Antes de la limpieza				Después de la limpieza			
		0	75	231	350	454	527	643	783	856	948	1070	1145	856	948	1070	1145
G4	L*	61.8	62.0	62.1	62.1	61.8	61.7	61.2	61.5	61.6	61.9	61.6	61.8	62.8	62.8	62.3	62.2
	a*	0.8	0.6	0.8	0.6	0.7	0.7	0.5	0.5	0.5	1.1	1.2	1.2	0.8	0.9	1.2	1.0
	b*	4.5	4.9	5.1	5.2	5.5	5.8	6.0	6.6	6.7	8.0	8.0	7.3	7.4	7.0	7.3	7.0
G5	L*	63.0	62.9	62.5	62.2	63.4	64.8	61.1	61.3	61.6	61.1	61.1	61.4	62.1	61.8	61.7	61.7
	a*	1.3	1.0	1.1	1.1	1.0	1.1	0.4	0.3	0.3	1.5	1.8	1.5	1.3	1.5	1.6	1.4
	b*	5.2	5.5	5.9	6.2	6.7	6.9	6.2	6.8	7.2	9.1	9.1	8.9	9.0	8.7	8.6	8.6
G6	L*	66.0	67.8	67.9	69.1	68.0	68.1	68.1	68.4	68.7	67.4	66.5	66.4	68.2	67.7	67.2	66.9
	a*	1.4	1.4	1.3	0.7	0.8	1.0	0.6	0.6	0.5	1.0	1.1	1.1	0.7	0.9	1.1	1.0
	b*	5.6	4.9	5.0	5.1	5.6	5.9	6.1	6.3	6.2	7.3	7.9	8.9	7.0	7.0	7.5	8.1
R4	L*	51.4	54.2	56.2	55.9	58.5	58.9	58.2	59.5	59.1	51.0	50.1	50.0	51.4	50.7	50.1	49.9
	a*	20.6	16.9	16.3	16.6	14.4	15.0	15.0	14.3	15.7	24.5	23.9	23.9	23.6	24.0	23.8	23.7
	b*	8.1	5.6	5.0	5.3	4.2	4.6	4.8	4.8	5.4	11.7	11.2	11.3	10.8	11.2	11.2	11.1
R5	L*	49.0	48.8	48.7	48.3	48.1	48.4	47.7	48.6	48.9	46.1	45.8	46.0	47.1	47.8	47.2	51.0
	a*	21.7	21.2	21.9	22.2	22.2	21.9	22.2	21.6	21.6	26.1	25.6	22.8	25.9	25.2	24.9	22.1
	b*	9.2	8.5	9.2	9.5	9.3	9.7	9.5	9.8	10.0	12.8	12.6	12.4	12.4	11.7	11.5	10.4
R6	L*	51.0	51.7	53.8	55.0	54.9	56.6	56.1	57.2	57.3	52.0	51.9	52.0	52.7	51.9	51.9	52.1
	a*	21.5	20.8	19.0	18.2	17.9	17.4	17.1	16.4	17.1	22.3	21.4	21.6	21.7	22.2	21.6	21.5
	b*	8.5	7.5	6.5	6.2	5.9	6.0	5.7	6.2	5.9	10.1	9.8	10.1	9.8	10.0	9.6	9.9
A4	L*	57.0	59.5	60.7	62.0	61.6	61.9	61.9	62.4	62.5	63.5	63.2	62.9	62.7	63.2	63.2	63.1
	a*	7.1	7.8	7.9	7.6	8.0	7.5	7.6	7.4	7.2	7.1	7.7	7.9	7.4	7.0	7.6	7.5
	b*	24.6	24.7	26.0	26.1	25.7	25.4	26.6	26.1	26.3	28.3	29.1	28.6	27.7	0.0	28.1	28.1
A5	L*	61.7	63.3	64.3	64.8	64.8	65.0	65.4	65.6	65.8	64.6	64.4	63.9	65.2	64.8	64.8	64.6
	a*	8.4	8.9	8.8	8.4	8.7	8.4	8.4	8.3	7.9	8.6	9.2	15.4	8.5	8.6	8.8	9.0
	b*	23.7	23.8	23.6	24.3	23.9	23.9	24.3	24.2	24.6	29.3	31.5	32.2	28.9	28.8	29.7	29.8
A6	L*	57.2	60.0	60.7	59.8	62.1	62.1	64.3	64.2	64.5	62.4	62.8	63.3	62.8	62.6	62.7	63.0
	a*	8.4	8.8	8.0	7.6	7.7	7.4	0.0	7.0	16.9	6.9	7.2	7.3	7.1	7.0	7.1	7.3
	b*	22.6	22.8	22.1	21.7	21.3	21.4	20.8	21.0	21.3	25.6	26.5	26.8	25.4	25.5	26.2	26.8
N4	L*	41.9	44.8	45.3	45.6	45.2	46.3	46.4	46.4	46.5	42.5	41.9	42.0	42.2	43.0	42.2	41.9
	a*	0.6	0.7	0.6	0.9	0.9	0.9	1.0	0.7	0.9	1.8	2.3	2.2	2.0	1.9	2.0	2.1
	b*	0.1	0.1	0.8	1.0	1.3	1.4	1.6	1.6	1.8	3.0	3.1	3.2	3.1	2.9	3.0	2.9
N6	L*	41.1	45.8	45.3	46.7	47.2	47.2	47.4	47.4	47.0	47.0	44.4	44.3	44.8	44.8	44.5	44.4
	a*	1.0	0.7	0.5	0.6	0.5	0.7	0.7	0.9	0.9	0.9	2.0	2.1	1.5	1.5	1.8	2.0
	b*	0.4	0.0	0.4	0.7	0.9	1.0	1.3	1.4	1.5	1.5	2.7	2.9	2.3	2.3	2.7	2.8

En las columnas identificadas con color celeste se indican los resultados antes de la limpieza y en las columnas identificadas con verde, los resultados obtenidos después de la limpieza para cada uno de los últimos cuatro períodos de exposición.

## **Capítulo 4**

---

### **DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

---

#### **4.1 Hormigón en estado fresco**

##### **4.1.1 Asentamiento**

La determinación del asentamiento realizada con el ensayo del cono de Abrams permitió además verificar la cohesión y la trabajabilidad de las mezclas. Las mezclas con pigmento se observaban con mayor cohesión, siendo las que contenían pigmento negro de aspecto más pegajoso, cohesivo y presentaban, visualmente, una superficie más brillante.

A pesar de que la incorporación de pigmento se ha realizado reemplazando parte del agregado fino, se produce una disminución del asentamiento cuando se mantiene constante el porcentaje de mortero seco. Como consecuencia es necesario variar la relación agua/cemento para mantener el asentamiento en el orden de 80+/-10 mm. Esto está referido a las tolerancias fijadas en el Reglamento CIRSOC 201 (1982), Capítulo 6, Materiales; se indican las tolerancias en los asentamientos para valores de hasta 70 mm y mayores de 70 mm, como se muestra en la Tabla 4.1 reproducida de la Tabla 9 del Reglamento.

**Tabla 4.1 Reproducción de las tolerancia en los asentamientos fijadas en el Reglamento CIRSOC 201 (1982)**

<b>Asentamiento [IRAM 1536]</b>	<b>Tolerancia</b>
Hasta 70 mm	+/- 15 mm
Mayor de 70 mm	+/- 25 mm

En la Tabla 4.2 se presentan los resultados de los asentamientos medidos en el ensayo, notándose la influencia del contenido de pigmento que produce una disminución de la relación agua/cemento para un mismo asentamiento de 80 +/- 10 mm. En el grupo 5 la relación agua/cemento disminuye de 0.62 en el hormigón a valores de 0.55 y 0.58 en los hormigones pigmentados. Este efecto se repite para el grupo 6 no siendo observable para el grupo 4, probablemente debido a que posee un consumo de cemento más grande que los demás.

**Tabla 4.2 Resultados de asentamientos obtenidos de los ensayos para los hormigones de referencia y pigmentados**

<b>Pigmento</b>	<b>Hormigón</b>	<b>Asentamiento [mm]</b>	<b>a/c</b>
Referencia	<b>G4</b>	80	0.44
	<b>G5</b>	90	0.62
	<b>G6</b>	90	0.65
Rojo	<b>R4</b>	70	0.45
	<b>R5</b>	70	0.55
	<b>R6</b>	70	0.59
Amarillo	<b>A4</b>	70	0.50
	<b>A5</b>	70	0.58
	<b>A6</b>	70	0.63
Negro	<b>N4</b>	70	0.44
	<b>N5</b>	70	0.55
	<b>N6</b>	70	0.61

Como se ya se presentó en capítulos anteriores, los pigmentos utilizados en este trabajo están compuestos por partículas muy pequeñas, de tamaños menores a 1µm y su finura incide en las condiciones del hormigón en estado fresco; pero no sólo es importante el tamaño de las partículas de pigmento sino también su forma, composición química, absorción de agua y la distribución granulométrica completa de la composición cemento, pigmento y finos.

Los pigmentos negros y rojos tienen forma esférica que pueden proporcionar mayor trabajabilidad al hormigón. Varios autores como CARVALHO (2000), PEREZ LUZARDO (1995) y en varias publicaciones de BAYER, coinciden en que en el caso del pigmento amarillo, la forma de las partículas es acicular y por lo tanto debido a su mayor superficie específica es capaz de absorber más agua; por lo tanto a los efectos de mantener el asentamiento previsto es necesario incrementar la relación agua/cemento, caso del grupo 4.

Con respecto a la demanda de agua, la norma ASTM C-979 recomienda que para mantener la trabajabilidad de la mezcla de referencia la demanda de agua al añadir pigmento no debe exceder el 10 % en peso de cemento.

Según RAMACHANDRAN (1995) la adición de pigmento en porcentajes menores del 6 % no afecta significativamente la consistencia de morteros y hormigones, aunque mayores porcentajes pueden incrementar la demanda de agua y el prematuro endurecimiento de la mezcla, particularmente cuando se utilizan pigmentos sintéticos que contienen partículas muy finas. También hace referencia a que en el caso del uso de negro de carbón, que no es el caso de este estudio, la gran superficie específica tiene una marcada influencia en la consistencia ya que puede ocurrir una reacción física o coloidal que incremente la velocidad de endurecimiento de la mezcla.

#### 4.1.2 Exudación

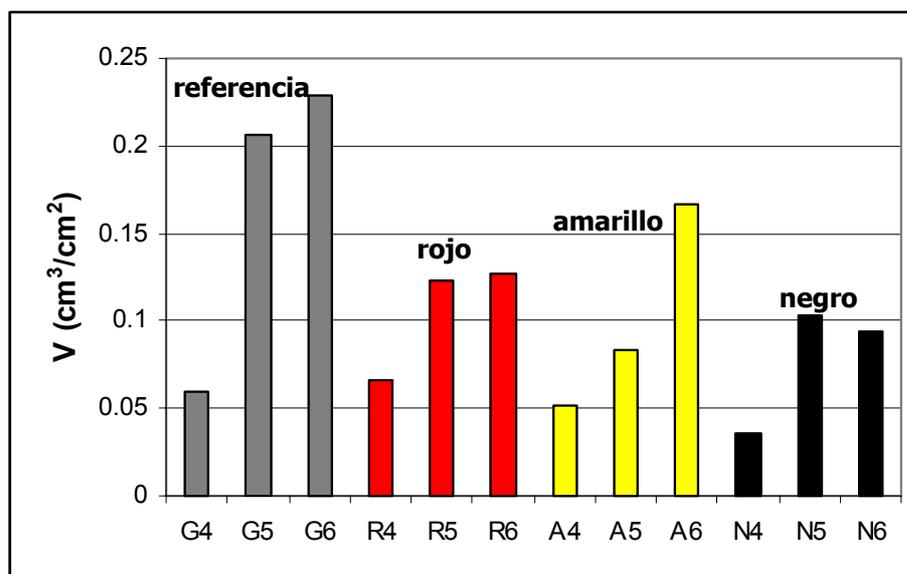
Según RAMACHANDRAN (1995) la adición de pigmentos y morteros colorantes en las dosis recomendadas no alteran la exudación de la mezcla, aunque no presenta resultados de ensayos. Los aditivos multicomponentes colorantes y dispersiones de pigmentos, cuando se usan en dosis más elevadas que las recomendadas con cementos de bajo contenido de aluminato tricálcico pueden reducir la cohesividad de la mezcla y promover la exudación.

En la Fig. 4.1 se presenta el volumen de agua exudada por unidad de superficie,  $V$  ( $\text{cm}^3 / \text{cm}^2$ ), para los hormigones de referencia y pigmentados.

Considerando esta figura se puede decir que en la familia de hormigones de referencia:

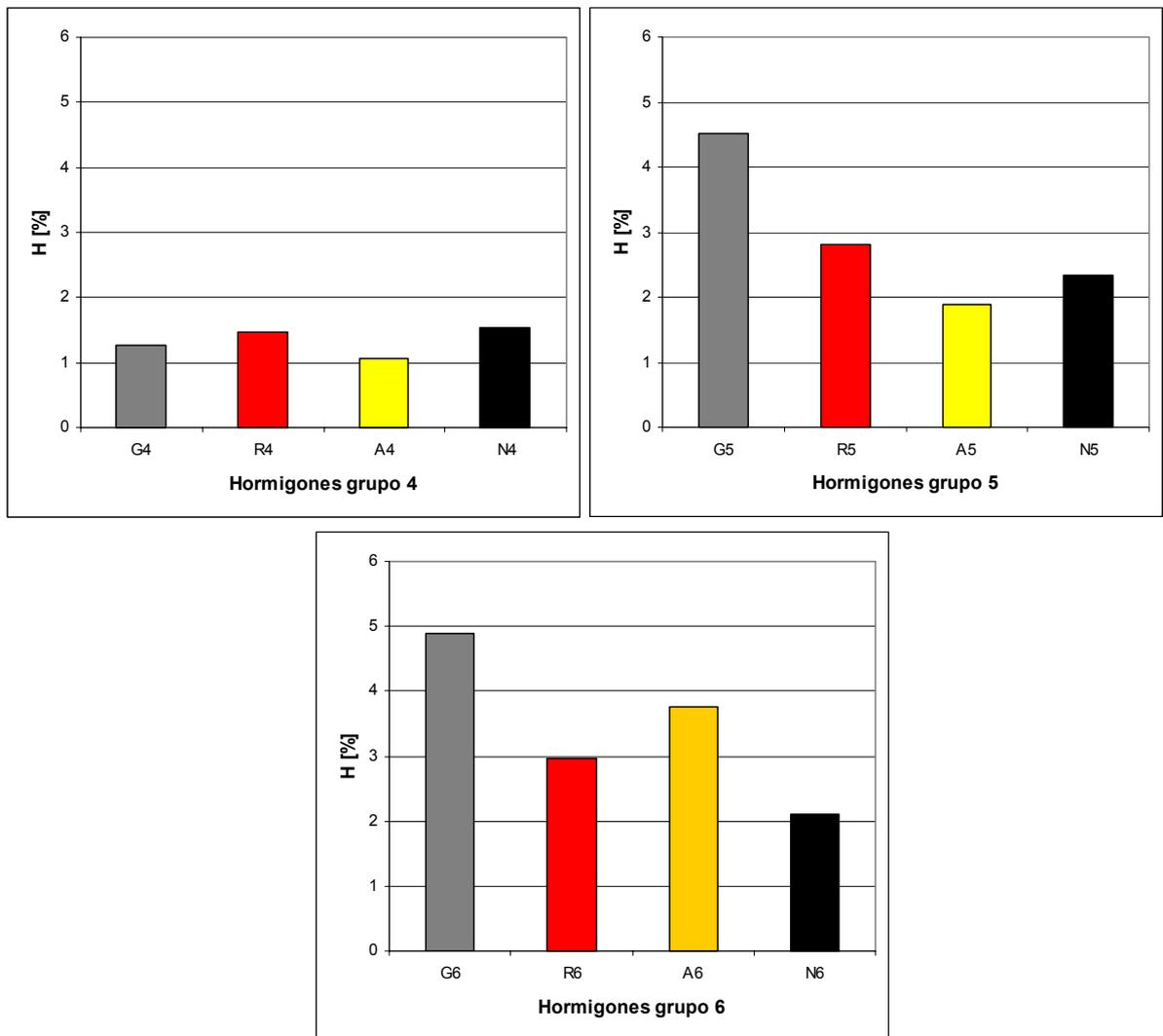
- ✓ el volumen de agua exudada es mayor que en los pigmentados.
- ✓ a mayor contenido de agregados por metro cúbico de hormigón y a mayor relación a/c, mayor es el volumen de agua exudada.

Esta tendencia se mantiene para los hormigones pigmentados aunque en distinto porcentaje.



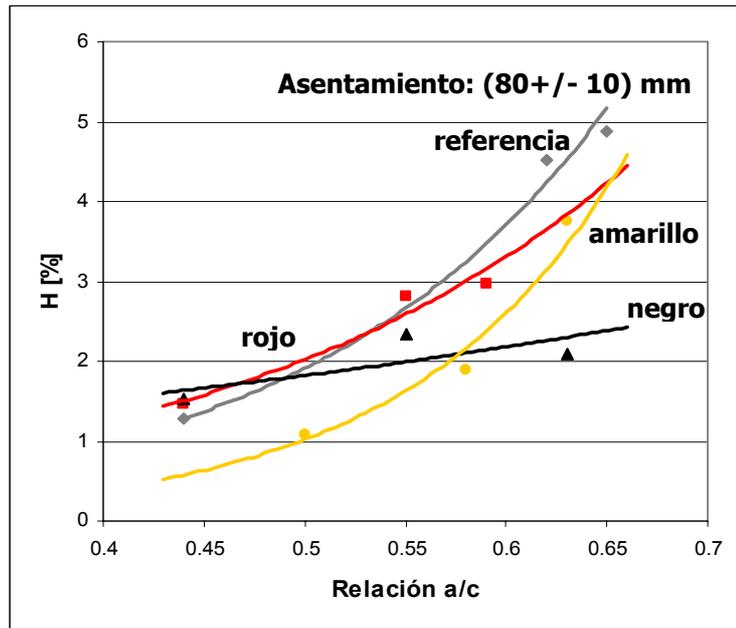
**Figura 4.1 Volumen de agua exudada para el hormigón de referencia y los pigmentados**

En términos relativos, el porcentaje de agua exudada permite independizar el análisis del contenido de agua por metro cúbico de hormigón. En la Fig. 4.2 se muestra que este porcentaje de agua exudada es mayor en los hormigones sin pigmentar que en los pigmentados, salvo en el grupo 4 donde no es tan notable probablemente debido al mayor contenido de finos presente en las mezclas, aportados por el cemento y los pigmentos.



**Figura 4.2** Porcentaje de exudación de agua para los grupos de hormigones

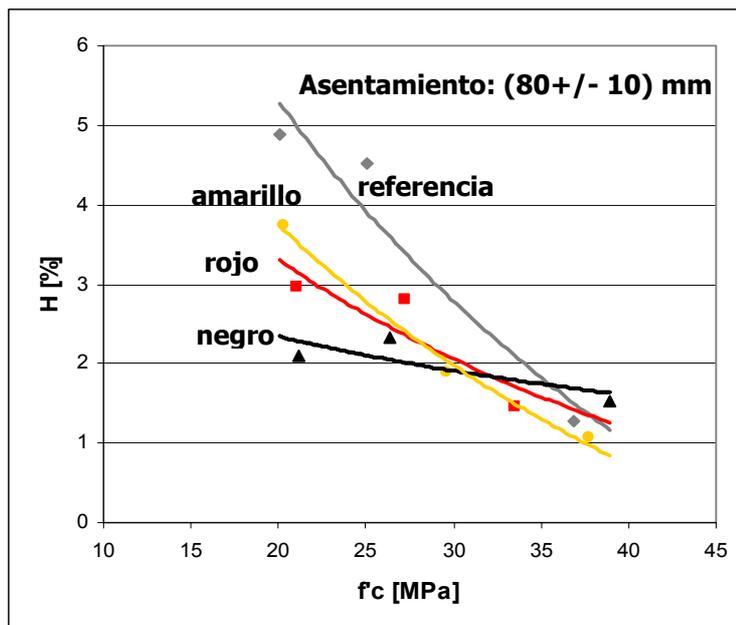
Comparando el porcentaje de agua exudada de todas las mezclas en función de la relación a/c, aproximadamente para las relaciones mayores que 0,52 el porcentaje de exudación es mayor para los hormigones de referencia, tal como se presenta en la Fig. 4.3; posiblemente este efecto sea provocado por un menor contenido de partículas finas, que le impiden la retención de agua.



**Figura 4.3** Porcentaje de exudación de los hormigones en función de la relación a /c

Si se relaciona el porcentaje de exudación con la resistencia a compresión, la Fig. 4.4 muestra que a menor porcentaje de exudación:

- ✓ en los hormigones de referencia la resistencia a compresión a los 28 días es mayor.
- ✓ en los hormigones pigmentados se mantiene esta tendencia, aunque la pendiente de las curvas es menor.



**Figura 4.4 Comparación del porcentaje de exudación de agua en función de la resistencia a compresión a 28 días**

Un menor contenido de agua de exudación en la mezcla implicaría que habría menos agua retenida debajo de las partículas de agregado y por lo tanto aumentaría la adherencia. Esta correlación se analizará con más detalle en la Sección 4.2.1, resistencia a compresión.

**4.1.3 Tiempo de fraguado**

Según algunos autores, METHA Y MONTEIRO (1994), NEVILLE (1997) y otros, los principales factores que controlan los tiempos de fraguado del hormigón son los componentes del cemento, la temperatura, la relación agua/cemento y los aditivos, considerándose la influencia de éstos dos últimos en este trabajo.

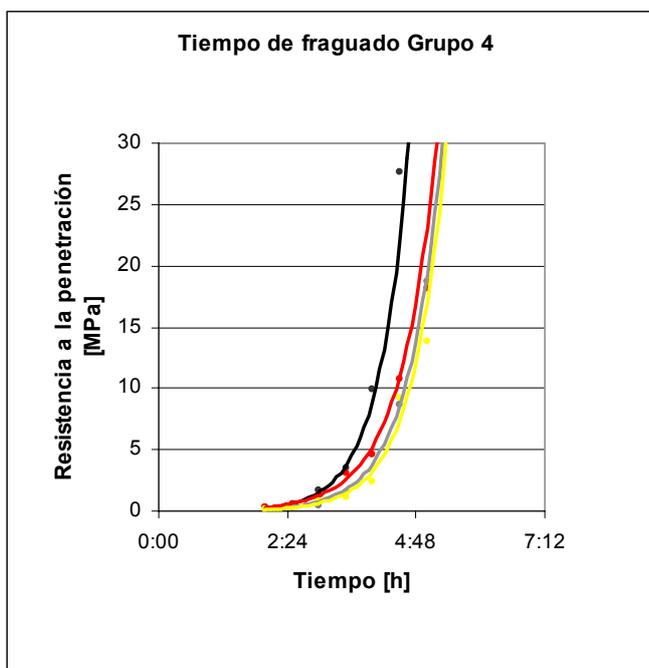
En el Capítulo 3 se hizo referencia a que el tiempo de fraguado inicial ( $T_{if}$ ) y final ( $T_{ff}$ ), medidos por el método de resistencia a la penetración, son determinados por puntos arbitrarios definidos a partir del trazado de una curva que relaciona la resistencia a penetración y el tiempo transcurrido. Considerando estos aspectos se presentan a continuación los resultados obtenidos para la familia de hormigones.

En la Tabla 4.3 se presentan los resultados obtenidos para los hormigones del grupo 4; los hormigones G4, R4 y N4, tienen una relación agua/cemento prácticamente igual a 0,44 lo que permite comparar el comportamiento del hormigón de referencia con aquellos en los que se ha adicionado pigmento rojo y negro. El tiempo de fraguado inicial para los hormigones pigmentados aumenta en aproximadamente 30 minutos, mientras que el tiempo de fraguado final disminuye, con respecto al patrón, en 15 o 55 minutos según sea el pigmento adicionado (rojo o negro).

**Tabla 4.3 Tiempo inicial y final de fraguado para los hormigones del grupo 4**

Hormigón	a/c	As [mm]	Tiempo inicial de fraguado [horas]	Tiempo final de fraguado [horas]	Observaciones
<b>G4</b>	0,44	80	4:00	5:15	30 min  55 min
<b>R4</b>	0,45	70	3:40	5:00	
<b>A4</b>	0,50	70	4:10	5:25	
<b>N4</b>	0,44	70	3:30	4:20	

En la Fig. 4.5 se observa que las curvas de los hormigones R4 y N4 se desplazan hacia la izquierda del hormigón de referencia, mientras que el A4, que tiene a/c mayor, 0,50 se ubica a la derecha del hormigón de referencia, coincidiendo con la bibliografía en la que se hace referencia a que a mayor a/c, mayor es el tiempo de fraguado.



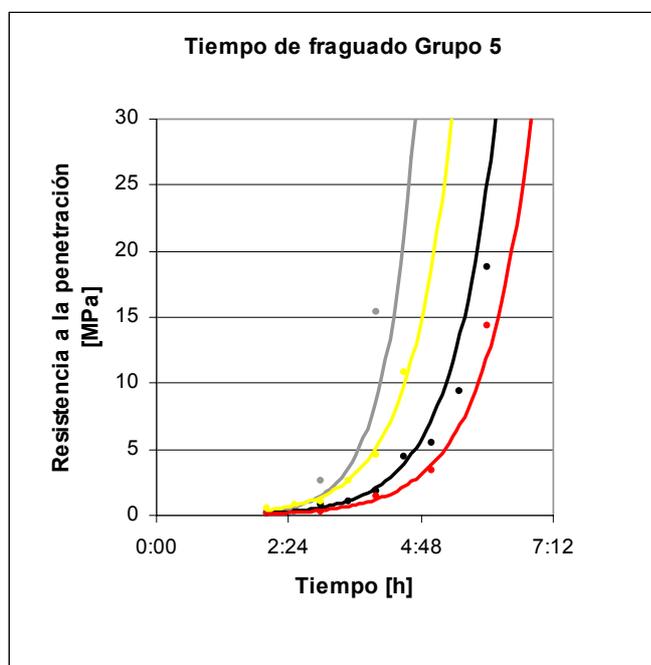
**Figura 4.5 Tiempo inicial y final de fraguado para los hormigones del grupo 4**

En la Tabla 4.4 se presentan los resultados del ensayo de determinación del tiempo de fraguado para los hormigones del grupo 5. Los hormigones pigmentados tienen relaciones agua/cemento similares; el tiempo inicial aumenta en 1 hora 20 minutos para el R5 comparándolo con el A5; para el tiempo final de fraguado este incremento es de 1 hora 35 minutos. Los coeficientes de correlación obtenidos son muy buenos, variando entre 0.93 y 0.99.

**Tabla 4.4 Tiempo inicial y final de fraguado para los hormigones del grupo 5**

Hormigón	a/c	As [mm]	Tiempo inicial de fraguado [horas]	Tiempo final de fraguado [horas]	Observaciones
<b>G5</b>	0,62	90	3:30	4:30	1 hora 20 min. 1 hora 35 min.
<b>R5</b>	0,55	70	5:00	6:45	
<b>A5</b>	0,58	70	3:40	5:10	
<b>N5</b>	0,55	70	4:20	6:00	

En la Fig. 4.6 se observa que los hormigones pigmentados presentan tiempos de fraguado mayores que el hormigón de referencia, a pesar de que el mismo tiene mayor relación a/c.



**Figura 4.6 Tiempo inicial y final de fraguado para los hormigones del grupo 5**

Para los hormigones del grupo 6 se presentan los resultados en la Tabla 4.5 y en la Fig. 4.7, destacándose que la influencia de la presencia de pigmentos en el tiempo de fraguado parece ser menor que en los grupos anteriores, manteniéndose el alto nivel de los coeficientes de correlación obtenidos para las curvas.

**Tabla 4.5 Tiempo inicial y final de fraguado para los hormigones del grupo 6**

Hormigón	a/c	As [mm]	Tiempo inicial de	Tiempo final de
----------	-----	---------	-------------------	-----------------

			fraguado [horas]	fraguado [horas]
<b>G6</b>	0,65	90	3.30	5:00
<b>R6</b>	0,59	70	3:40	5:00
<b>A6</b>	0,63	70	4:00	5:40
<b>N6</b>	0,61	70	4:10	5:15

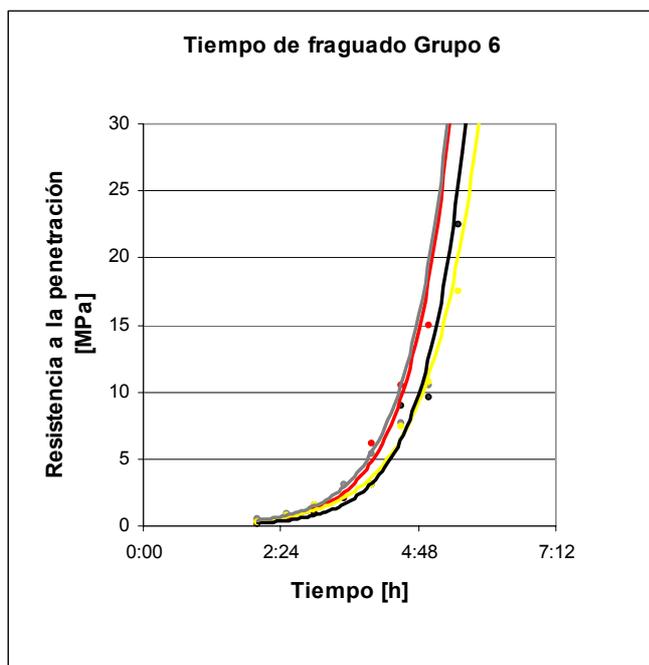


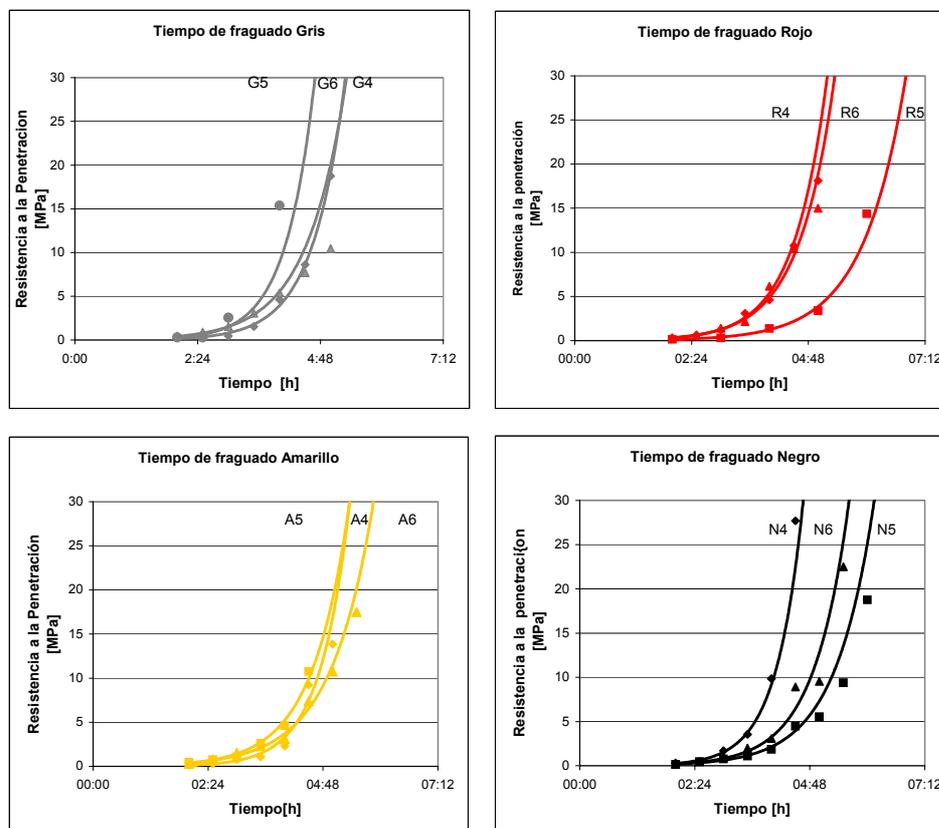
Figura 4.7 Tiempo inicial y final de fraguado para los hormigones del grupo 6

Si se analiza cada familia de hormigones de referencia y con pigmento, los resultados se presentan en la Tabla 4.6 y en la Fig. 4.8.

Tabla 4.6 Tiempo inicial y final de fraguado para los hormigones de referencia y pigmentados

Pigmento	Hormigón	a/c	As [mm]	Tiempo inicial de fraguado [horas]	Tiempo final de fraguado [horas]
Referencia	<b>G4</b>	0,44	80	4:00	5:15
	<b>G5</b>	0,62	90	3:30	4:30
	<b>G6</b>	0,65	90	3.30	5:00
Rojo	<b>R4</b>	0,45	70	3:40	5:00
	<b>R5</b>	0,55	70	5:00	6:45
	<b>R6</b>	0,59	70	3:40	5:00
Amarillo	<b>A4</b>	0,50	70	4:10	5:25
	<b>A5</b>	0,58	70	3:40	5:10

	<b>A6</b>	0,63	70	4:00	5:40
Negro	<b>N4</b>	0,44	70	3:30	4:20
	<b>N5</b>	0,55	70	4:20	6:00
	<b>N6</b>	0,61	70	4:10	5:15



**Figura 4.8 Tiempo inicial y final de fraguado para los hormigones de referencia y pigmentados**

En la Fig. 4.8 se muestra que el comportamiento de los hormigones pigmentados con óxidos rojo y negro son similares, presentando un ligero retraso en el tiempo de fraguado del grupo 5 con respecto al 6 y 4 en ese orden; este comportamiento podría explicarse debido a que la forma de las partículas es esférica, mientras que el hormigón pigmentado con amarillo tiene un comportamiento distinto y sus partículas son de forma acicular, aunque bien podría tratarse de un tema de variabilidad experimental.

En la bibliografía no se encuentran resultados específicos al respecto. VAN WALLENDael (1984) manifiesta que los pigmentos utilizados en el hormigón no tienen efectos considerables, siempre y cuando se usen en las dosis recomendadas. RAMACHANDRAN (1995) coincide también en que para las dosis

---

recomendadas no hay alteraciones en el tiempo de fraguado, pero hace referencia a que ciertos óxidos de hierro pueden producir fraguado rápido, efecto que no se produjo en esta investigación, para los materiales en estudio.

## 4.2 Hormigón en estado endurecido

### 4.2.1 Resistencia a compresión

La resistencia a compresión es una de las propiedades más importantes del hormigón en estado endurecido. La pregunta es: ¿la utilización de pigmentos sintéticos afecta esta propiedad? Y en caso afirmativo, ¿es significativa esa influencia? ¿su efecto es benéfico o perjudicial? Las respuestas se presentan más adelante, aunque quizás sea conveniente reformular la pregunta en otro sentido.

En la bibliografía el tema de la resistencia a compresión es uno de los principales aspectos en discusión y la respuesta no es una sola. La primera consideración a realizar es que si hubiera una variación en la resistencia, la causa principal no sería la concentración de pigmento en sí misma, sino el incremento de partículas muy finas y la demanda de agua que esto puede producir en el hormigón.

Como regla general, a medida que disminuye la relación agua/cemento, la resistencia aumenta. El incremento del porcentaje de pigmento en el hormigón da como resultado la adsorción de una cierta cantidad de agua (ya que es un material muy fino), que luego no está disponible para el endurecimiento del hormigón. La relación agua/cemento es efectivamente disminuida y la resistencia del hormigón se incrementa.

Otra cuestión a definir es como las características de forma y tamaño de pigmento que se utiliza influyen en el tema que se está discutiendo. ESQUEDA HUIDOBRO (1996) indica que “la cantidad de materiales colorantes que se añaden no deberá exceder del 10% del peso del cemento, dado que cantidades mayores de pigmento pueden reducir en exceso la resistencia del concreto” .

Sin embargo BÜCHNER (1991) presenta resultados de un estudio realizado en el German Institute for Material Testing, en el cual se han ensayado muestras con porcentajes de pigmento mayores al 10% en hormigones con contenido de cemento de 300 kg por metro cúbico. Esto implica un aumento de material muy fino del orden de 30 kg, lo que no tendría efecto en la resistencia del hormigón, según numerosos ensayos realizados en diferentes hormigones.

Para otro autor, RAMACHANDRAN (1995), la adición de pigmentos sintéticos no afecta adversamente la resistencia a compresión cuando se utilizan porcentajes inferiores al 6 %. Menciona que la British Standard y la American Draft Standard requieren que la resistencia a compresión de hormigones que contienen pigmentos no difiera en más del 10 % y 20 % de los hormigones de referencia, respectivamente.

Básicamente, PEREZ LUZARDO (1995) coincide, diciendo que para resistencias a la compresión entre 17 MPa y 40 MPa, utilizando un porcentaje de pigmentos sintético del 3 %, no hay alteraciones de la resistencia a compresión y a tracción.

BARRERA y otros (2002) en una investigación realizada con cemento Pórtland puzolánico y siderúrgico, con porcentajes de pigmento del 3, 5 y 7 % y uso de aditivo plastificante concluyen que la adición de pigmentos eleva la resistencia a compresión y la densidad lo que se atribuye a la incorporación de materiales muy finos.

En este trabajo la utilización de pigmento en un porcentaje del 6 %, implica para contenidos de cemento del orden de 400 kg por metro cúbico de hormigón, un incremento de 24 kg de material muy fino.

En las Fig. 4.9, Fig. 4.10 y Fig. 4.11 se presentan los diagramas de dosificación para la resistencia a compresión a las edades de 28, 91 y 182 días respectivamente. Estos diagramas permiten correlacionar la propiedad en estudio con el comportamiento en estado fresco y el consumo de cemento por metro cúbico de hormigón.

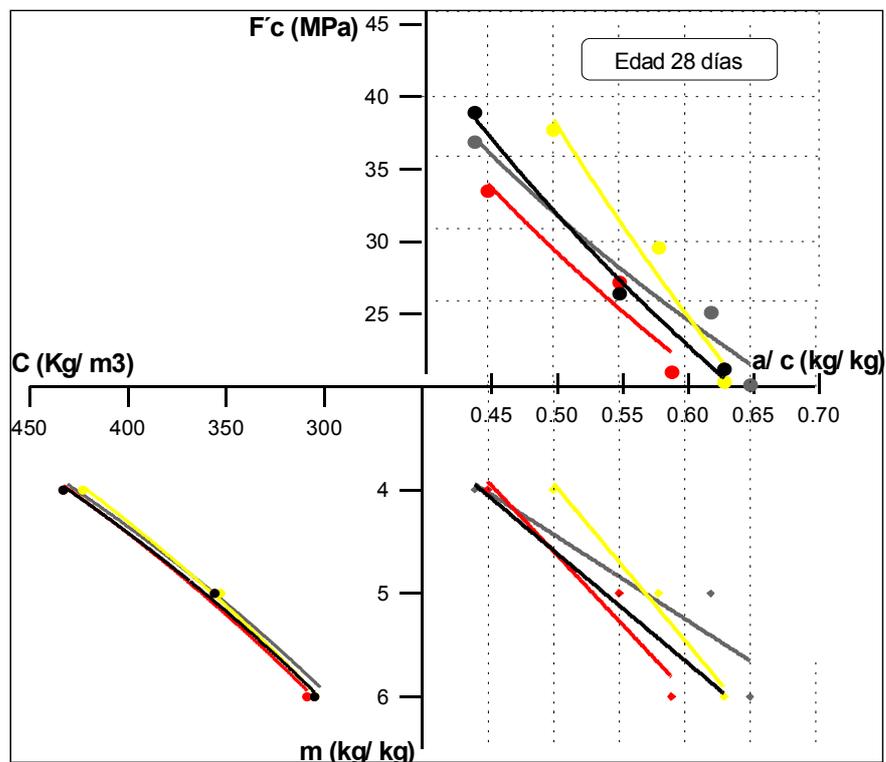


Figura 4.9: Diagrama de dosificación, resistencia a compresión, edad 28 días

Para la edad de 28 días la resistencia a compresión de los hormigones pigmentados no presenta diferencias significativas con respecto a los hormigones de referencia grises. Sin embargo, el hormigón con pigmento amarillo presenta un leve incremento de la resistencia a compresión con respecto al de referencia e inclusive con respecto a los otros pigmentados, que disminuye a medida que aumenta la relación a/c.

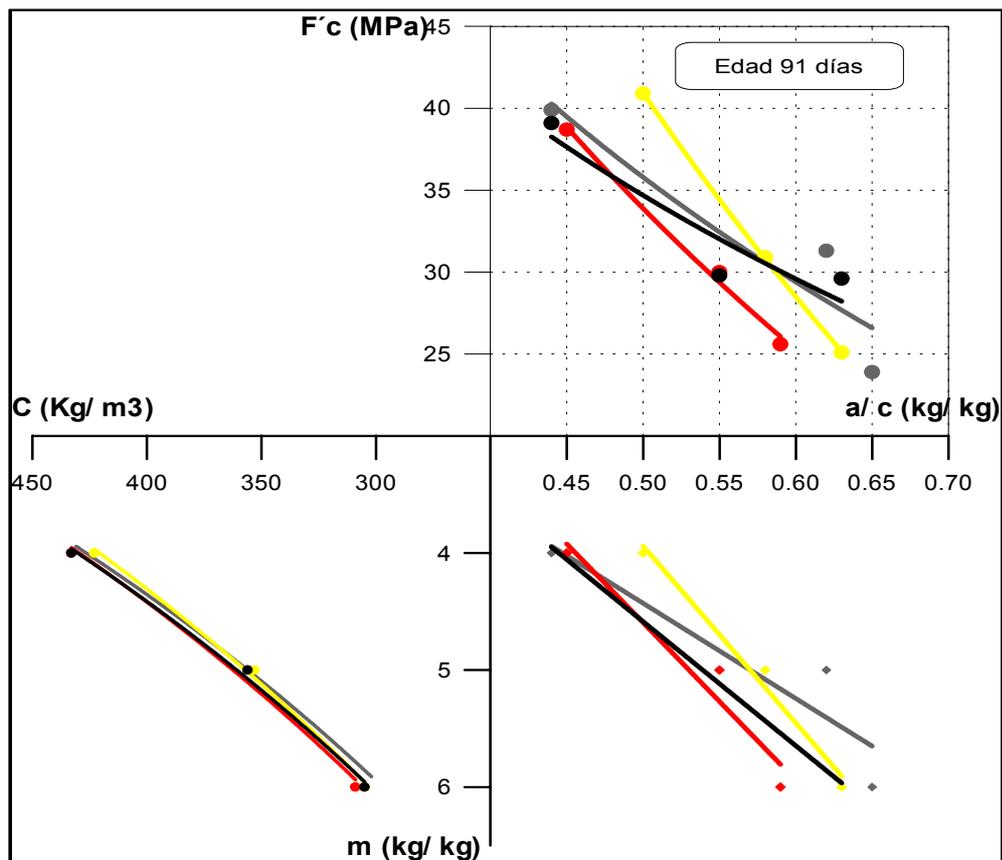
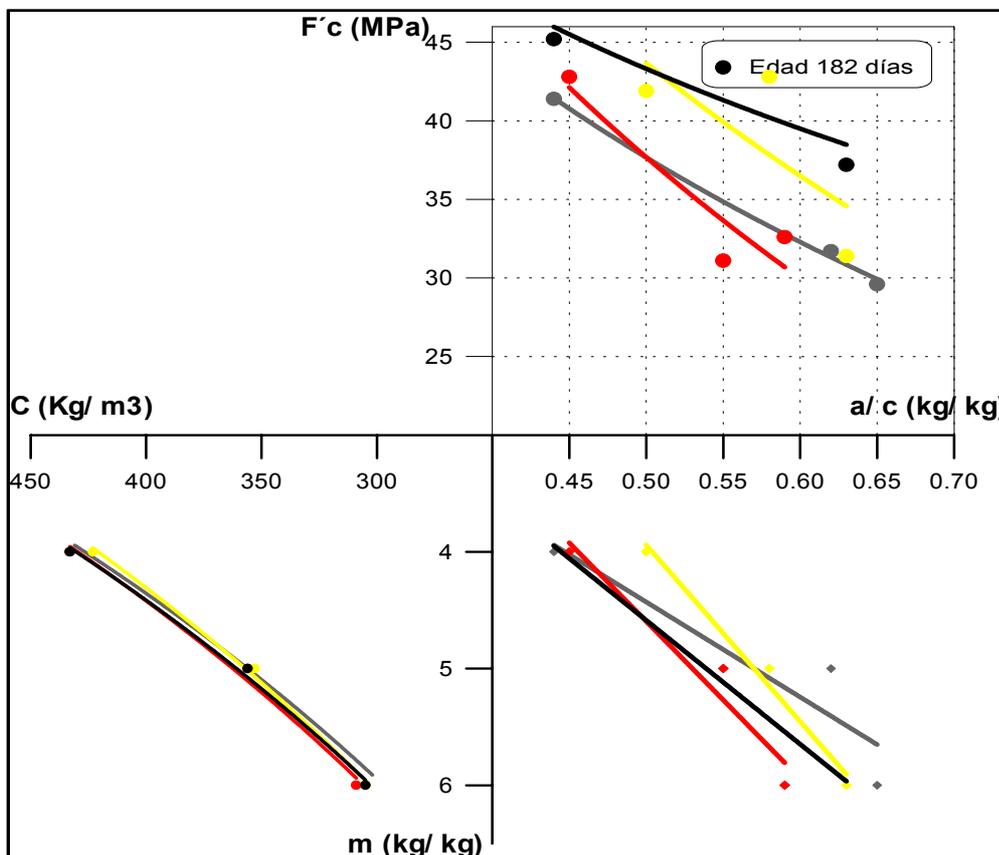


Figura 4.10 Diagrama de dosificación, resistencia a compresión, edad 91 días

Para la edad de ensayo de 91 días el comportamiento es similar, presentando el hormigón amarillo mayor resistencia a la compresión que los otros hormigones con pigmento para una relación agua/cemento menor que 0,58 aproximadamente.

Para la edad de ensayo de 182 días, la resistencia a compresión de los hormigones con pigmento negro y amarillo supera los valores obtenidos para los hormigones de referencia y los pigmentados con rojo.



**Figura 4.11 Diagrama de dosificación, resistencia a compresión, edad 182 días**

En la Tabla 4.7 se presentan las expresiones estadísticas de la resistencia a compresión en función de la relación agua/cemento para la edad de 28, 91 y 182 días para el hormigón de referencia y pigmentados.

Los resultados muestran buenos coeficientes de correlación, con la excepción de los hormigones con pigmento negro y amarillo a la edad de 182 días, probablemente por deficiencias en el ensayo.

Tabla 4.7 Evaluación estadística de la resistencia a compresión

Hormigón	Edad	Ecuación de la resistencia a compresión, $f'_c$ en función de $a/c$	$R^2$
Referencia	28 días	$f'_c{}_{28} = \frac{118,71}{13,88^{a/c}}$	0,945
Rojo		$f'_c{}_{28} = \frac{137,93}{22,09^{a/c}}$	0,910
Amarillo		$f'_c{}_{28} = \frac{389,46}{99,49^{a/c}}$	0,935
Negro		$f'_c{}_{28} = \frac{186,92}{3,56^{a/c}}$	0,999
Referencia	91 días	$f'_c{}_{91} = \frac{100,040}{7,84^{a/c}}$	0,833
Rojo		$f'_c{}_{91} = \frac{142,07}{17,70^{a/c}}$	0,988
Amarillo		$f'_c{}_{91} = \frac{265,00}{41,78^{a/c}}$	0,998
Negro		$f'_c{}_{91} = \frac{55,92}{2,94^{a/c}}$	0,900
Referencia	182 días	$f'_c{}_{182} = \frac{82,29}{4,74^{a/c}}$	0,996
Rojo		$f'_c{}_{182} = \frac{113,11}{9,17^{a/c}}$	0,803
Amarillo		$f'_c{}_{182} = \frac{119,02}{7,40^{a/c}}$	0,568
Negro		$f'_c{}_{182} = \frac{52,01}{1,59^{a/c}}$	0,265

En las Fig. 4.12, Fig. 4.13 y Fig. 4.14 se presentan los gráficos de resistencia a compresión a las edades de 28, 91 y 182 días respectivamente, en función de la relación agua/cemento para los hormigones de referencia y pigmentados. Se observa que, para todas las edades, a medida que aumenta la relación agua/cemento disminuye la resistencia a compresión, cumpliendo la ley de Abrams.

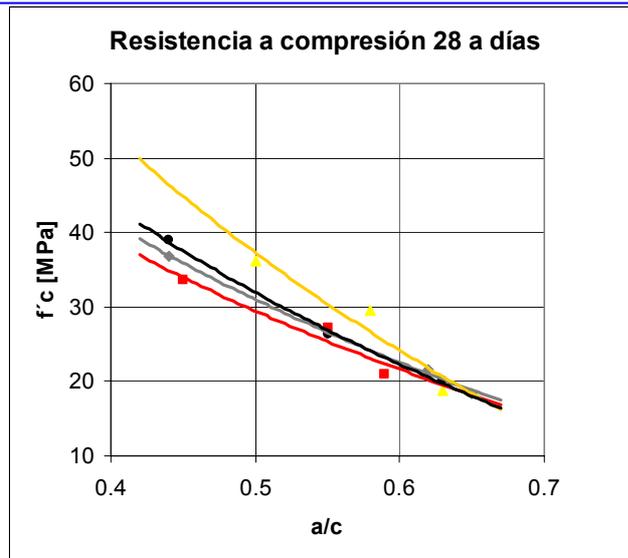


Figura 4.12 Resistencia a compresión a los 28 días en función de a/c

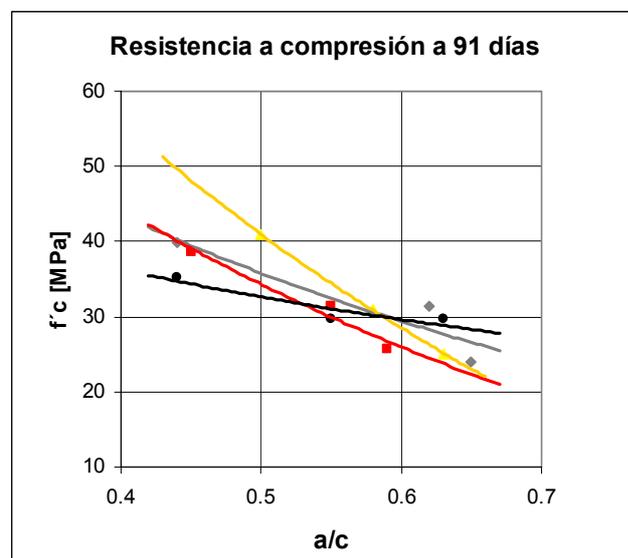


Figura 4.13 Resistencia a compresión a los 91 días en función de a/c

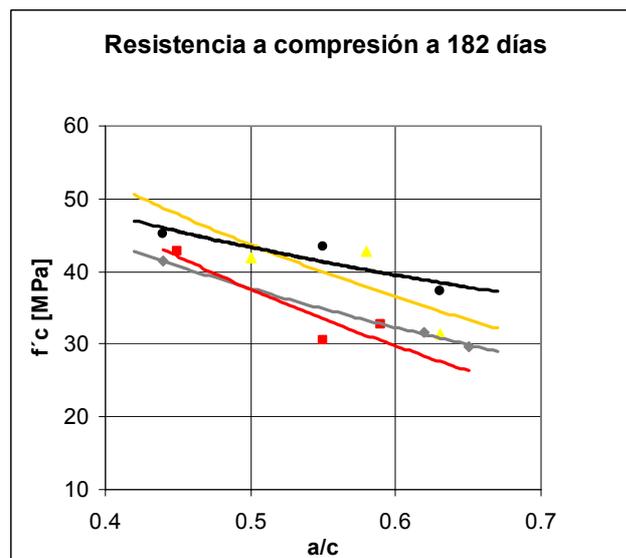
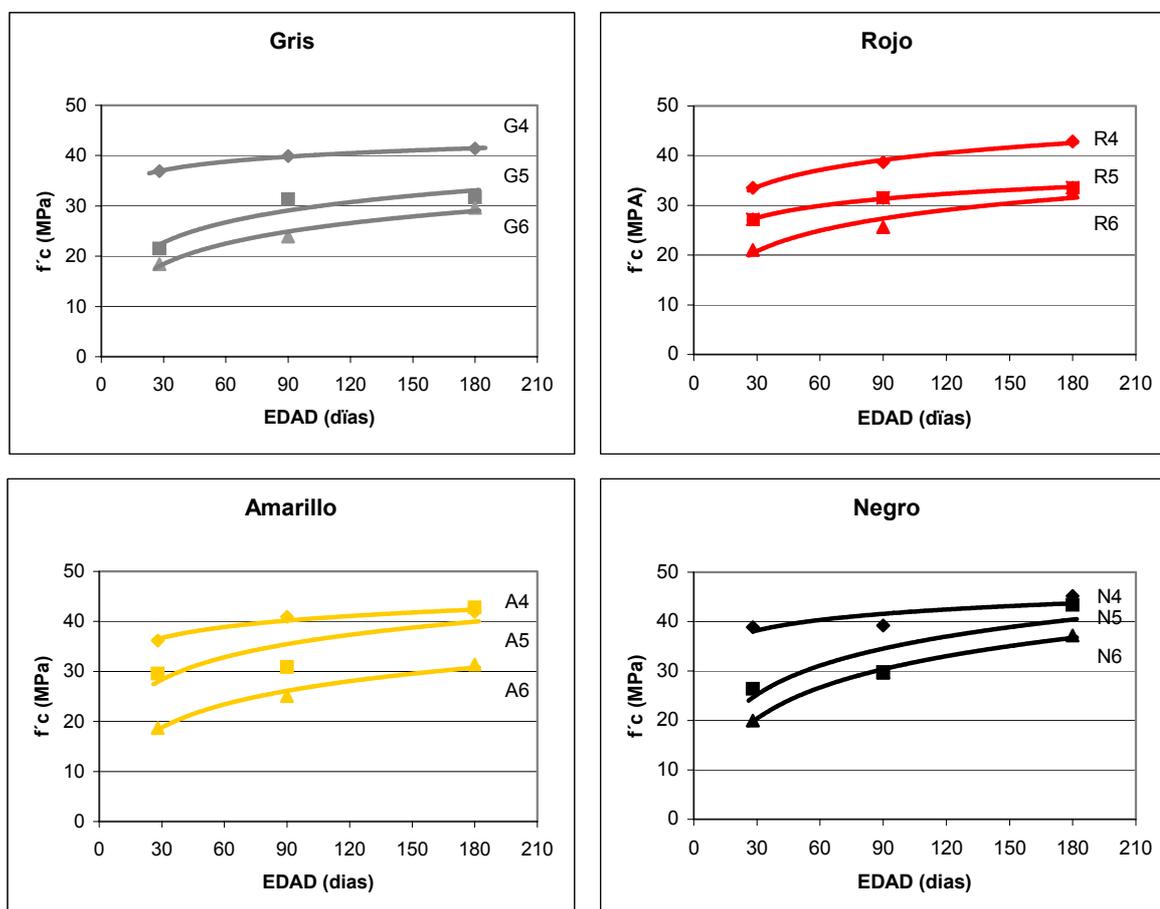


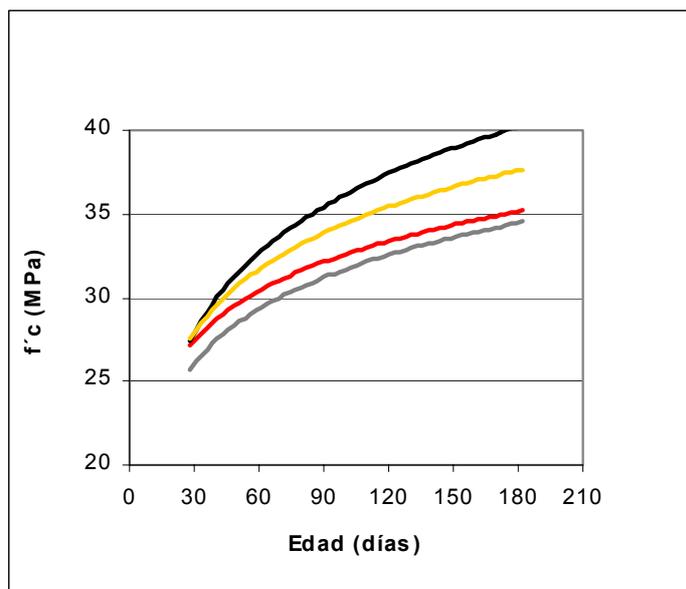
Figura 4.14 Resistencia a compresión a los 182 días en función de a/c

La evolución de la resistencia a compresión con la edad de ensayo presenta un comportamiento similar para todos los grupos de hormigones, aumentando a medida que aumenta la edad de ensayo, tal como se presenta en la Fig. 4.15.



**Figura 4.15 Evolución de la resistencia a compresión con la edad de ensayo**

La tendencia del crecimiento de la resistencia a compresión en función del tiempo es similar, presentando un leve incremento para todas las edades en los hormigones pigmentados. Por ejemplo en el caso del hormigón con pigmento negro este incremento es aproximadamente del 15% para la edad de 182 días como máximo, comparando con el hormigón de referencia. Este comportamiento se observa mejor en la Fig. 4.16 donde se presentan los resultados de resistencia a compresión, promedio de los tres grupos (4, 5 y 6) para la familia de hormigones de referencia y para los pigmentados, en función de la edad de ensayo.



**Figura 4.16 Evolución de la resistencia a compresión con la edad de ensayo para el hormigón de referencia y los hormigones pigmentados**

#### 4.2.2 Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad puede estar afectado por el régimen de curado, el tipo de agregado, las adiciones minerales usadas, los aditivos, el tipo de material cementicio, el tamaño de las probetas, la edad del ensayo, entre los más significativos y en este trabajo se analiza la influencia de la adición de los pigmentos al hormigón.

Se mantuvieron constantes el estado de humedad de las probetas en el momento del ensayo, la velocidad de aplicación de carga, las dimensiones de las probetas, la condición de encabezado y la temperatura de ensayo. En las Fig. 4.17, Fig. 4.18 y Fig. 4.19 se presentan los diagramas de dosificación para el módulo de elasticidad a las edades de 28, 91 y 182 días respectivamente.

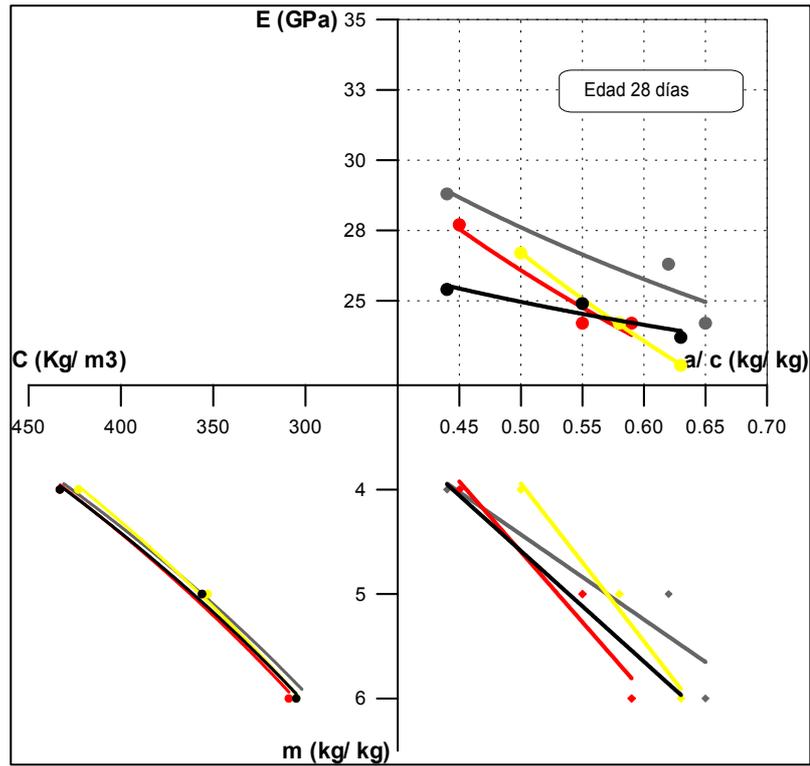


Figura 4.17 Diagrama de dosificación, módulo de elasticidad, edad 28 días

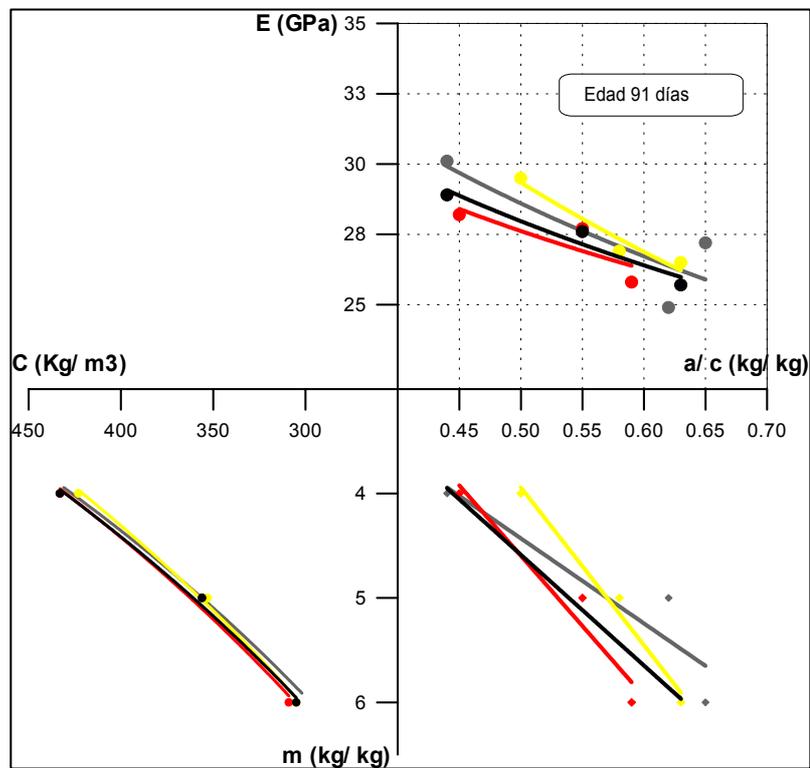
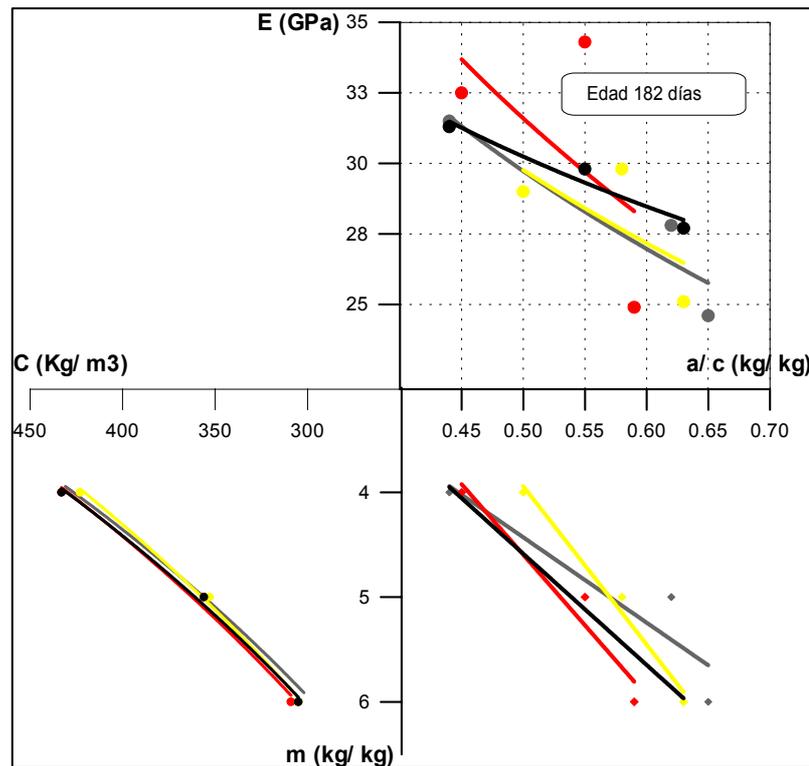


Figura 4.18 Diagrama de dosificación, módulo de elasticidad, edad 91 días



**Figura 4.19 Diagrama de dosificación, módulo de elasticidad, edad 182 días**

En la Tabla 4.8 se presentan los resultados de la evaluación estadística del módulo de elasticidad estático para las edades de 28, 91 y 182 días. Se han obtenido ecuaciones de base potencial en función de la relación agua/cemento.

Los coeficientes de correlación pueden considerarse buenos, aunque los valores bajos obtenidos para el hormigón con pigmento negro ensayado a los 28 días y para el hormigón con pigmento rojo ensayado a 182 días podrían atribuirse a la forma indirecta en que se mide y a las características propias del método, ya que la principal dificultad está en determinar simultáneamente la carga aplicada y la deformación específica resultante de la aplicación de la misma.

**Tabla 4.8 Evaluación estadística del módulo de elasticidad estático**

Hormigón	Edad	Ecuación del módulo de elasticidad $E_c$ en función de $a/c$	$R^2$
Referencia	28 días	$E_{c_{28}} = \frac{35,424}{1,718^{a/c}}$	0,766
Rojo		$E_{c_{28}} = \frac{32,139}{1,642^{a/c}}$	0,945
Amarillo		$E_{c_{28}} = \frac{50,177}{3,521^{a/c}}$	0,999
Negro		$E_{c_{28}} = \frac{29,715}{1,385^{a/c}}$	0,370
Referencia	91 días	$E_{c_{91}} = \frac{40,610}{2,009^{a/c}}$	0,675
Rojo		$E_{c_{91}} = \frac{41,070}{2,137^{a/c}}$	0,886
Amarillo		$E_{c_{91}} = \frac{44,530}{3,315^{a/c}}$	0,929
Negro		$E_{c_{91}} = \frac{38,273}{1,886^{a/c}}$	0,906
Referencia	182 días	$E_{c_{182}} = \frac{49,336}{2,731^{a/c}}$	0,854
Rojo		$E_{c_{182}} = \frac{68,368}{4,618^{a/c}}$	0,404
Amarillo		$E_{c_{182}} = \frac{49,401}{2,798^{a/c}}$	0,720
Negro		$E_{c_{182}} = \frac{42,876}{2,008^{a/c}}$	0,915

En la Fig. 4.20, Fig. 4.21 y Fig. 4.22 se presentan los resultados de ensayo de módulo de elasticidad para la familia de hormigones de referencia, grises y para los pigmentados en función de la relación agua/cemento en peso, para las edades de 28, 91 y 182 días.

Analizando estas figuras se observa la tendencia decreciente del módulo de elasticidad con el aumento de la relación agua/cemento, tanto para los hormigones de referencia como para los pigmentados. Este comportamiento se presenta para todas las edades en estudio, con un incremento de la pendiente de las curvas a medida que aumenta la edad de ensayo.

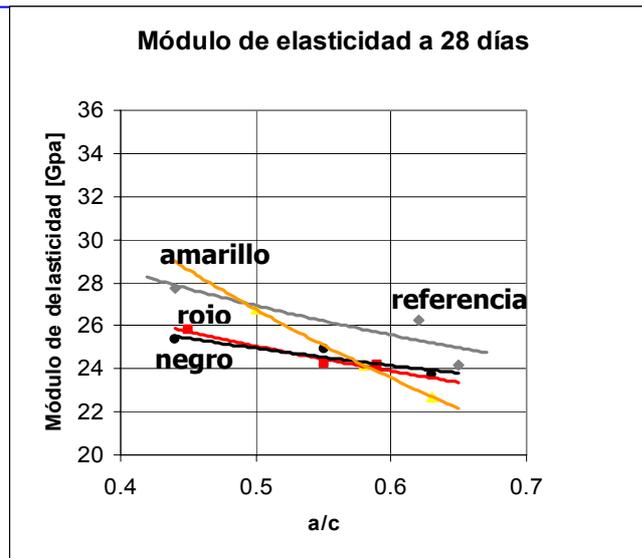


Figura 4.20 Módulo de elasticidad a los 28 días en función de a/c

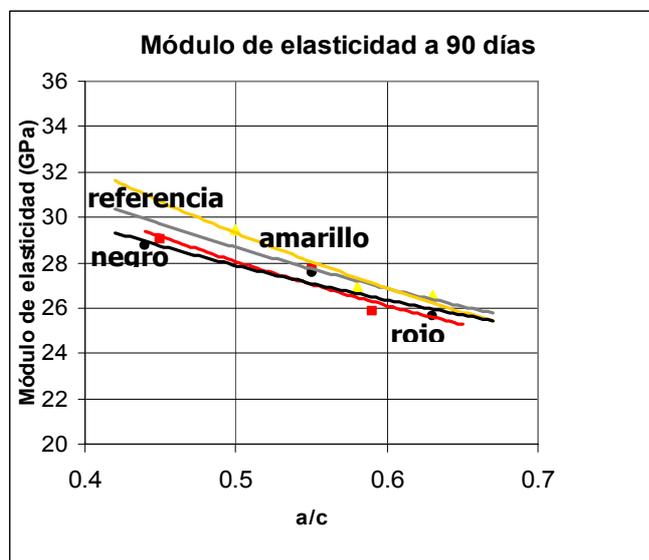


Figura 4.21 Módulo de elasticidad a los 91 días en función de a/c

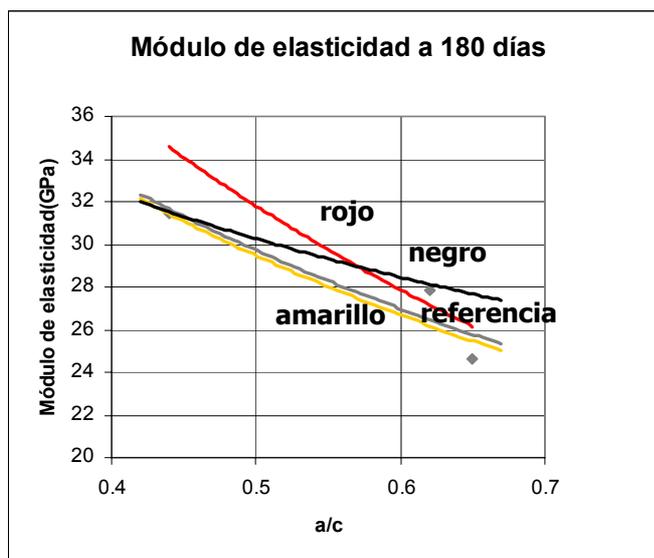
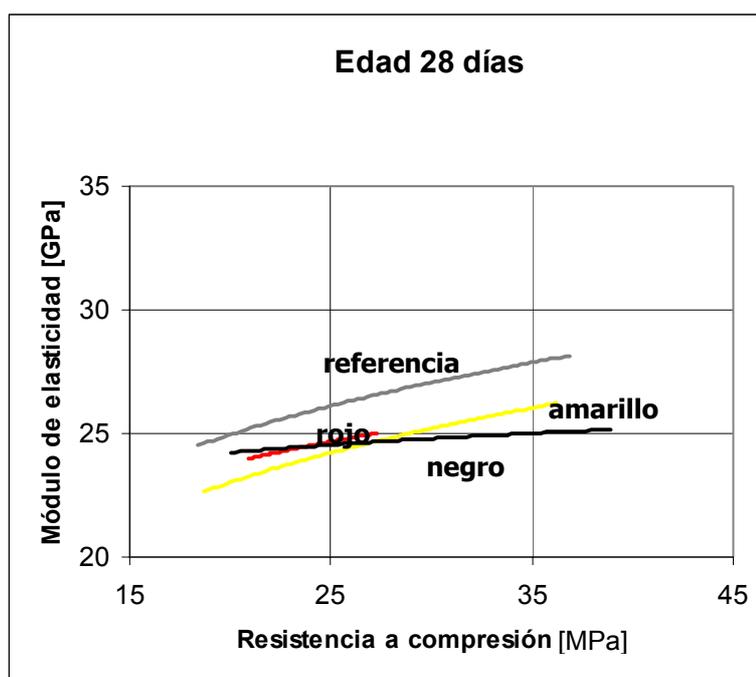


Figura 4.22 Módulo de elasticidad a los 182 días en función de a/c

En la Fig. 4.23, Fig. 4.24 y Fig. 4.25 se presentan los resultados de ensayos de módulo de elasticidad para la familia de hormigones de referencia y para los pigmentados en función de la resistencia a compresión.

En materiales heterogéneos como el hormigón, la relación directa entre resistencia a compresión y módulo de elasticidad proviene del hecho de que ambos son afectados por la porosidad de las fases constituyentes, aunque no en el mismo grado. Esto daría explicación al hecho de que el módulo aumenta con la resistencia a compresión en menor medida para la edad de 28 días, aumentando la pendiente general de las curvas cuando aumenta la edad de ensayo a 91 y 182 días, por la probable disminución de la porosidad y mayor grado de hidratación de los hormigones.



**Figura 4.23** Módulo de elasticidad en función de la resistencia a compresión a los 28 días de edad

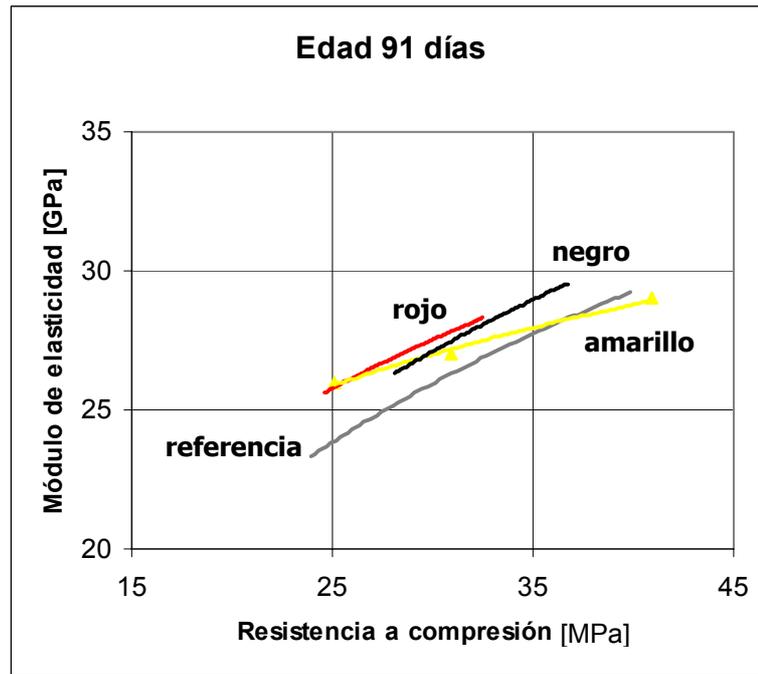


Figura 4.24 Módulo de elasticidad en función de la resistencia a compresión a los 91 días de edad

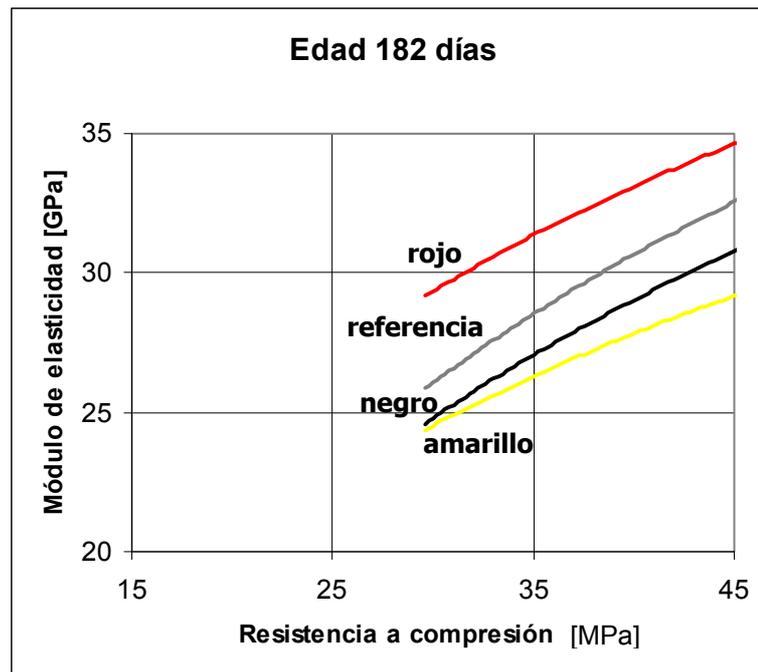


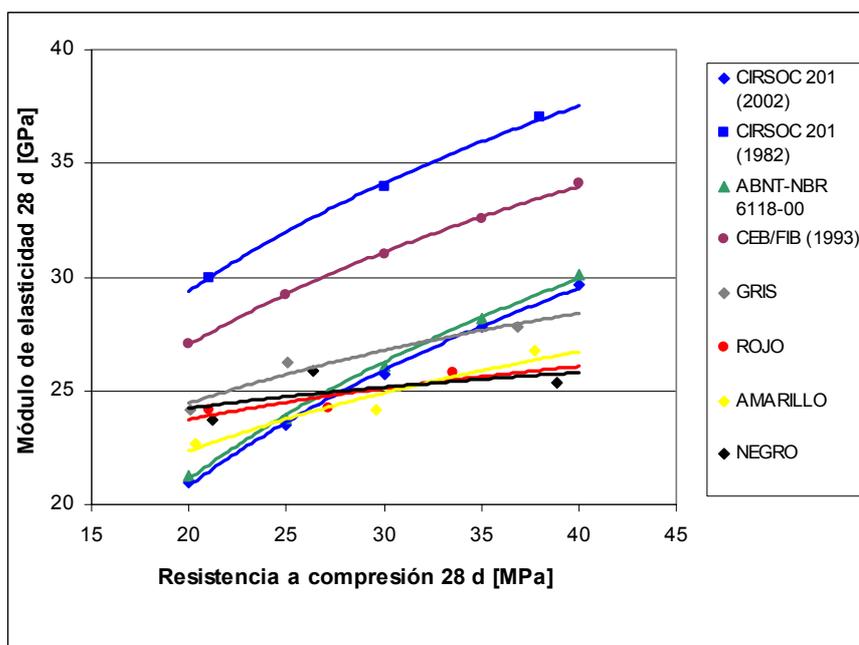
Figura 4.25 Módulo de elasticidad en función de la resistencia a compresión a los 182 días de edad

En la Tabla 4.9 se presentan las ecuaciones para la determinación del módulo de elasticidad según distintos reglamentos internacionales.

**Tabla 4.9 Expresiones del módulo de elasticidad según varios Reglamentos**

Código	Módulo de elasticidad (MPa)
CEB/FIP Model Code 1990 (1993)	$E_{ci} = \alpha \cdot 21500 (f'_{cm}/10)^{1/3}$ para $f'_{ck} \leq 80$ MPa
Brasil NBR 6118-00 Art. 8.2.8. (2003)	$E_c = 0,85 \cdot 5600 \sqrt{f'_{ck}}$
República Argentina CIRSOC 201(1982) Art.16.2	$E_b$ se tabulan hasta $f'_{ck} = 47$ MPa
República Argentina Proyecto CIRSOC 201(2002) Art.8.5	$E_c$ secante para $0,45 f'_c$ (cilíndrica) $E_c = 4700 \sqrt{f'_c}$

En la Fig. 4.26 se representan los resultados de estas ecuaciones y la representación de los valores experimentales obtenidos para el hormigón de referencia, gris, y los pigmentados a los 28 días. Se observa que los resultados del CIRSOC 201 (1982) y CEB/FIB (1993) son superiores a los del CIRSOC 201 (2002), que prácticamente coinciden con los de la ABNT-NBR 6118-00. Para los materiales estudiados y niveles de resistencia, el hormigón de referencia y los pigmentados presentan expresiones con menor pendiente, con resultados mayores que los del CIRSOC 201 (2002) para niveles de resistencia más bajos.



**Figura 4.26 Módulo de elasticidad**

---

### 4.2.3 Succión capilar

En el Capítulo 2 de esta tesis se hizo referencia a que la durabilidad del hormigón se relaciona con la facilidad con la cual los agentes agresivos pueden ingresar y moverse en su interior y se mencionó a la absorción como uno de los mecanismos de transporte.

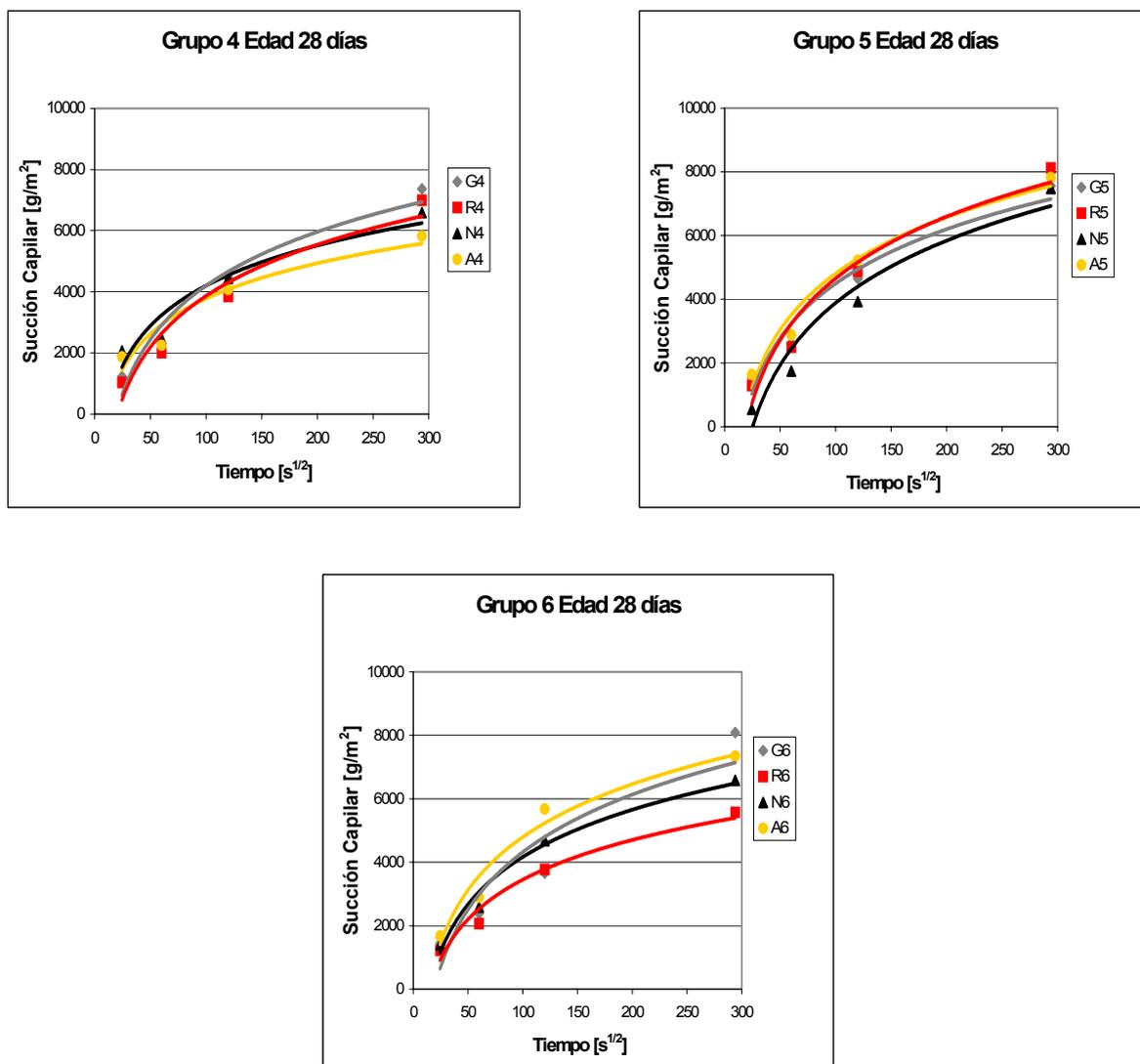
La absorción capilar de la zona de recubrimiento es un proceso de transporte que juega un rol fundamental en diversos mecanismos de transporte de deterioro del hormigón y cobra importancia cuando la estética de la superficie es primordial, como en el caso de los hormigones coloreados.

Existe un gran número de estructuras de hormigón armado que ejecutadas cumpliendo estrictamente los requisitos resistentes, al cabo de algunos años comienzan a deteriorarse (DI MAIO, 1995). Ello condujo a que en los reglamentos modernos, los requerimientos relativos a la durabilidad de las barras empotradas comenzaran a cobrar una significativa importancia.

Según algunos autores como FERNANDEZ LUCO (2001), DI MAIO (2004) y HELENE (2000), actualmente hay una fuerte tendencia a encontrar métodos que permitan evaluar aquellas propiedades de los hormigones que se encuentran directamente relacionados con su durabilidad que en la mayoría de los casos depende de manera directa de la facilidad con la que los agentes agresivos ingresan y se mueven en el interior de la estructura porosa del hormigón.

Las características de los primeros centímetros exteriores de las estructuras de hormigón armado (conocido internacionalmente como “cover concrete”) desempeñan un rol fundamental en la durabilidad de la armadura. El hormigón de recubrimiento es el que se encuentra en contacto con el medio y por lo tanto, el que constituye la barrera de protección de la zona interna condicionando el ingreso de sustancias agresivas que pueden degradar tanto al hormigón como a las armaduras. Su calidad dependerá de la estructura de poros y fundamentalmente de la distribución y conectividad de los mismos (EPERJESI, 1998).

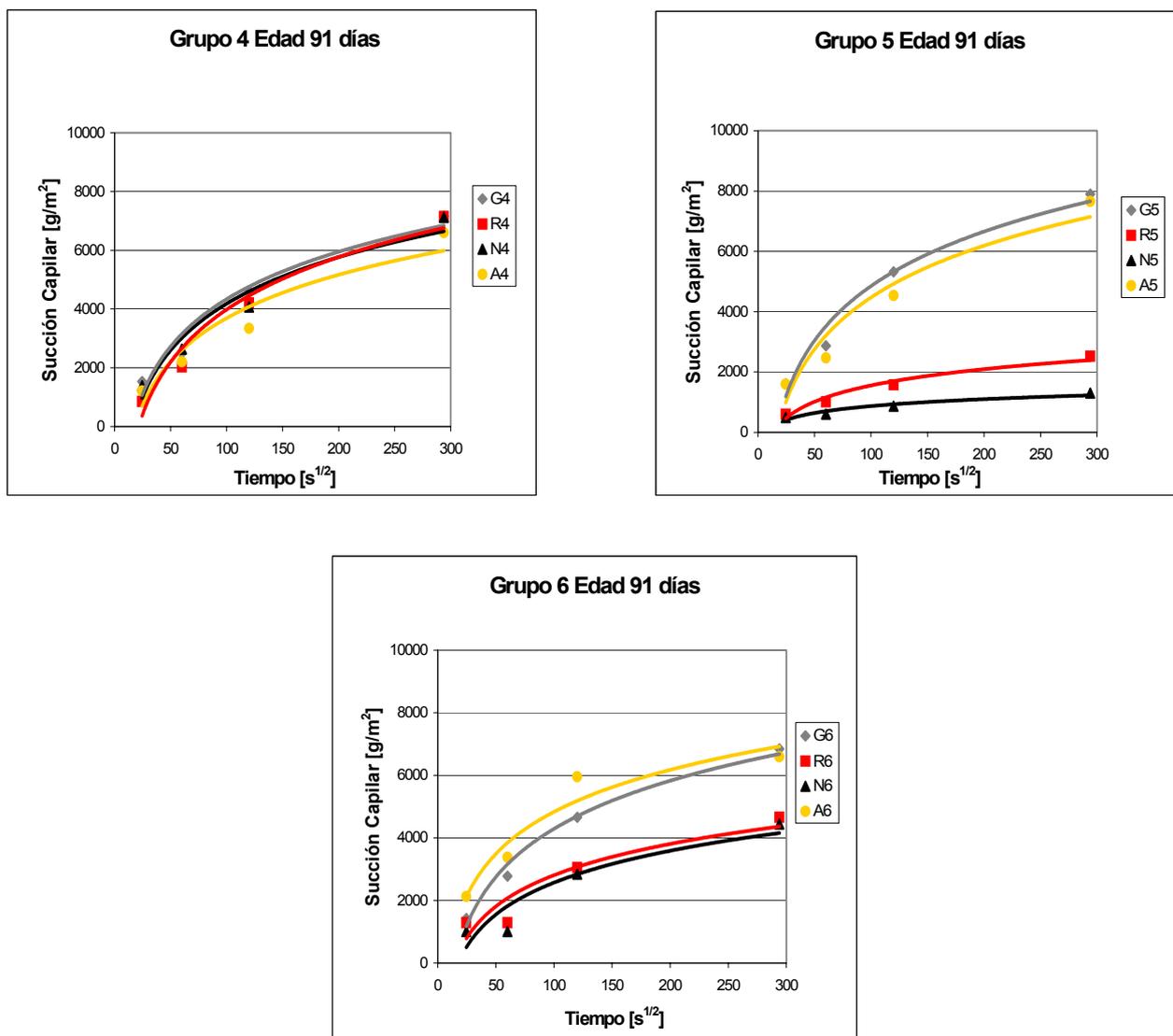
En la Fig. 4.27 se presentan los resultados de succión capilar en función de la raíz cuadrada del tiempo para cada grupo de hormigones, de referencia y pigmentados, a la edad de 28 días.



**Figura 4.27** Succión capilar en función de la raíz cuadrada del tiempo en el hormigón de referencia y pigmentados a la edad de 28 días

En el grupo 4, que posee un consumo de cemento más grande que los otros grupos, el hormigón de referencia presenta mayor succión que los hormigones pigmentados, mientras que en los grupos 5 y 6 no se observa un comportamiento tan claro entre el hormigón de referencia y los pigmentados, aunque en el grupo 6 el hormigón con pigmento amarillo presenta mayor succión.

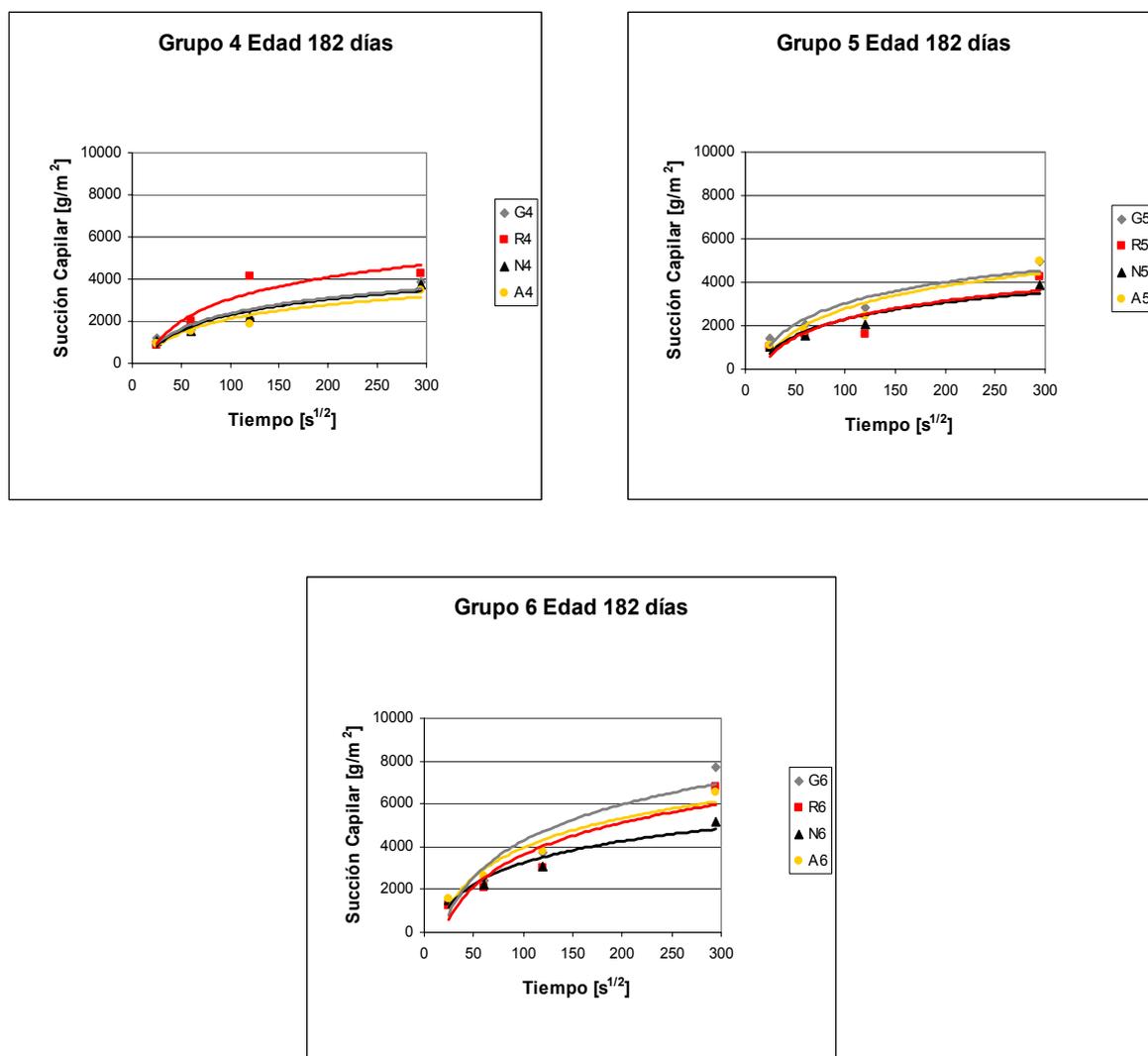
En la Fig. 4.28 se presentan los resultados de succión capilar en función de la raíz cuadrada del tiempo en el hormigón de referencia y pigmentados a la edad de 91 días.



**Figura 4.28** Succión capilar en función de la raíz cuadrada del tiempo en el hormigón de referencia y pigmentados a la edad de 91 días

Para la edad de 91 días, el hormigón de referencia de los grupos 4 y 5, que poseen mayor consumo de cemento que el grupo 6, presenta mayor succión que los hormigones pigmentados, mientras que en el grupo 6 el hormigón amarillo mantiene un comportamiento similar a la edad de 28 días, con mayores valores de succión capilar que el hormigón de referencia.

Si se analiza el hormigón de referencia y los pigmentados individualmente, los resultados de succión capilar en función de la raíz cuadrada del tiempo a la edad de 182 días se presentan en la Fig. 4.29.

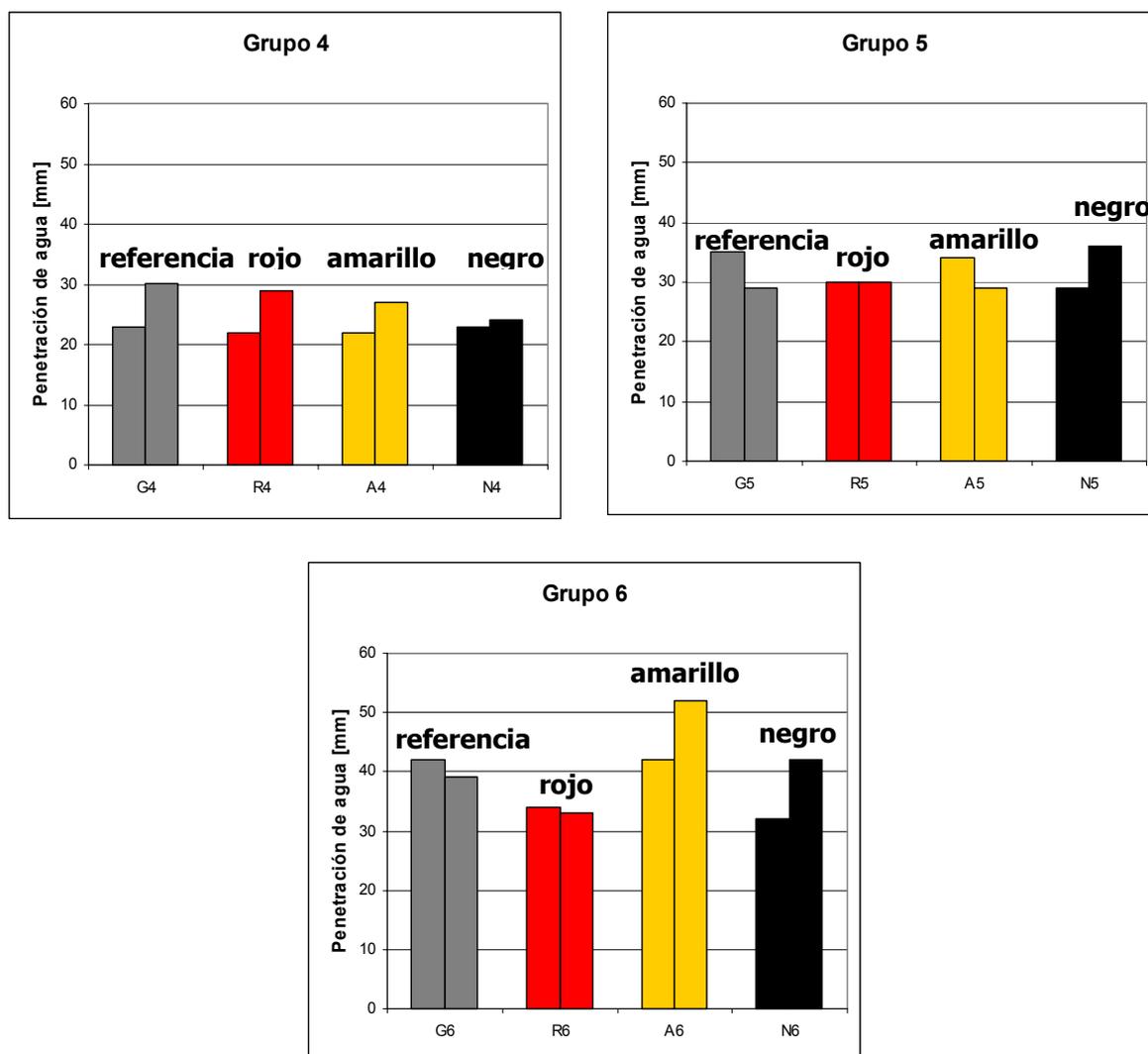


**Figura 4.29** Succión capilar en función de la raíz cuadrada del tiempo en el hormigón de referencia y pigmentados a la edad de 182 días

Para la edad de 182 días, el hormigón de referencia de los grupos 5 y 6, presenta mayor succión capilar que los hormigones pigmentados, mientras que en el grupo 4 el hormigón rojo presenta un comportamiento similar a la edad de 28 días, con mayores valores de succión capilar que el hormigón de referencia. Se puede observar que una mayor edad de los hormigones implica una menor succión capilar, debido a que la influencia de la porosidad en los mecanismos de transporte se debilita cuando progresan los procesos de hidratación como consecuencia de la reducción de la conectividad y reducción del tamaño de los capilares.

#### 4.2.4 Permeabilidad al agua

En la Fig. 4.30 se presentan los resultados obtenidos del ensayo de penetración de agua a presión para el hormigón de referencia y los hormigones pigmentados para dos edades de ensayo, de acuerdo a lo presentado en el Capítulo 3, Sección 3.4.3.

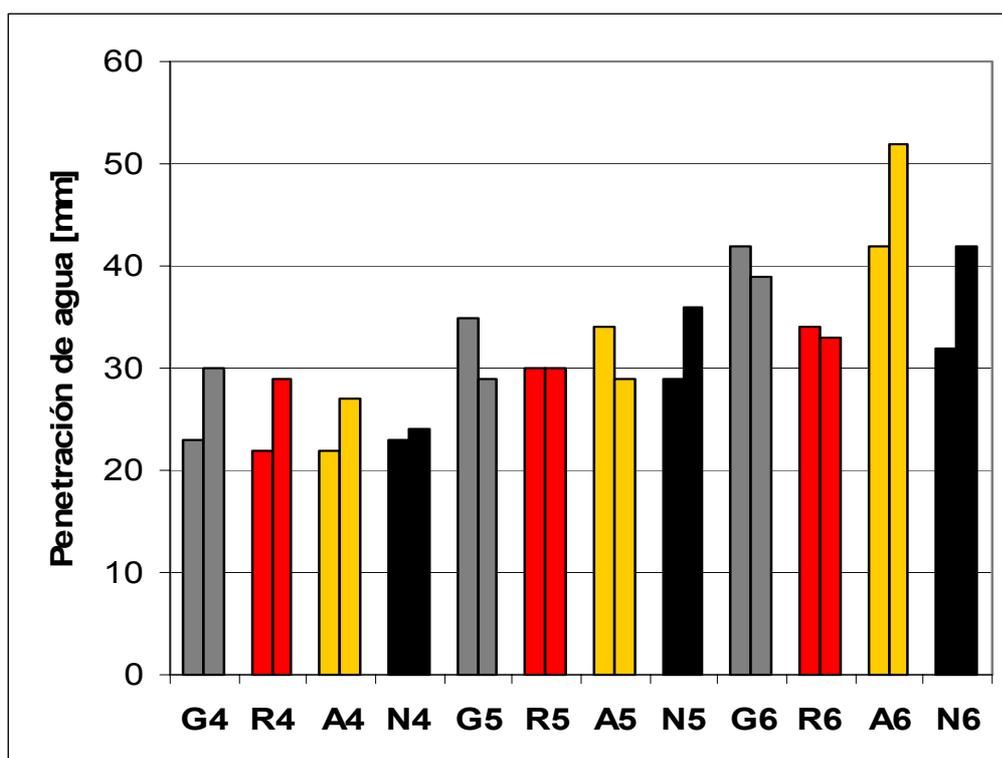


**Figura 4.30 Penetración de agua bajo presión para el hormigón de referencia y pigmentados**

La penetración de agua tiene valores del orden de 20 a 30 mm, similares entre sí, para los hormigones del grupo 4, que son los de menor relación agua/cemento; en el grupo 5 supera levemente los 30 mm y en el grupo 6 está en el orden de los 30 a 40 mm. El hormigón de referencia, independientemente del

grupo, tiene mayor profundidad de penetración que los hormigones pigmentados, salvo el hormigón amarillo en el grupo 6.

Considerando los resultados obtenidos para el hormigón de referencia, gris, en comparación con los hormigones con pigmento, para todos los grupos se observa en la Fig. 4.31 que la influencia de los pigmentos resulta favorable o tiene poca influencia en esta propiedad, salvo el que contiene pigmento amarillo y menor consumo de cemento, es decir el del grupo 6. Aunque en la bibliografía hay muy poca información disponible sobre ensayos de permeabilidad al agua en hormigones coloreados, este último concepto coincide con los resultados presentados por CARVALHO (2000) en hormigones con pigmentos ensayados a 28 días.

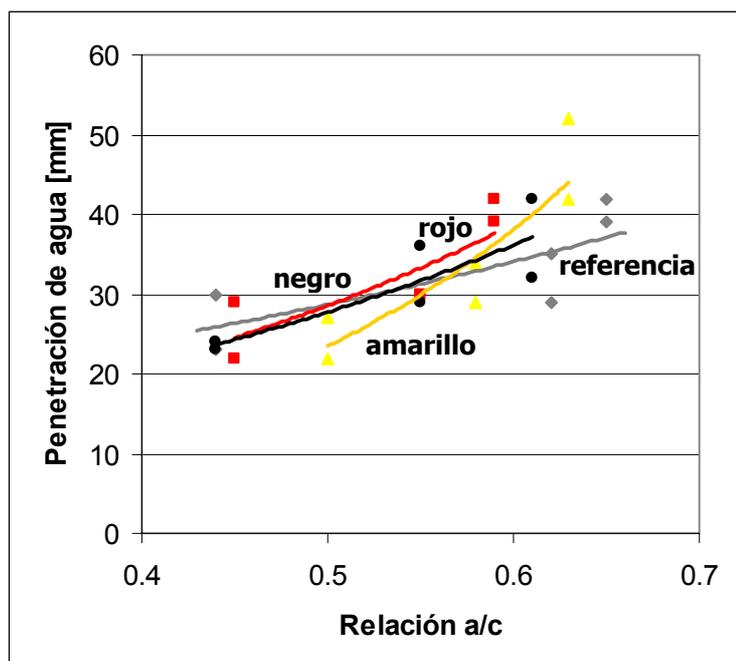


**Figura 4.31 Comparación de la penetración de agua a presión de la familia de hormigones**

Otra consideración es la vinculación de la penetración de agua con la relación agua/cemento; cuando la relación agua/aglomerante es alta, el hormigón es muy poroso y sus capilares están interligados. La presencia de agua libre en la mezcla es la que crea esta red completamente interligada de canales a través de

los cuales el agua puede fluir cuando es aplicado un gradiente de presión (AİTCIN, 2000).

En la Fig. 4.32, la penetración de agua aumenta a medida que aumenta la relación agua/cemento para todos los grupos de hormigones, aunque en distinto porcentaje, manifestándose en la pendiente de las curvas obtenidas.



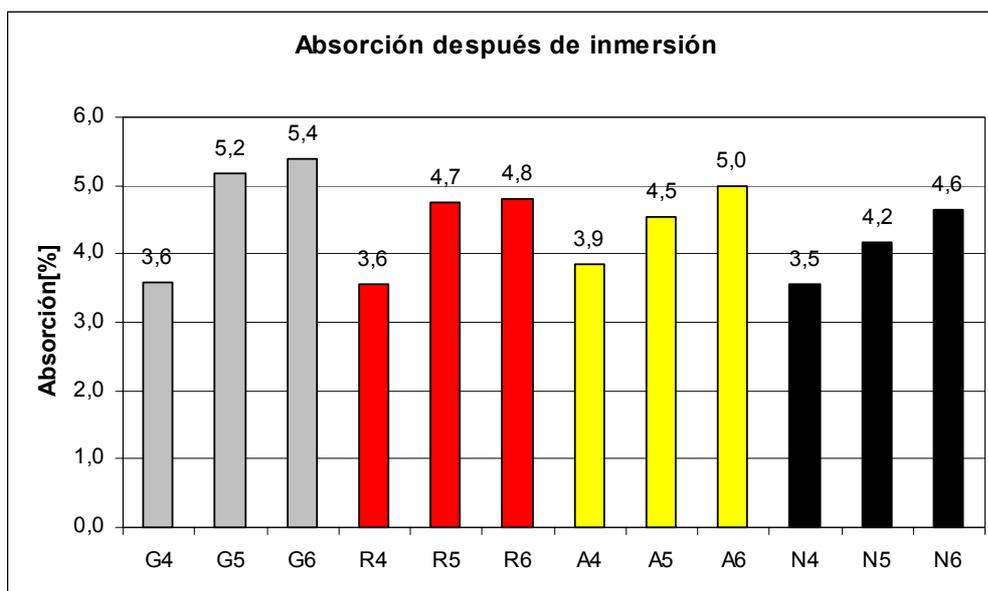
**Figura 4.32 Penetración de agua a presión en función de la relación agua/cemento para el hormigón de referencia y los pigmentados**

El hormigón con pigmento amarillo presenta una curva con mayor pendiente y los valores de penetración de agua superan a los del hormigón de referencia para una relación a/c mayor de 0,55 aproximadamente. Esto podría explicarse por la forma acicular de las partículas de pigmento y la mayor demanda de agua que esto produce. En el caso de los hormigones con pigmento negro y rojo, el aumento de la penetración de agua ocurre para una relación a/c mayor a 0,50, aunque la pendiente de las curvas es similar a la del hormigón de referencia gris.

#### 4.2.5 Absorción e índice de vacíos

En la Fig. 4.33 se presentan los resultados de absorción por inmersión para el hormigón de referencia y los pigmentados; se observa que el hormigón de referencia presenta, en general, mayor absorción por inmersión que los hormigones pigmentados, probablemente por un refinamiento de la estructura de poros.

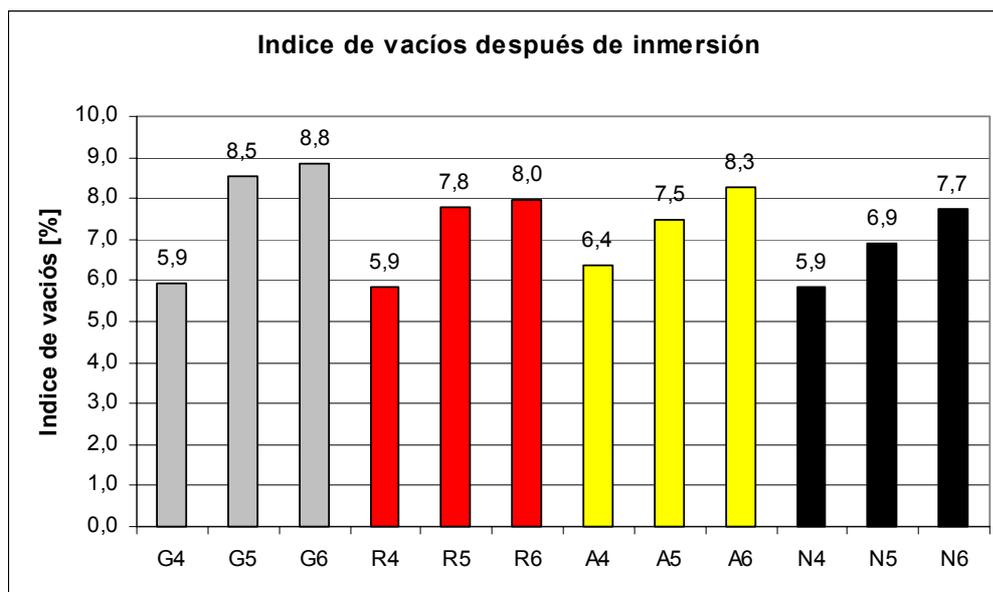
Resulta de interés destacar que los hormigones de mayor relación agua/cemento, de referencia o pigmentados, muestran mayores resultados de absorción, probablemente por un exceso del contenido de agua, superior a la necesaria para producir las reacciones químicas de hidratación.



**Figura 4.33 Resultados de absorción por inmersión para el hormigón de referencia y los pigmentados**

Si se comparan los hormigones de referencia con los pigmentados, a medida que aumenta la relación agua/cemento, en los hormigones pigmentados el incremento de la absorción es menos significativo: la influencia de la incorporación de pigmento resulta claramente marcada; por ejemplo el hormigón de referencia pasa de una absorción de 3,6 % a 5,4 %, mientras que el hormigón con pigmento rojo pasa del mismo valor inicial de absorción al 4,8 % y el negro a 4,6 %.

La Fig. 4.34 muestra los resultados del índice de vacíos por inmersión para el hormigón de referencia y los pigmentados; se observa que el índice de vacíos es menor para los hormigones pigmentados. Considerando los hormigones de referencia, a mayor relación agua/cemento, mayor índice de vacíos, comportamiento que se repite para los hormigones coloreados con el mismo pigmento.



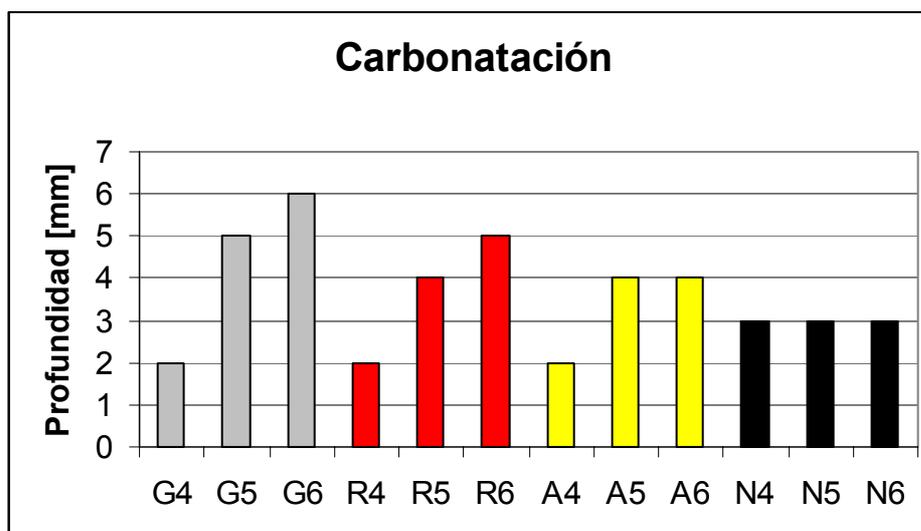
**Figura 4.34 Resultados de índice de vacíos por inmersión para el hormigón de referencia y los pigmentados**

Aquí también se pone de manifiesto la influencia de los pigmentos ya que el índice de vacíos se incrementa para todos los hormigones según aumenta la relación agua/cemento, en menor proporción para los hormigones pigmentados.

Resulta de especial interés la disminución del índice de vacíos de los hormigones pigmentados con respecto a los hormigones de referencia, para relaciones agua/cemento mayores.

#### 4.2.6 Carbonatación

La carbonatación cobra importancia si la estructura de hormigón está armada, ya que cuando la reacción alcanza la armadura, ocurre la despasivación de la misma como consecuencia de la disminución del pH, existiendo posibilidades de corrosión. En la Fig. 4.35 se presentan los resultados de la medición de la profundidad de carbonatación, por grupos, para el hormigón de referencia y los pigmentados; se observa que la profundidad de carbonatación es mayor en los hormigones de referencia que en los pigmentados.



**Figura 4.35 Profundidad de carbonatación, por grupos, para el hormigón de referencia y los pigmentados**

Los resultados obtenidos muestran que a mayor relación agua/cemento, en general, la carbonatación es levemente mayor para todos los grupos, excepto para el hormigón pigmentado con óxido negro en el que los valores se mantienen constantes, aunque resulta de interés destacar que este hormigón presenta resultados menores para las relaciones agua/cemento más altas cuando se compara con los otros hormigones pigmentados, inclusive comparando con los hormigones de referencia.

Estos resultados difieren de los obtenidos por CARVALHO (2000) quien presenta resultados de profundidad de carbonatación en hormigones de consistencia plástica con cemento gris en los que a la edad de un año el hormigón de referencia y el amarillo tienen 6 mm y los hormigones rojo y negro tienen 4 mm.

---

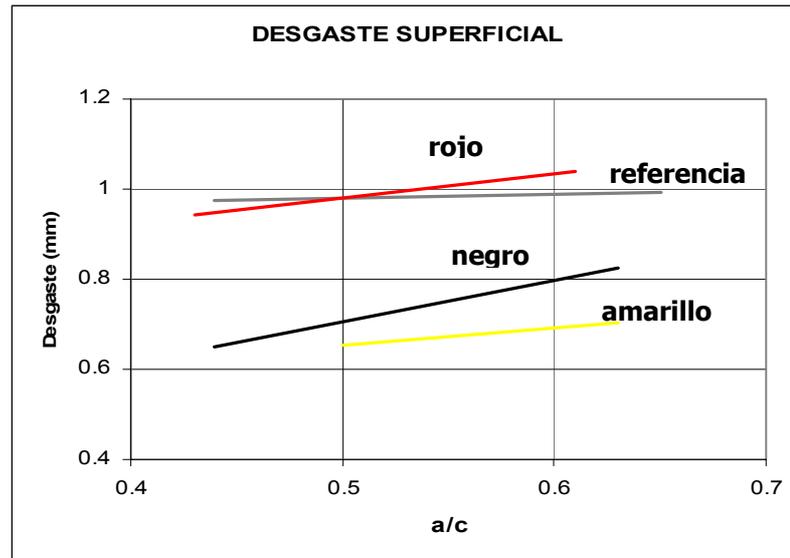
#### 4.2.7 Abrasión

La resistencia al desgaste está asociada a la resistencia intrínseca del hormigón y los daños que se producen en las estructuras pueden variar desde lesiones estéticas, leves, hasta la desagregación del agregado y la pasta de cemento, con la exposición de la armadura, cuando el hormigón es armado (MANUAL RED REHABILITAR, 2003). En general, el hormigón que exuda poco tiene una capa superficial más fuerte y por lo tanto es más resistente a la abrasión.

Debido a la diversidad de factores que intervienen en el desgaste superficial del hormigón es difícil realizar una evaluación en laboratorio, ya que la acción perjudicial varía, dependiendo de la causa de deterioro y prácticamente no hay un procedimiento de ensayo que sea satisfactorio para cuantificar la resistencia del hormigón en esas condiciones de uso. Según NEVILLE (1997), en todas las pruebas, la profundidad de desgaste de una muestra se emplea como medida de la abrasión y LIU (1994) encontró una buena correlación entre la relación agua/cemento y la resistencia del hormigón a la abrasión.

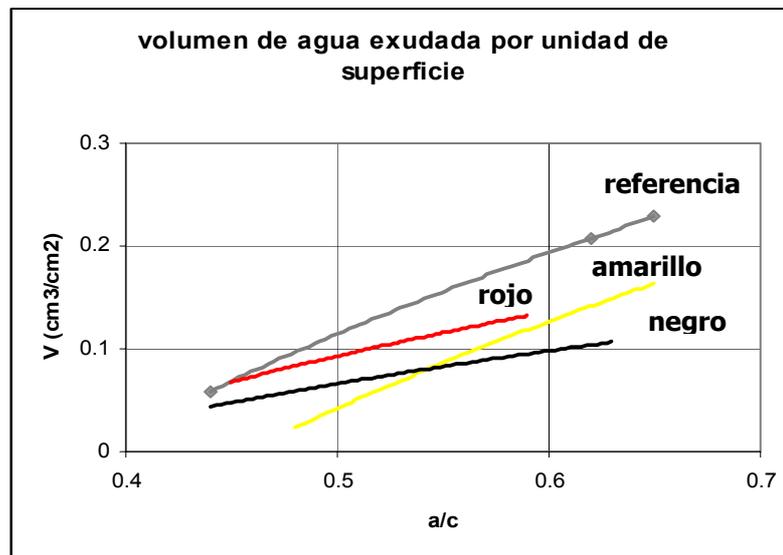
En este trabajo, la adaptación a los hormigones del método utilizado para baldosas provee información que si bien no puede ser utilizada para realizar comparaciones cuantitativas con otros trabajos, permite comparar el comportamiento de los hormigones de referencia con los pigmentados.

En la Fig. 4.36 se presentan los resultados de desgaste en función de la relación agua/cemento, mostrando un incremento del desgaste a medida que se incrementa la relación a/c, con valores ligeramente superiores para el hormigón de referencia.



**Figura 4.36 Variación de la profundidad de desgaste en función de a/c**

Según NEVILLE (1997) el hormigón que exuda poco tiene una capa superficial más fuerte y por lo tanto más resistente a la abrasión. Coincidiendo con este concepto, en la Fig. 4.37 se presentan resultados en los que el hormigón de referencia tiene mayor volumen de agua exudada por unidad de superficie que los hormigones pigmentados, correlacionándose con la mayor profundidad de desgaste obtenida en los ensayos realizados.



**Figura 4.37 Volumen de agua exudada por unidad de superficie**

Este comportamiento es de especial relevancia para aplicaciones en superficies exigidas al desgaste, como por ejemplo en pisos industriales.

### 4.2.8 Coordenadas cromáticas y mediciones de color

Las coordenadas cromáticas  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$  son las que se suelen emplear en la gran mayoría de las normativas de análisis del color. Su principal ventaja está en que se evitan los errores de percepción de las cartas de color. En este estudio se utiliza la luminosidad  $L^*$  y también se consideró necesario utilizar otra estimación del color además de la luminosidad, por ejemplo la saturación o croma  $C$ , como medición de la intensidad de color.

En la Fig. 4.38 se presenta la variación de la luminosidad durante el ciclo de envejecimiento acelerado de 1200 horas; en el grupo de hormigones de referencia la máxima desviación está en el orden de las 3 unidades antes de realizar la limpieza, mientras que después disminuye, alcanzando valores cercanos a la unidad o incluso menores. En los hormigones pigmentados la luminosidad aumenta durante la exposición, en coincidencia con lo expresado por CARVALHO (2000) probablemente debido a la presencia de eflorescencias y luego de la limpieza, en general, disminuye hasta prácticamente los valores iniciales.

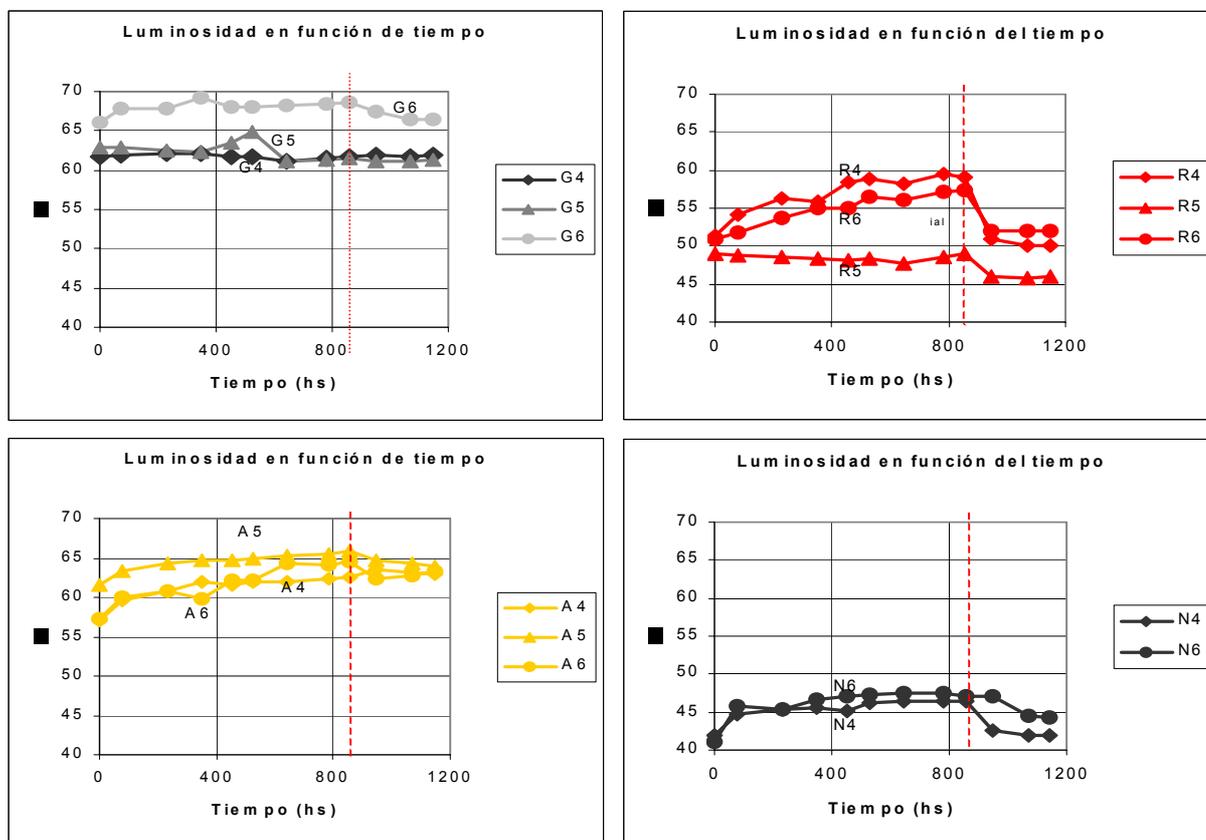
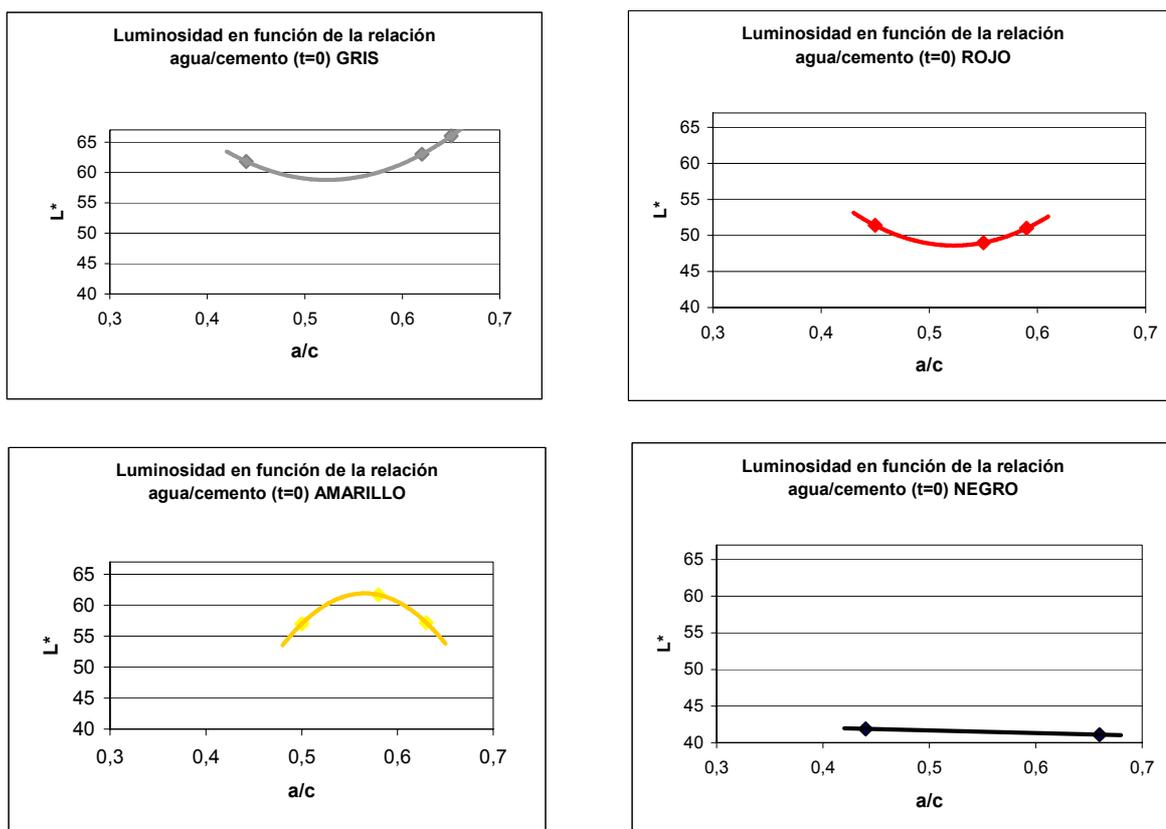


Figura 4.38 Variación de la luminosidad durante el ciclo de envejecimiento

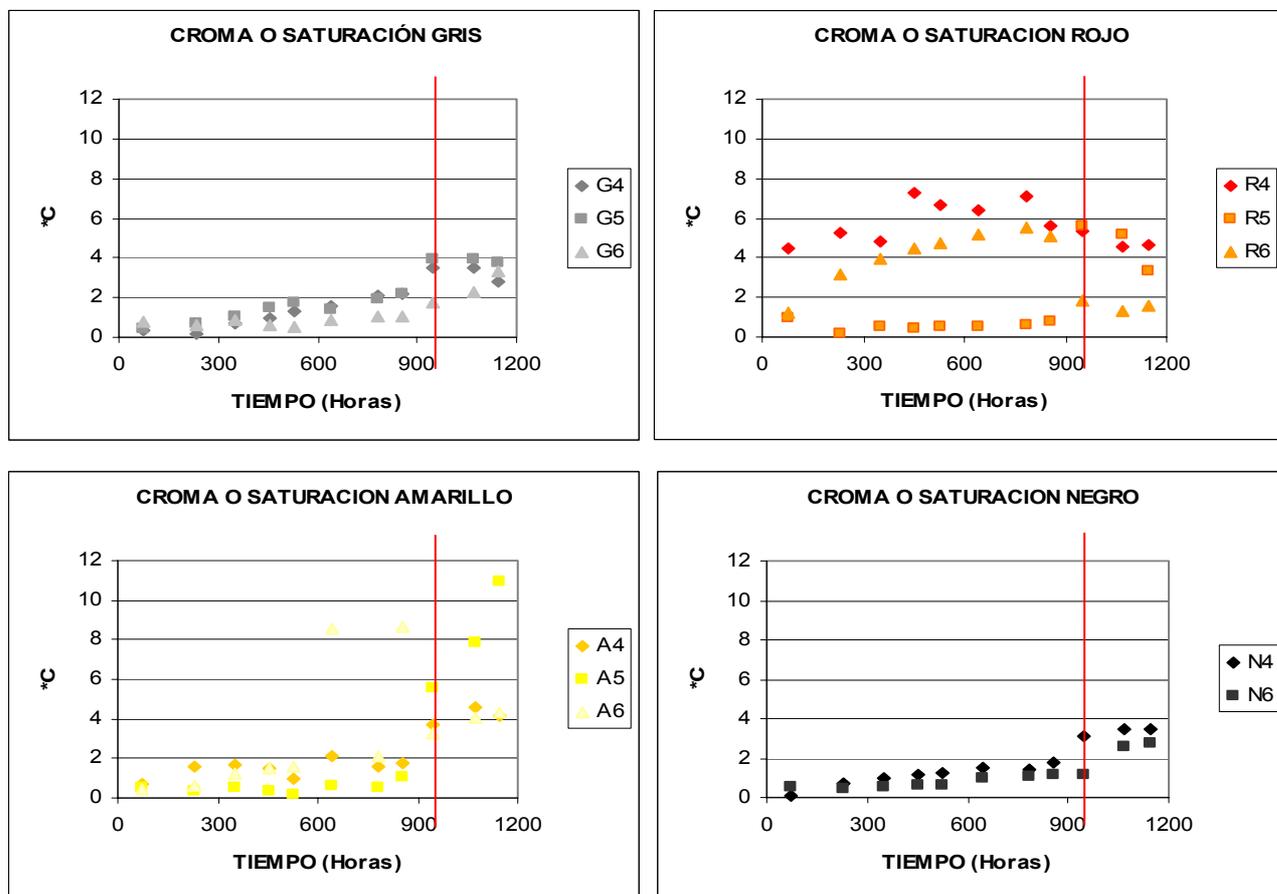
En la Fig. 4.39 se presenta la variación de la luminosidad de las muestras en función de la relación agua/cemento; el hormigón de referencia muestra un valor mínimo para una relación agua/cemento cercana a 0,5–0,52, prácticamente igual al pigmentado con rojo, mientras que el amarillo presenta un máximo para este rango de relación agua/cemento.



**Fig. 4.39 Variación de la luminosidad de las muestras en función de la relación a/c**

Si bien la influencia es reducida, coincidiendo con CARVALHO (2000), cabe mencionar que este concepto es discutido en la bibliografía, ya que en algunas publicaciones se menciona que el color se “aclara” según aumenta la relación agua/cemento (SALDAÑA ARIAS, 1992; Concreto colorido, BAYER, 1999) y en otras hace referencia a que la coloración final es más oscura a mayor relación agua/cemento (Treinamento Técnico, BAYER, 2001).

En la Fig. 4.40 se presenta la variación de la saturación durante el período de envejecimiento acelerado.

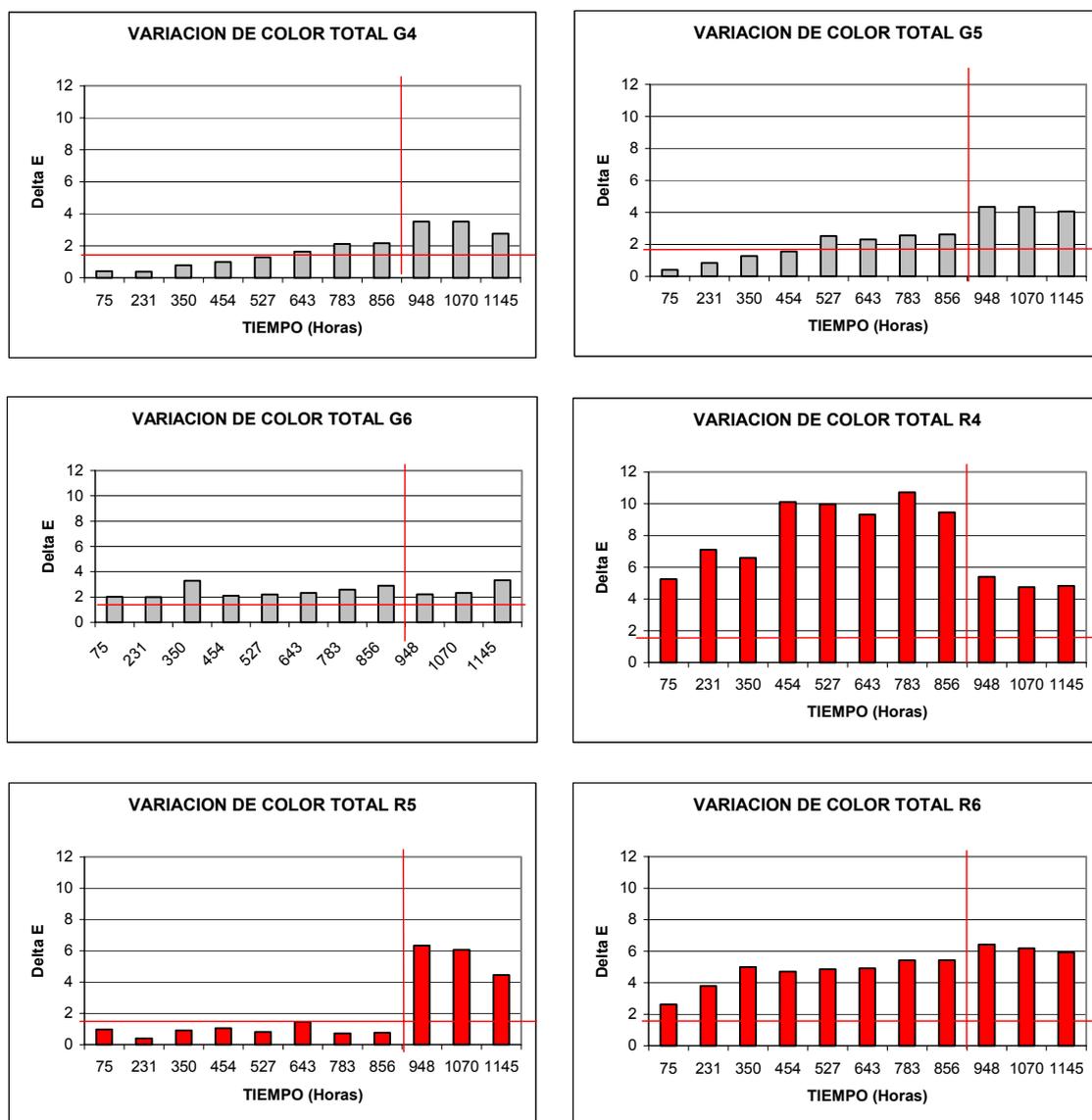


**Figura 4.40 Variación de la saturación durante el ciclo de exposición; la saturación, en general aumenta dando tonos más vivos, después de la limpieza de las muestras**

En el hormigón de referencia y en los pigmentados con rojo y negro, la saturación se incrementa, especialmente después de la limpieza, destacándose principalmente el hormigón con pigmento amarillo, en el que el valor del croma se incrementa notablemente, dando como resultado colores más vivos. El hormigón rojo presenta mayor dispersión en los valores de saturación, disminuyendo después de la limpieza, logrando en general tonos más apagados o similares a los iniciales.

La saturación de las muestras aumenta levemente durante el envejecimiento posiblemente debido a la presencia de eflorescencias y considerablemente después de la limpieza debido a la remoción de la misma.

Para completar el análisis de las parámetros de cromaticidad, se presentan en la Fig. 4.41 las variaciones de color total indicando con una línea horizontal roja el valor de  $\Delta E^* = 1,5$  ya que valores menores que éste son imperceptibles para el ojo humano y difíciles de medir con instrumentos; con una línea vertical roja se indica el tiempo para el cual se realizó la limpieza de las muestras.

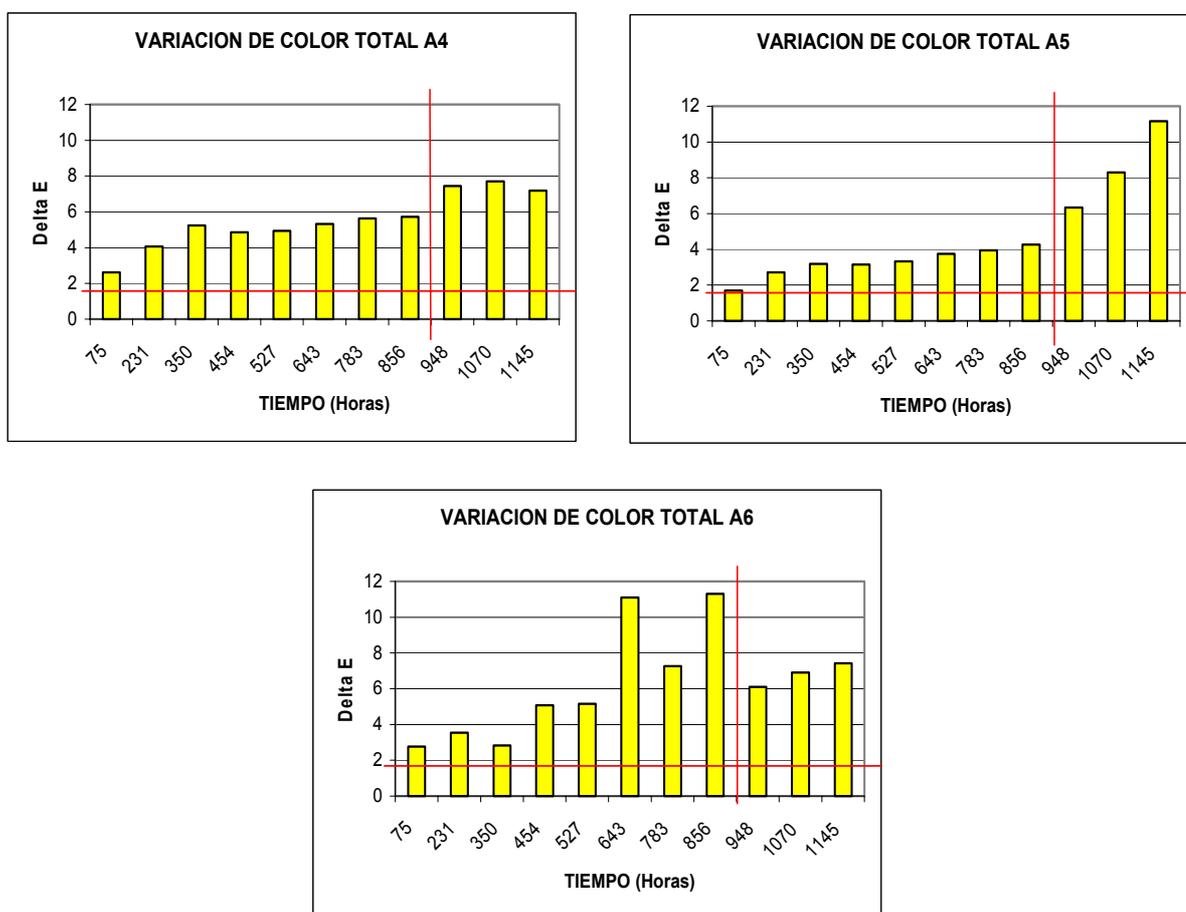


**Figura 4.41** Desviación del color total para los hormigones de referencia y pigmentado con rojo

Para el hormigón de referencia la desviación se mantiene en valores bajos, alcanzando en un grupo de hormigones un máximo de 4 unidades, lo que lo hace perceptible a simple vista.

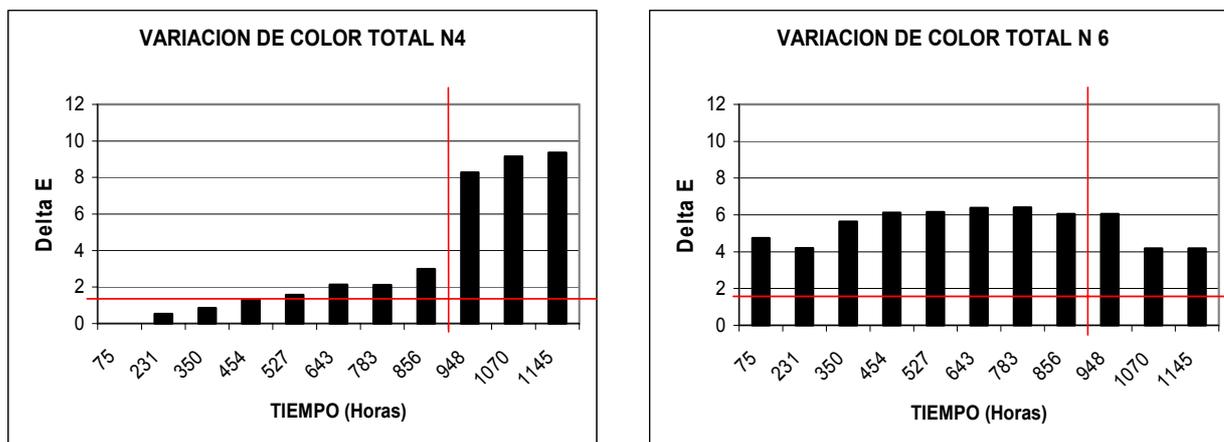
Para el hormigón con pigmento rojo la desviación es más variable, alcanzando valores importantes, del orden de 8 a 10 unidades en el grupo R4, disminuyendo después de la limpieza a valores cercanos a 6, lo que lo asimila a los grupos R5 y R6.

En la Fig. 4.42 se presenta la desviación de color total para los hormigones pigmentados con amarillo. La desviación  $\Delta E^*$  supera el límite de 1,5 unidades durante todo el período de exposición, aún después de la limpieza.



**Figura 4.42 Desviación del color total para los hormigones pigmentados con óxido amarillo**

En la Fig. 4.43 se presenta la desviación de color total para los hormigones pigmentados con negro; resultan de interés las variaciones notables en la desviación, posiblemente debido a la presencia de eflorescencias blancas que contrastan más nítidamente sobre el fondo negro de la muestra aún después de la limpieza.



**Figura 4.43 Desviación del color total para los hormigones pigmentados con óxido negro**

La desviación de color total permite afirmar que los hormigones de referencia presentan menos variación del color al finalizar el período de envejecimiento que los hormigones pigmentados (máximo 4 unidades). Los hormigones pigmentados alcanzan valores cercanos a las 8 unidades, siendo más sensibles a la exposición ambiental simulada por el método de ensayo acelerado.

En general, la limpieza tiene una influencia importante en la medición del color, principalmente al determinar la saturación del color ya que las muestras presentan colores más vivos. No obstante sus limitaciones, estos ensayos pueden ser utilizados para proporcionar información importante sobre cómo varía el color cuando el material es expuesto a ciertas condiciones establecidas de exposición a ultravioleta, agua y temperatura, acelerando los ciclos a los que está sometido en la exposición natural.

---

#### 4.2.9 Programación de ensayos de envejecimiento acelerado y natural

En la Fig. 4.44 se propone un camino para programar ensayos de envejecimiento acelerado y natural que permitan fijar requisitos y criterios de previsión de vida útil del color. Esta propuesta, realizada tomando como base la norma ASTM E 632, está organizada en cuatro partes:

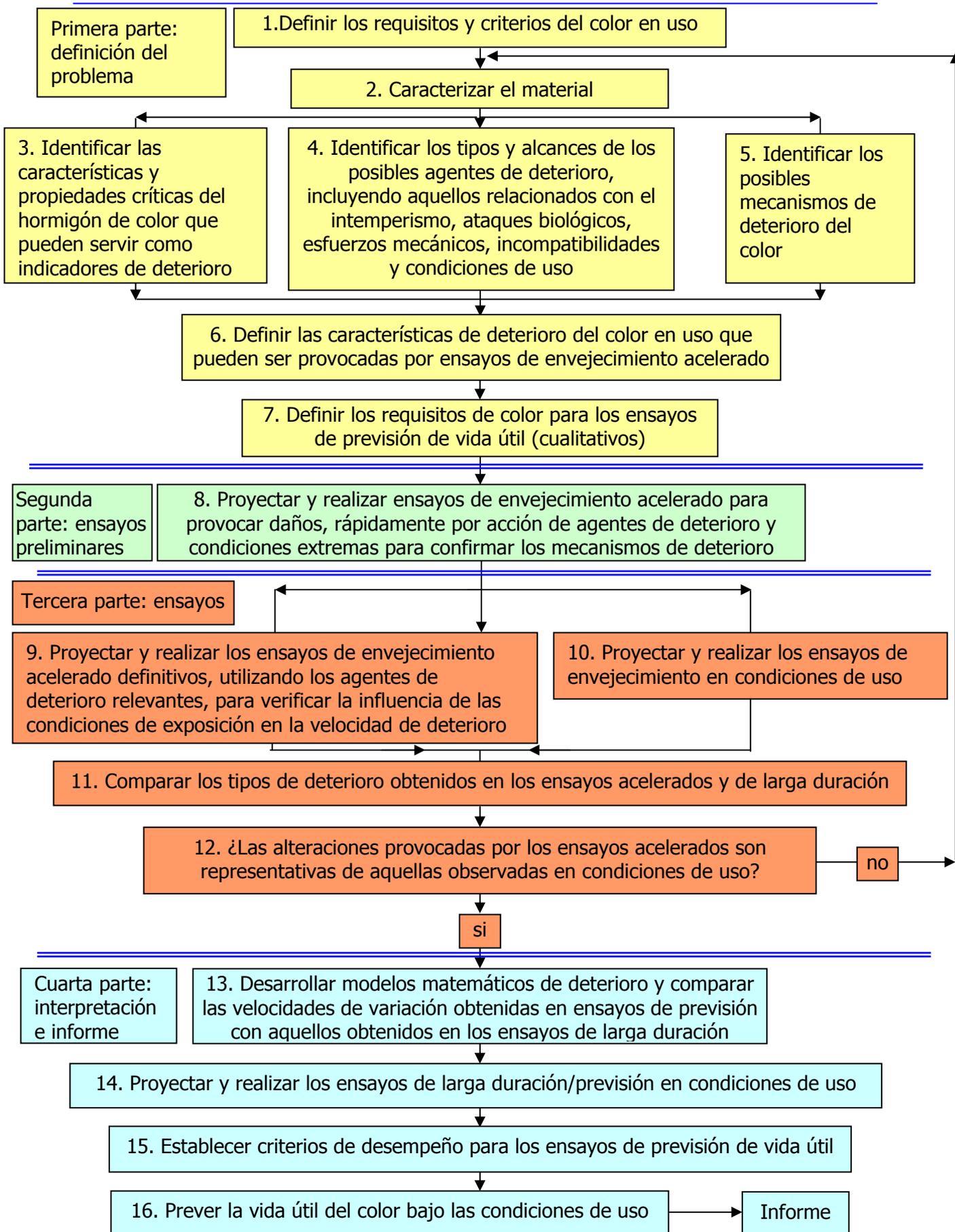
A. Definición del problema: Se debe definir el problema analizando el material y el ambiente a que estará sometido. Se fijan las condiciones exigibles para los ensayos acelerados a realizar. En esta etapa podrá faltar información respecto al comportamiento del material y a los posibles mecanismos de deterioro.

B. Ensayos preliminares: El objetivo de estos ensayos es inducir el deterioro del material por medio de la acción de elevada intensidad de los agentes agresivos, de manera de producir el deterioro establecido anteriormente.

C. Ensayos definitivos: Se definen los ensayos acelerados de corta duración, empleando los agentes de deterioro considerados relevantes a partir de los ensayos preliminares realizados. En esta etapa es posible que se deban variar los agentes de deterioro y su intensidad con respecto a los ensayos preliminares.

D. Interpretación e informe: Si existe correlación entre el envejecimiento acelerado y el natural, se intentará establecer los modelos matemáticos que se ajusten a las variaciones detectadas en las propiedades elegidas como indicadores de degradación. A partir de que se defina un modelo matemático confiable, se puede decir que se podrá estimar la variación del color con ensayos acelerados.

Cada una de estas partes implica la definición de factores que intervienen, la toma de decisión de ensayos a realizar, la posibilidad de acercamiento entre ensayos acelerados naturales, en el que no hay abundante experiencia documentada aplicada a hormigones de color, lo que hace que todavía haya un largo camino por recorrer.



**Figura 4.44 Propuesta de adaptación de la metodología ASTM E 632 para la determinación de la variación del color en hormigones coloreados**

La metodología que la norma ASTM E 632 propone, lleva a tener en consideración que función va a cumplir el material como producto, las condiciones de exposición a las que va a estar sometido durante su uso y las exigencias del usuario o sea lo que el usuario espera del producto.

Si bien la materia es el hormigón coloreado, su aplicación en productos con fines tan distintos como una teja, un mampuesto o bloque de hormigón, un piso o un elemento estructural y las condiciones de exposición a la que van a estar sometidos, hacen que la amplitud de factores que influyen en su evaluación impliquen decisiones importantes a la hora de formular el problema.

En la Tabla 4.10 se realiza una propuesta de los requisitos, propiedades y características a determinar, los probables factores de degradación, los métodos y ensayos a emplear, todo esto vinculado al hormigón coloreado como material de construcción y la función principal que cumple, con el objetivo de contribuir a la definición de parámetros de calificación del hormigón coloreado.

**Tabla 4.10 Productos de hormigón coloreado , requisitos, características vinculados con los posibles factores de degradación y con los ensayos a realizar para definir sus parámetros de calificación**

Producto/ Función	Requisitos/propiedades/ Características		Factor de degradación	Método/ ensayo
Hormigón estructural	De resistencia	A la compresión	Compresión	De propiedades
		Al desgaste	Abrasión	Acelerado/Normal
	De resistencia y durabilidad	Porosidad	---	De propiedades
		De durabilidad	Absorción	---
	Permeabilidad		Agua a presión	De propiedades
	Carbonatación		CO <sub>2</sub>	Acelerado/Normal
	De estética	Estabilidad colorimétrica	Luz, temperatura, lluvia, rocío, polución amb.	Acelerado/Normal
		Textura	Desgaste, luz, temperatura, lluvia, rocío	Acelerado/Normal
		Defectos superficiales	---	Observación visual

Producto/ Función	Requisitos/propiedades/ Características		Factor de degradación	Método/ ensayo
Adoquines de hormigón coloreado (pisos)	De resistencia	A la compresión	Compresión	De propiedades
		Al desgaste	Abrasión	Acelerado/Normal
	De resistencia y durabilidad	Porosidad	---	De propiedades
		De durabilidad	Absorción	---
	Congelamiento y deshielo		temperatura	Acelerado
	De estética	Estabilidad colorimétrica	Luz, temperatura, lluvia, rocío, polución ambiental	Acelerado
		Textura	Desgaste, temperatura, lluvia, rocío	Acelerado/Normal
		Defectos superficiales	---	Observación visual
	Tejas (cubierta de techo)	De resistencia	a la flexión	Flexión
De durabilidad		Permeabilidad	Agua a presión	De propiedades
De estética		Estabilidad colorimétrica	Luz, temperatura, lluvia, rocío, polución amb.	Acelerado
		Textura	Desgaste, temperatura, lluvia, rocío	Acelerado/Normal
		Defectos superficiales	---	Observación visual

## Capítulo 5

---

### CONCLUSIONES

---

En este capítulo se presentan las conclusiones resultantes de los estudios realizados durante el desarrollo de la tesis. Se organizan en conclusiones referidas a las propiedades de los hormigones coloreados en estado fresco y en estado endurecido las correspondientes a las propiedades fisicomecánicas, las vinculadas a la durabilidad y a la estabilidad de color. Finalmente se establecen algunas necesidades de líneas futuras de investigación que surgen del avance en la evolución de este trabajo.

#### 5.1 CONCLUSIONES ESPECÍFICAS DE LA TESIS

Para este estudio las dosificaciones de los hormigones de referencia, sin pigmento y los coloreados presentan consistencia constante, medida con el cono de Abrams y relación agua/cemento variable.

##### 5.1.1 De las propiedades en estado fresco

**Exudación:** los hormigones pigmentados presentan menor volumen de agua exudada por unidad de superficie que los de referencia, sin pigmento, posiblemente por el contenido de finos que agregan los pigmentos a la mezcla. Si analiza el porcentaje de agua exudada de todas las mezclas en función de la

---

relación agua/cemento, aproximadamente para las relaciones mayores que 0,52, el porcentaje de agua de exudación es menor para los hormigones pigmentados con respecto al de referencia; posiblemente este efecto sea provocado por un mayor contenido de partículas finas, que colaboran en la retención de agua.

**Tiempo de fraguado:** los hormigones pigmentados presentan tiempos de fraguado levemente mayores que el hormigón de referencia, sin que su efecto pueda considerarse perjudicial.

### 5.1.2 De las propiedades fisicomecánicas

**Resistencia a compresión:** es interesante destacar que la evolución de la resistencia a compresión con la edad de ensayo presenta un comportamiento similar para todos los grupos de hormigones. Para la edad de ensayo de 28 días, los hormigones con pigmento negro y amarillo presentan resistencia a compresión mayores que el gris; para el amarillo el incremento con respecto al de referencia es como máximo del orden del 20 %. El hormigón con pigmento rojo presenta una leve disminución de la resistencia a compresión, del orden de 7 % como máximo. A la edad de 91 días el hormigón con pigmento amarillo presenta resistencia a compresión mayor que el gris, mientras que los hormigones con pigmento negro y rojo presentan resistencia a compresión menores que el gris. A la edad de ensayo de 182 días, la resistencia a compresión de los hormigones con pigmento negro y amarillo supera los valores obtenidos para los hormigones de referencia grises y mientras que el rojo tienen menor resistencia que éstos últimos. El hormigón con pigmento rojo presenta, para todas las edades, menor resistencia a compresión que el de referencia y el hormigón con pigmento amarillo siempre presenta mayor resistencia a compresión que el gris.

**Módulo de elasticidad estático:** con respecto al módulo de elasticidad estático, del que prácticamente no hay información en la bibliografía de hormigones coloreados, a los 28 días de edad, los hormigones de referencia presentan mayor el módulo de elasticidad que los hormigones pigmentados. Este comportamiento varía a los 91 días, edad a la cual el módulo de elasticidad del hormigón con pigmento amarillo supera al gris, mientras que los hormigones con pigmento

negro y rojo mantienen valores menores que el hormigón de referencia. A los 182 días, los valores de módulo de elasticidad de los hormigones pigmentados superan a los de los hormigones de referencia. Correlacionado los valores obtenidos para el módulo de elasticidad con los de resistencia a compresión, el módulo aumenta en menor medida para la edad de 28 días, incrementándose la pendiente de las curvas cuando aumenta la edad de ensayo a 91 y 182 días.

### 5.1.3. De las propiedades vinculadas a la durabilidad

El estudio detallado de las propiedades seleccionadas relacionadas con la durabilidad de los hormigones coloreados, en particular aquellas que dependen de manera directa de la facilidad con la que los agentes agresivos pueden ingresar y moverse en el interior de la estructura porosa del hormigón, permiten afirmar que la incorporación de pigmento, en las condiciones de ensayo estudiadas, resultan favorables para durabilidad de los hormigones en estudio.

**Succión capilar:** los resultados muestran que a la edad de ensayo de 28 días el comportamiento de los hormigones de referencia y pigmentados es similar, mientras que a los 91 días, los hormigones pigmentados presentan menor succión capilar que los de referencia, manteniéndose esta tendencia a la edad de 182 días.

**Permeabilidad al agua:** La penetración de agua tiene valores del orden de 20 a 30 mm, similares entre sí, para los hormigones del grupo 4 que son los de menor relación agua/cemento; en el grupo 5 supera levemente los 30 mm y en el grupo 6, los hormigones de mayor relación agua/cemento, está en el orden de los 30 a 40 mm. Considerando los resultados obtenidos para el hormigón de referencia, gris, en comparación con los hormigones con pigmento, para todos los grupos se observa que la influencia de los pigmentos resulta favorable o tiene poca influencia en esta propiedad, salvo el que contiene pigmento amarillo, especialmente a edades mayores.

**Absorción e índice de vacíos:** los hormigones pigmentados presentan, para todos los grupos, menor absorción por inmersión que el hormigón de referencia,

---

probablemente por un refinamiento de la estructura de poros. Con respecto al índice de vacíos, los hormigones coloreados presentan menor índice de vacíos, que los hormigones de referencia. Resulta de interés la influencia de los pigmentos en el índice de vacíos ya que se incrementa para todos los hormigones según aumenta la relación agua/cemento, en menor proporción para los hormigones pigmentados.

**Carbonatación:** La adición de pigmentos resulta favorable para esta propiedad ya que la profundidad de carbonatación es menor en los hormigones pigmentados que en los de referencia. Resulta claro que a mayor relación agua/cemento, en general, la carbonatación es levemente mayor para todos los grupos, excepto para el hormigón pigmentado con óxido negro en el que los valores se mantienen constantes, aunque resulta de interés destacar que este hormigón presenta resultados menores para las relaciones agua/cemento más altas cuando se compara con los otros hormigones pigmentados, inclusive comparando con los hormigones de referencia.

**Abrasión:** La adaptación del método utilizado para baldosas provee información que si bien no puede ser utilizada para realizar comparaciones cuantitativas con otros trabajos, permite comparar el comportamiento de los hormigones de referencia con los pigmentados. Se muestra un incremento de la profundidad de desgaste a medida que se incrementa la relación agua/cemento, para todos los hormigones estudiados. El hormigón de referencia y el hormigón con pigmento rojo tienen un comportamiento similar mientras que los hormigones pigmentados con negro y amarillo presentan un desgaste ligeramente menor que el hormigón de referencia.

#### 5.1.4 De las propiedades vinculadas a la estabilidad del color

Se considera que este no es un tema terminado y que la variedad formas, texturas, terminaciones superficiales, tratamientos estéticos y la complejidad de la medición del color y fundamentalmente de la apariencia de la superficie, proveen un campo propicio para la continuidad del estudio. El avance del conocimiento en estas propiedades y el estudio detallado realizado en este trabajo de los parámetros de cromaticidad, con respecto a los hormigones de referencia y pigmentados, permite decir que la luminosidad en función del tiempo de exposición en los hormigones pigmentados aumenta en aproximadamente 5 unidades durante la exposición en la cámara de envejecimiento, mientras que en los de referencia permanece prácticamente constante o sea que los hormigones coloreados serían más sensibles a la exposición realizada.

Resulta de interés destacar que si se analiza la luminosidad en función de la relación agua/cemento, los hormigones de referencia muestran un valor mínimo para una relación agua/cemento cercana a 0,50–0,52, prácticamente igual al pigmentado con rojo, mientras que el amarillo presenta un máximo para este rango de valores de la relación agua/cemento. Con respecto a la saturación del color este valor se incrementa en los hormigones de referencia y en los pigmentados, especialmente después de la limpieza. Se destaca principalmente el hormigón con pigmento amarillo, en el que el valor del croma o saturación se incrementa notablemente, dando como resultado un color más vivo. El hormigón rojo presenta mayor dispersión en los valores de saturación, disminuyendo después de la limpieza, logrando en general tonos más apagados o similares a los iniciales. O sea que la saturación de las muestras aumenta levemente (2 unidades) durante el envejecimiento posiblemente debido a la presencia de eflorescencias y considerablemente después de la limpieza debido a la remoción de la misma.

El análisis de la desviación de color total permite afirmar que los hormigones de referencia presentan menos variación del color al finalizar el período de envejecimiento que los hormigones pigmentados (máximo 4 unidades). Los

hormigones pigmentados alcanzan valores cercanos a las 8 unidades, siendo más sensibles a la exposición ambiental simulada por el método de ensayo acelerado.

En general, la limpieza tiene una influencia importante en la medición del color, principalmente al determinar la saturación del color ya que las muestras presentan colores más vivos.

En definitiva después de la realización de este trabajo se puede expresar, como conclusión principal, que la incorporación de pigmentos, óxidos de hierro, incorporados en los hormigones estudiados en una dosis del 6% mejoran las propiedades estudiadas, en estado fresco y endurecido, incluyendo a las vinculadas a la durabilidad.

## 5.2 NECESIDAD DE INVESTIGACIONES FUTURAS

A partir del estudio desarrollado en esta tesis ha sido posible confirmar la necesidad e importancia de algunas líneas de investigación futuras.

Si bien en esta tesis no se utilizaron aditivos para evitar poner otra variable en juego, se plantea la necesidad de profundizar la investigación sobre la interacción de cementos, pigmentos y aditivos ya que en los últimos años se han producido marcados cambios en su producción; entre otros tipos de hormigones, el estudio de los hormigones de alto desempeño coloreado merece una mención especial así como la aplicación de pigmentos en hormigones autocompactables; el diseño de un hormigón autocompactable coloreado implica la optimización del empleo de sus materiales componentes, cemento y otros finos, incluyendo los pigmentos, aditivos y esqueleto granular, a fin de obtener hormigones que aseguren la compacidad sin necesidad de utilizar otros medios de compactación más que la gravedad.

También es necesario estudiar aún más la durabilidad del hormigón coloreado. Un tema poco conocido es el comportamiento del hormigón con pigmento con respecto a la retracción; otra necesidad es la realización de ensayos de penetración de cloruros, acción de sulfatos y otras sustancias agresivas; con respecto al envejecimiento del color y la correlación con los ensayos de exposición a la intemperie sería de particular relevancia la continuación de ensayos. Esta etapa experimental se encuentra prevista para su desarrollo actualmente; el plan de trabajo definido prevé distribuir muestras de los hormigones de referencia y de los pigmentados en distintas ciudades de la República Argentina considerando los climas existentes en el territorio nacional presentados en el Capítulo 2. Las localizaciones seleccionadas de acuerdo a las exigencias de intemperie y a las posibilidades de resguardar las muestras, con las correspondientes contramuestras mantenidas en ambiente de laboratorio son:

- Formosa, Provincia de Formosa: clima árido y estepario.
- Concordia, Provincia de Entre Ríos: clima templado, lluvias todo el año.

- Córdoba, Provincia de Córdoba: clima templado, período seco en invierno.
- Mar del Plata, Provincia de Buenos Aires: clima marítimo.
- Mendoza, Provincia de Mendoza: clima de montaña.
- Río Gallegos, Provincia de Santa Cruz: clima árido desértico.

En las muestras se realizaron las mediciones de coordenadas cromáticas iniciales y se tiene previsto desarrollar un seguimiento de la variación de la luminosidad y la saturación para correlacionar su variación con respecto a los valores obtenidos en los ensayos acelerados ya finalizados.

Por último, se considera importante analizar la posibilidad de estudiar hormigones coloreados para realizar reparaciones y refuerzos, con especial énfasis en lograr colores y texturas, ya que se puede decir que no existe un solo material y una sola técnica para resolver un problema específico.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS EN ORDEN ALFABÉTICO

1. ABDO, J. (1996). Béton, matière d'aménagement urbain. Revue Générale des Routes et Aérodrômes, n. 736.
2. ADAMS, E. Q. (1923). A theory of colour vision. Psych. Rev. 30. p. 56-76.
3. ALMUSALLAM, A. A. (2001). Effect of environmental conditions on the properties of fresh and hardened concrete. Cement and Concrete composites, v. 23, p. 353-361.
4. ANDRADE, C. (1992). Manual para Diagnóstico de Obras Deterioradas por Corrosão de Armaduras, Editora Pini. São Paulo.
5. ANDRADE C. & GONZÁLEZ. (1988). Tendencias Actuales en la Investigación sobre Corrosión de Armaduras. Madrid, Revista Informes de la Construcción, v. 40, n. 398, nov/dic.
6. ANDRADE, J. J. O. (1997). Durabilidade de estruturas de concreto armado: análise das manifestações patológicas nas estruturas no estado de Pernambuco. 148 p. Dissertação (Mestrado de Engenharia Civil). Universidades Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
7. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 201.2R-92. (1992). Guide to Durable Concrete.
8. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 210R-93. (1993). Erosion of Concrete in Hydraulic Structures.
9. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 212.3R-91.(1991). Chemical Admixtures for Concrete.
10. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 117R-90. (1990). Commentary on Standard Specifications for Tolerances for Concrete Construction and Materials (ACI 117-90).
11. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 302.1R-96. (1996). Guide for Concrete Floor and Slab Construction.
12. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 303R-91. (1991). Guide to Cast-In-Place Architectural Concrete Practice.
13. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 309.2R-98. (1998). Identification and Control of Visible Effects of Consolidation on Formed Concrete Surfaces.
14. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 365.1R-00. (2000). Service -Life prediction–State-of-the-Art Report.
15. AİTCIN, P-C. (2000). Concreto de Alto Desempenho. Editora Pini. São Paulo.
16. BARRERA, H., ANABALON, A., GUTIERREZ, S. (2002). Hormigones decorativos. Universidad de Santiago de Chile.
17. BAYER. (2001). Treinamento Técnico. Colorimetria e pigmentos. Porto Feliz.
18. Bayferrox. (1989). La coloración del hormigón. Instrucciones técnicas para el procesado. BAYER, Publicación PK-13341 esp. Edición 7.89.
19. BECKETT; R., LIVESAY, M, RIANEY, D. (1995). Manufacturing colored concrete masonry. Precast Production.
20. BENITEZ, A., BÁLZAMO, H. (2004). Hormigones arquitectónicos: blanco y coloreado. En Hormigones especiales, Autoeditor, La Plata.

21. BENSTED, J. (1993). White and Coloured Portland Cements. World Cement.
22. BETOCIB, Francia, ICPC. (2000). El concreto claro como material de arquitectura. Periódicos técnicos (Traducción).
23. BICZOCK, I. (1972). Corrosión y protección del hormigón. Ediciones Urmo. Bilbao.
24. BÜCHNER, G. (1986). Experience in the production of coloured concrete paving blocks. Betonwerk +Fertigteil-Technik.
25. BÜCHNER, G. (1991). Pigments in Concrete Production. Betonwerk +Fertigteil-Technik.
26. CALAVERA, J. (1996). Patología de estructuras de hormigón armado y pretensado. INTEMAC.
27. CALAVERA RUIZ, J. FERNÁNDEZ GÓMEZ, J. GONZÁLEZ-ISABEL, G. LÓPEZ SÁNCHEZ, P. PÉREZ LUZARDO, J.M. (1999). Monografía N°3. Aspectos Visuales del Hormigón. Intemac.
28. CAMPBELL-ALLEN, D. (1979). The reduction of cracking in concrete. University of Sidney.
29. CARVALHO DE ARRUDA COELHO, F. (2000). Variación del color y textura superficial de hormigones vistos con adición de pigmentos inorgánicos, sometidos a distintos estados de exposición ambiental. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
30. CARVALHO, F. C., CALAVERA, J. (2002). Estabilidades colorimétrica e influência da incorporaçã de pigmentos em concretos submetidos a diferentes estados de exposiçã ambiental. 44° Congresso Brasileiro. Instituto Brasileiro do Concreto. Belo Horizonte.
31. CASSAR, L., PEPE, C., TOGNON, G.P., GUERRINI, S., CANGIANO, S., GOISIS, M. (2001). El cemento blanco para concreto de alto desempeño. Construcción y Tecnología.
32. COLLEPARDI, M., PASSUELO, A. (2005) .The best SCC: Stable, Durable, Colorable. IV International ACI/CANMET Conference on Quality of Concrete Structures and Recent Advances in Concrete Materials and Testing. FURNAS Centrais Elétricas S.A. Goiãna, Brasil.
33. Coloured Concrete. (2000). Specifying concrete to BS EN 206-1/BS 8500. BRITISH STANDARD INSTITUTION
34. COMITE EURO-INTERNATIONAL du BETON. (1993). CEB-FIP Model Code 1990. Design Code. Laussane, CEB, May
35. COMITE EURO-INTERNATIONAL du BETON. (1992). Durable Concrete Structures. Design Guide, Laussane, Thomas Telford.
36. Cimento Hoje. (2000). Ano IV, n. 33.
37. Concrete Inspection Procedures. Portland Cement Associaton. (1975). John Wisley & Sons, Inc.
38. Concreto colorido (1999). BAYER, Porto Feliz.
39. CENTRO DE INVESTIGACIÓN DE LOS REGLAMENTOS NACIONALES DE SEGURIDAD DE OBRAS CIVILES. 1982. Reglamento CIRSOC 201. Proyecto, cálculo y ejecución de estructuras de hormigón armado. INTI Editor. 1 y 2. Buenos Aires.

40. CUELLO, M. CUNEO SIMIAN, H. (2001). Hormigones coloreados de alto desempeño. Centro de Investigaciones Avanzadas en Tecnología del Hormigón. Universidad Nacional de Córdoba.
41. CUNEO SIMIAN, H. SIMIAN FERREIRA, F. CUELLO, M. RISSI, S. (2000). Uso de agregados calcáreos en hormigones estructurales blancos y de color. Centro de Investigaciones Avanzadas en Tecnología del Hormigón. Universidad Nacional de Córdoba.
42. CYTED Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología. (1997). Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado.
43. CYTED Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología. (2003). Manual de Rehabilitación de Estructuras de Hormigón Reparación, Refuerzo y Protección.
44. DAL MOLIN, D. C. C. (1988). Fissuras em estruturas de concreto armado – Análise de manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no Estado do Rio Grande do Sul. CPGEC, UFRGS, Porto Alegre.
45. DESCARTES, R. (1637). De meteoris.
46. DI MAIO, A. (2004). Técnicas y Ensayos de Evaluación de Estructuras afectadas por patologías. Jornada de Patologías de la Estructuras de Hormigón Armado. LEMIT, La Plata.
47. Dióxido de titânio. (1991). BAYER, PK-01/91-BR
48. DOMINIS M. A. (1611). De radiis visus et lucis in vitris perspectivis et iride; Venecia.
49. DOWSON, A.J. (1998). ¿Será durable el efecto IOPIC ( Pigmento de óxido de hierro en el concreto? Pave Colombia'98. Instituto Colombiano de Productores de Cemento.
50. ESQUEDA HUIDOBRO, H.A. (1996). Concreto Arquitectónico. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.
51. FERNÁNDEZ LUCO, L. (2001). La durabilidad del hormigón: su relación con la estructura de poros y los mecanismos de transporte de fluidos. En Durabilidad del hormigón estructural, Autoeditor, La Plata, Provincia de Buenos Aires.
52. FIB BULLETINS. (1999). Structural concrete – The textbook on behaviour, design and performance. Update Knowledge of the CEB/FIB Model Code 1990, v.1.
53. FREISCHER, J. (1571). De iridibus doctrina Aristotelis et Vitellionis; Vitembergae.
54. FREY, R., BALOGH, T., BALÁZS, G.L. (1994). Kinetic method to analyse chloride diffusion in various concretes. Cement and Concrete Research, New York, v.24, n.5, p.863-873.
55. FURNAS, Laboratório de Concreto. (1997). Concretos Massa, Estrutura, Projetado e Compactado com Rolo; Ensaio e Propriedades. Editor Walter Pacelli de Andrade. PINI, São Paulo.
56. GALANTE, R. (2000). Satisfação há mais de 50 anos. Construção n. 2747. São Paulo.
57. GARBOCZI, E.J. (1990). Permeability, diffusivity and microstructural parameters: a critical review. Cement and Concrete Research. New York, v. 20, p. 591-601.
58. GIACCIO, G.; ROCCO, C.; VIOLINI, D.; ZAPITELLI, J.; ZERBINO, R. (1987). La resistencia del hormigón analizado como material compuesto. Revista Hormigón n. 17, p.7-15.

59. GOETHE, J.W. (1950). Obras Completas. Aguilar, Madrid.
60. GOMÁ, F. (1979). El cemento Pórtland y otros aglomerantes. Editores Técnicos Asociados, Barcelona, p.174-196.
61. GUTIERREZ, A., VIURRARENA, S. (2004). Ensayos de desgaste en adoquines de hormigón para los pavimentos de la Terminal Logística M´Bopicuá. Jornadas Sud-Americanas de Ingeniería Estructural.
62. HAMAD, B. S. (1995). Investigations of Chemical and Physical Properties of White Cement Concrete. Elsevier Science Inc. New York, p. 161-167.
63. HELENE, P.; TERZIAN, P. (1993). Manual de dosagem e Controle do Concreto. Editora PINI: 349 ps., São Paulo.
64. HELENE, P. (1993). Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado. Tesis de libre docencia. Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil PCC/USP.
65. HELENE, P. (1987). Contribuição ao estabelecimento de parâmetros para dosagem e controle dos concretos de cimento Portland. Ph.D. Thesis. Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil PCC/USP.
66. HELENE, P. (1993). Vida Útil de Estruturas de Concreto Armado sob o Ponto de Vista da Corrosão da Armaduras. Seminario de Dosagem e Controle dos Concretos Estructurais, Brasilia, São Paulo, Recife, Rio de Janeiro. Anais ENCOL/SENAI, Brasilia.
67. HELENE, P. (1999). Vida útil das estruturas de concreto. Conferencia FEMATEC´99. Hacia el hormigón elaborado en las obras del siglo XXI, Buenos Aires.
68. HELENE, P. HARTMANN, C. (2003a). Edificio e-Tower. Record mundial en el uso de hormigón coloreado de altas prestaciones. Ingeniería Estructural, Buenos Aires, v. 11, n. 27, p.11-18.
69. HELENE, P. HARTMANN, C. (2003b). HPC in Brazilian Office Tower. Concrete International – ACI, American Concrete Institute, v. 25, n. 12, p. 64-68.
70. HELENE, P. GALANTE, R. (1999). Concreto colorido. Quinto Congreso Brasileiro de Cemento.
71. HELENE, P. LEVY, S.M. (1996). Curado del Concreto. Por Qué, Como y Hasta Cuando es Necesaria?. Revista Ingeniería Estructural n. 9.
72. HELENE, P. (2000). Durabilidad. Interpretación y evaluación de resultados. En Manual de Diagnosis e Intervención en Estructuras de Hormigón Armado. Col.legi d´Aparelladors i Arquitectes Tècnics de Barcelona.
73. HELENE, P. BATLOUNI J. (2002). Edificio E-Tower, São Paulo. Récord Mundial en Empleo de Concreto de Alto Desempeño. Revista NOTICRETO.
74. HENAO CELEDÓN, M. L., AVENDAÑO VELÁSQUEZ, C. (1999). Concreto arquitectónico: como realizar un buen acabado. Instituto del concreto (ASOCRETO). Santa Fé de Bogotá.
75. HENDGES, D. F., DA COSTA, D.W., ARNALDO DE ALENCAR, R., SOUZA VERSAGE, R., BERTOCINI BASTOS, S. (2004). Resistencia compressão, custo e coloração de concretos produzidos com pigmentos e cimentos Pórtland cinza e branco. 46º Congresso Brasileiro. Instituto Brasileiro do Concreto. Florianópolis.

76. HILSDORF, H. (1995). Concrete Compressive Strength, Transport Characteristics and Durability. Editores E.F & Spon en Performance Criteria for Concrete Durability, Londres.
77. HOFFMANN, A.T. (2001). Influência da adição de sílica ativa, da relação água/aglomerante, temperatura e tempo de cura no coeficiente de difusão de cloretos em concretos. Dissertação. Mestrado em Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS. Port Alegre.
78. KEEHN, R. (1992). Mortero de color. Revista Construcción y Tecnología. IMCYC.
79. JOHN, V.M., TUDISCO, M. (1993). Durabilidade e carbonatação do concreto na revisão da NBR 6118. Seminário Qualidades e durabilidade das estruturas de concreto, Porto Alegre. UFRGS. p. 62-73.
80. JONES, M.R., DHIR, R. K., MAGEE, B.J. (1997). Concrete containing ternary blended binders:resistence to chloride ingress and carbonation. Cement and Concrete Research. New York, v. 27, n. 6, p. 825-831.
81. KAZMIERCZAK, C.S. (1995). Contribuição para a análise da eficiência de películas aplicadas sobre as estruturas de concreto armado com o objetivo de proteção contra a carbonatação. Tese (Doutorado). Escola Politécnica. Universidade de São Paulo.
82. KAZMIERCZAK, C.S., LINDENMEYER, Z. (1996). Comparação entre metodologias utilizadas para a determinação da profundidade de carbonatação em aragamassas. International Congress of High-Performance Concrete, on performance and quality concrete structures. Proceedings.
83. KIMURA, K. (2004). Jornada Nacional de Industria & Diseño. <http://www.inti.gov.ar/sabercomo/sc23/inti10.php>
84. KRASOWSKY, J. (1997). Concreto Arquitectónico: textura, color problemas y soluciones. Tesina presentada en el Diplomado de Obras de Concreto impartido por la Facultad de Arquitectura de la UNAM y el IMCYC.
85. KRESSE, P. (1990). Use of colour in concrete. The erosion of concrete and Plant Growth. Betonwerk+Fertigteil-Technik.
86. KRESSE, P. (1991). Efflorescence and its prevention. Betonwerk+Fertigteil-Technik.
87. KUMAR, R., BHATTACHARJEE, B. (2002). Porosity, pore size distribution and in situ strength of concrete. Cement and Concrete Research, v. 33, p.155-164.
88. LEVITT, M. (1985). Pigments for concrete and mortar. Concrete, current practice sheet N° 99, v. 9, n.3, p. 21-22.
89. LIMA, M. G., MORELLI, F. (2003). Degradação das estruturas de concreto devido à amplitude térmica brasileira. Simposio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, São Paulo.
90. LOVE, C. (1973). Colored Iron Oxide Pigments, Natural. Pigment Handbook. Volume I. Properties and Economics. John Wiley and Sons, Inc.
91. LOZANO, R.D. (1978). El color y su medición. Americalee, Buenos Aires.
92. LIU, T. (1994). Abrasion resistance. ASTM STP 169 C, American Society for testing and Materials, Philadelphia, PA.

93. LYNNSDALE C. J., CABRERA J.G. (1989). Coloured Concrete. A state of art review. *Concrete*, v. 23, n 7, p. 29-34
94. MACBETON S.A. (2000). Listado parcial de obras realizadas por Bomanite Corporation, (Madera, California, E.E.U.U.), Buenos Aires.
95. MACDONALD, K.A., NORTHWOOD, D.O. (1995). Experimental measurements of chloride in diffusion rates using a two-compartment diffusion cell: effect of material and test variables. *Cement and Concrete Research*. New York, v. 25,n. 7, p. 1407-1416.
96. MAILVAGANAM, N.P. (1984). *Concrete Admixtures Handbook, Properties, Science and Technology*. Ed. VS Ramachandran, Noyes Pub, USA, p. 506-518.
97. MARCI, J. M. (1648). *Thaumantias, liber de arcu coelesti, deque clorium apparientium natura, ortu et canusis*. Praga.
98. MARQUES FILHO, O. (2001). *Colorimetria I-Curso Entrenamiento*. Bayer. LS-Materias Primas Industriais. Divisão Civil. PE04T13. Porto Feliz.
99. MATIASICH, C., VITALE, G. (2003). Desarrollo de resistencia y evaluación de ascensión capilar en morteros con ceniza de cáscara de arroz y microsílíce. *Ciencia y Tecnología del Hormigón* n. 10. LEMIT, Buenos Aires.
100. MAUROLYCUS (1613). *De lumiere et umbre*. Lugd.
101. MOWAT, G.C., SYMONS, M.G. (1982). Physical properties of concrete containing pigments. *Institution of engineering. Australia civil engineering transactions*, v. 24, n. 2
102. MAXWELL, J. C. (1860). On the theory of compound colours and the relation of the colour of the spectrum. *Phil. Trans. Roy. Soc. Londres*.
103. MEHTA, P.K. (1997). Durability – Critical Issues for the Future. *Concrete International* 19.
104. METHA, P.K; MONTEIRO, P. (2000). *Concreto. Estructura, propiedades e materiais*. Editora Pini. São Paulo.
105. MINDESS, S., YOUNG, F. J. (1981). *Concrete*. Prentice Hall.
106. MISTRICK, R. (1993a). *Color*. Illuminating Engineering Society of North America.
107. MISTRICK, R. (1993b). *Vision*. Illuminating Engineering Society of North America.
108. MONTE, R. (2003). *Avaliação de metodologias de ensaio destinadas à verificação da eficiência de aditivos superplastificantes em pastas de cimento portland*”. Dissertação. Mestrado. USP.
109. NEVILLE, A. (1995). *Properties of Concrete*. 4<sup>th</sup> edition Longman Cientific and Technical. Londres.
110. NEVILLE, A. (1997). *Propiedades do Concreto*. Editora Pini. 2º edición. São Paulo.
111. NEWTON, I. (1672). A new theory about light and colours. *Phil. Trans. Roy. Soc. Londres*.
112. OLLIVIER, J.P., ARSENAULK, O., TRUC, O., MARCHAND, J. (1997). Determination of chloride binding isoterms from migration test. In: MARIO COLLEPARDI SYMPOSIUM – THE FIFTH CANMET/ACI INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUPERPLASTICIZERS AND OTHER CHEMICAL ADMIXTURES. *Proceedings, Rome, Italy*, p. 195-218.

113. OLSON, L. (1986). Color Concerto: Concrete frames faceted glass. The Aberdeen Group.
114. Operating Manual Q-SUN Xenon Test Chamber. (1999). Literature Number: LX-5080.
115. PARIS, N. CHUSID, M. (1998a). Coloring systems. Powder, liquid or granulates? A method that's right for every producer. Concrete Products.
116. PARIS, N. CHUSID, M. (1998b). Ensuring the quality of Colored Concrete Finishes. The Construction Specifier.
117. PARIS, N. CHUSID, M. (1999). Color in Concrete: Beauty and Durability. Concrete International.
118. PARROT, L.J. (1992). Water absorption in cover concrete. Materials and Structures, v. 25, p. 284-292.
119. PASSUELO, A., SILVA FILHO, L.C.P., CAMPANOLO, J.L., GLIESE, R., PETTER, C.O. (2004). Análise cromática de concretos produzidos com cimento branco estrutural e diferentes tipos de agregados. 46° Congresso Brasileiro. Instituto Brasileiro do Concreto. Florianópolis.
120. PERA, J., BOMAUZA, R, AMBROISE, J. (1997). Development of a pozzolanic pigment from red mud. Cement and Concrete Research, v. 27, n. 10.
121. PEREIRA, V. G. A. (2001). Avaliação dos Coeficientes de Difusão de Cloretos em Concretos: Influência do Tipo de Cimento, da Relação a/c, da Temperatura e do Tempo de Cura. (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS. Porto Alegre.
122. PEREZ ARNAL, I. (1995). Encofrados, moldes y acabados. Hormigón (I) In situ. Tectónica, Monografías de arquitectura, tecnología y construcción, n. 3. ATC Ediciones, Madrid.
123. PEREZ LUZARDO, J.M. (1995). El color del hormigón. Hormigón (I) In situ. Tectónica, Monografías de arquitectura, tecnología y construcción, n.3. ATC Ediciones, Madrid.
124. PORTA, J. B. (1582). De refractione libri novem. Nápoles.
125. PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (PCA). (2004). Architectural Concrete Specifications. Concrete Information. ACI-6 Structural and Railwais Bureau. [www.portcement.org/pdf\\_files](http://www.portcement.org/pdf_files)
126. PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (PCA). (2001). Guide for specifying White and Colored Concrete.
127. PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (PCA). (2001). White Surfaces Reflect Ligth Better than Darker Surfaces! Concrete Report. [www.portcement.org/pdf\\_files](http://www.portcement.org/pdf_files)
128. PRESIDENCIA DE LA NACIÓN. SECRETARÍA DE OBRAS PÚBLICAS. (2002). Proyecto de Reglamento CIRSOC 201. Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón. INTI, Buenos Aires.
129. PROYECTO DE NORMA MERCOSUL 05:03-0124. (2000). Hormigón. Determinación de los módulos estáticos de elasticidad y de deformación y de la curva tensión-deformación. Versión 4ª.
130. RABER, P. (1973). Pigmentation of Concrete and Mortar. Pigment Handbook. Volume II. Applications and Markets. John Wiley and Sons, Inc.

131. RAMACHANDRAN, V.S., (1995). Concrete Admixtures Handbook. Properties, Science, and Technology. Second Edition. Noyes Publications.
132. RAYLEIGH, J. (1882). Experiments on colour. Nature 25, p.64-66.
133. RENNILSON, J. (2000). Are your roads safe at night? ASTM Standarization News.
134. ROJAS, D. L. (2000). Informação técnica 1051800. Bayer, São Paulo.
135. ROJAS, D. L. (2002). Informação técnica 020812. Bayer, São Paulo.
136. ROSELL, J. R., VÀZQUEZ, E. (2000). Alteraciones de tipo químico en el hormigón armado. En Manual de Diagnosis e Intervención en Estructuras de Hormigón Armado. Col.legi d'Aparelladors i Arquitectes Tècnics de Barcelona.
137. ROSTAM, S. (1993). Service Life Design – The European Approach. USA, Revista Concrete International, v. 15, n.17.
138. RILEM TC 116-PCD. (1999). Concrete durability. An approach towards performance testing. Materials and Structures 32.
139. SILVA FILHO, L., DAL MOLIN, D. , KIRCHHEIM, A., TUTIKIAN, B. (2004). Desenvolvimento de um traço de concreto auto-adensável branco (CAAB) Museu Iberê Camargo. Relatório Técnico N°31/2004. Porto Alegre.
140. SZADKOWSKI, G. (1987). The weathering of coloured concrete. Betonwerk+Fertigteil-Technik. vol. 57 – n. 1.
141. SZADKOWSKI, G. (1990). Coloring technologies in the other countries. Betonwerk+Fertigteil-Technik. vol. 57 - n1.
142. SALDAÑA ARIAS, E. (1992). Coloreando el concreto. Revista Construcción y Tecnología. Tesina presentada en el III Diplomado en Obras de Concreto organizado por le IMCYC y la Facultad de Arquitectura de la Universidad Autónoma de México.
143. TAUS, V. (2003). Determinación de la absorción capilar en hormigones elaborados con agregados naturales y reciclados. Ciencia y Tecnología del Hormigón n. 10. LEMIT, Buenos Aires.
144. TAYLOR, T. G. (1974). Effect of carbon black and black iron oxide on the air content and durability of concrete. Proceedings ACI 44, p. 613-624.
145. TEBBE, R. (1992). The basic properties and manufacture of inorganic pigments. Betonwerk+Fertigteil-Technik.
146. TEICHMANN, G. (1991). The use of colorimetric Methods in the Concrete Industry? Betonwerk+Fertigteil-Technik.
147. TEJEDA, C. CUNEO SIMIAN, H. (2001). Propiedades de los hormigones coloreados en estado fresco. Centro de Investigaciones Avanzadas en Tecnología del Hormigón. Universidad Nacional de Córdoba.
148. TELESII, B. (1590). De iride et coloribus. Opera, Venecia.
149. Traço Cromático. (1998). Revista CONSTRUÇÃO, n.2617.
150. VAN WALLENDael, M. (1974). Pigments study to colour cement based materials. Scientifique et Techniques pour l'Industrie Cimentiere, Rapport de Recherche, 41, pp.88.
151. Visual Concrete. (2000). Specifying concrete to BS EN 206-1/BS 8500. BRITISH STANDARD INSTITUTION.
152. WERNECK DA COSTA, D., BARSANTE MORENO, J.C., LIMA MARTOS, P.H., BERTOCINI BASTOS, S.R. (2004). Concreto colorido dosado em central

bombeado. 46° Congresso Brasileiro. Instituto Brasileiro do Concreto. Florianópolis.

153. YOUNG, T. (1802). On the theory of light and colours. Phil. Trans. Londres, p. 12-48.

### **NORMAS INTERNACIONALES CONSULTADAS RELACIONADAS CON PIGMENTOS Y ASPECTO SUPERFICIAL DEL HORMIGON**

- BRITISH STANDARDS INSTITUTION; BS 1014 (1975) "Specification for pigments for Portland cement and Portland cement products"
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS; ASTM D 50 (1999) "Standard Test Method for Chemical Analysis of Yellow, Orange, Red and Brown Pigments Containing Iron and Manganese"
- ASTM D 280 "Test Methods for Hygroscopic Moisture (and Other Matter Volatile Under the Test Conditions) in Pigments."
- ASTM D 768 (1995) "Standard Specification for Yellow Iron Oxide Hydrated"
- ASTM D 769 (1995) "Standard Specification for Black Synthetic Iron Oxide"
- ASTM C 979 (1999) "Standard Specification for Pigments for Integrally Colored Concrete".
- ASTM D 1208 (1996) "Standard Test Method for Common Properties of Certain Pigments"
- DIN 53 237 "Testing of pigments; pigments for colouration of building materials based on cement or lime"
- EN 12878 (1999) "Pigments for the colouring of building materials based on cement and/or lime."

### **NORMAS RELACIONADAS CON MEDICION DEL COLOR Y TEMAS AFINES**

- ASTM D 1535 (1997) "Standard Practice for Specifying Color by the Munsell System"
- ASTM D 1729 (1996) "Standard Practice for Visual Appraisal of Colors and Color Differences of Diffusely-Illuminated Opaque Materials"
- ASTM D 2244 (2000) "Standard Test Method for Calculation of Color Differences From Instrumentally Measured Color Coordinates"
- ASTM D 2565 "Standard Practices for Operating Xenon Arc-Type Light- Exposure Apparatus With and Without Water for Exposure of Plastics"
- ASTM D 2616 (1996) "Standard Test Method for Evaluation of Visual Color Difference With a Gray Scale"
- ASTM D 3724 (1995) "Standard Specification for Synthetic Brown Iron Oxide Pigment"
- ASTM D 3872 (1999) "Standard Test Method for Ferrous Iron in Iron Oxides"
- ASTM D 3964 (1998) "Standard Practice for Selection of Coating Specimens for Appearance Measurements"

- ASTM D 4086 (1997) “Standard Practice for Visual Evaluation of Metamerism”
- ASTM D 4459 “Standard Practices for Operating an Accelerated Light Fastness Xenon Arc-Type Light Exposure Apparatus for the Exposure of Plastics for Indoor Applications”
- ASTM E 179 (1996) “Standard Guide for Selection of Geometric Conditions for Measurement of Reflection and Transmission Properties of Materials”
- ASTM E 284 (1999) “Standard Terminology of Appearance”
- ASTM E 1499 (1997) “Standard Guide for Selection, Evaluation, and Training of Observers”
- ASTM E 1767 (1995) “Standard Practice for Specifying the Geometry of Observations and Measurements to Characterize the Appearance of Materials”
- ASTM G 7 (1997) “Standard Practice for Atmospheric Environmental Exposure Testing of Nonmetallic Materials”
- ASTM G 113 (1994) “Standard Terminology Relating to Natural and Artificial Weathering Test of Nonmetallic Materials”
- ASTM G 141 (1996) “Standard Guide for Addressing Variability in Exposure Testing on Nonmetallic Materials”
- ASTM G 147 (1996) “Standard Practice for Conditioning and Handling of Nonmetallic Materials for Natural and Artificial Weathering Test”
- ASTM G 151 (2000) “Exposing Nonmetallic Materials in Accelerated Test Devices that Use Laboratory Light Sources”
- ASTM G 154 (2000) “Standard Practice for Operating Fluorescent Light Apparatus for UV Exposure of Nonmetallic Materials”
- ASTM G 155 (2000) “Operating Xenon Arc Light Apparatus for Exposure of Nonmetallic Materials”

## **OTRAS NORMAS INTERNACIONALES**

- ACI 117-90. Standard Specifications for Tolerances for Concrete Construction and Materials
- ACI 303R-91. Standard Specification for Cast-In-Place Architectural Concrete.
- ASTM C 33: 2001. Standard Specification for Concrete Aggregates, Annual Book of ASTM Standards 04.02, American Society for Testing and Materials. Philadelphia, Estados Unidos.
- ASTM C 42: 1994. Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete, Annual Book of ASTM Standards 04.02, American Society for Testing and Materials. Philadelphia, Estados Unidos.
- ASTM C 127: 1991. Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate, Annual Book of ASTM Standards 04.02, American Society for Testing and Materials. Philadelphia, Estados Unidos.
- ASTM C 128-88: 1991. Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate, Annual Book of ASTM Standards 04.02, American Society for Testing and Materials. Philadelphia, Estados Unidos.

- ASTM C 136-84a: 1991. Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregate, Anual Book of ASTM Standards 04.02, American Society for Testing and Materials. Philadelphia, Estados Unidos.
- ASTM C 294: 1990. Standard Descriptive Nomenclature for Constituents of Natural Mineral Aggregates, Anual Book of ASTM Standards 04.02, American Society for Testing and Materials. Philadelphia, Estados Unidos.
- ASTM C 469: 1994. Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression, Anual Book of ASTM Standards 04.02, American Society for Testing and Materials. Philadelphia, Estados Unidos.
- ASTM C 494: 1992. Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete, Anual Book of ASTM Standards 04.02, American Society for Testing and Materials. Philadelphia, Estados Unidos.
- ASTM E 632: 1982. Standard Recommended practice for developing short term accelerated test for prediction of the service life building components and materials. Philadelphia, Estados Unidos.
- ISO 6241:1984. Performance standards in buildings: principles for their preparation and factors to be considered. Geneuve.

## **NORMAS ARGENTINAS CONSULTADAS**

- IRAM 1501-6: 1985. TAMICES DE ENSAYO. Método de ensayo de tamizado. Directivas generales.
- IRAM 1504: 1986. CEMENTO PORTLAND. Análisis químico.
- IRAM 1505:1987. AGREGADOS. Análisis granulométrico.
- IRAM 1509: 1987. AGREGADOS PARA HORMIGONES. Muestreo.
- IRAM 1511: 1978. HORMIGON FRESCO DE CEMENTO PORTLAND. Método de determinación del contenido de aire por técnica volumétrica.
- IRAM 1512: 1994. AGREGADO FINO NATURAL PARA HORMIGÓN DE CEMENTO PORTLAND.
- IRAM 1517:1988. AGREGADOS. Clasificación y descripción de las rocas más comunes y de sus minerales constituyentes.
- IRAM 1520: 1970. AGREGADOS FINOS. Métodos de laboratorio para la determinación de la densidad relativa, densidad relativa aparente y absorción de agua.
- IRAM 1524: 1982. HORMIGON DE CEMENTO PORTLAND. Preparación y curado en obra de probetas para ensayos de compresión y de tracción por compresión diametral.
- IRAM 1525: 1985. AGREGADOS. Métodos de ensayo de durabilidad por ataque con sulfato de sodio.
- IRAM 1531: 1994. AGREGADO GRUESO PARA HORMIGÓN DE CEMENTO PORTLAND.
- IRAM 1532: 2000. AGREGADOS GRUESOS. Método de ensayo de resistencia al desgaste con la máquina "Los Angeles".

- IRAM 1533: 1970. AGREGADOS GRUESOS. Métodos de laboratorio para la determinación de la densidad relativa, densidad relativa aparente y absorción de agua.
- IRAM 1534: 1985. HORMIGONES. Preparación y curado en laboratorio de probetas para ensayos de compresión y de tracción por compresión diametral.
- IRAM 1536: 1978. HORMIGON SECO DE CEMENTO PORTLAND. Determinación de la consistencia del hormigón de cemento portland por método del tronco de cono.
- IRAM 1540: 1986. AGREGADOS. Método de determinación del material fino que pasa a través del tamiz IRAM 75  $\mu\text{m}$  por lavado.
- IRAM 1541:1991. HORMIGÓN FRESCO. Muestreo.
- IRAM 1546: 1992. HORMIGONES DE CEMENTO PORTLAND. Método de ensayo a compresión.
- IRAM 1547: 1992. HORMIGONES DE CEMENTO PORTLAND. Método de ensayo de tracción por flexión.
- IRAM 1548: 1992. AGREGADOS. Determinación de la densidad a granel (comúnmente denominada “peso unitario” o “densidad aparente”) y de los espacios vacíos.
- IRAM 1551: 2000. HORMIGONES DE CEMENTO PORTLAND. Extracción, preparación y ensayos de testigos de hormigón endurecido.
- IRAM 1553: 1983. HORMIGON DE CEMENTO PORTLAND. Preparación de las bases de probetas cilíndricas y testigos cilíndricos, para ensayo de compresión.
- IRAM 1554: 1983. HORMIGON DE CEMENTO PORTLAND. Método de determinación de la penetración de agua a presión en el hormigón endurecido.
- IRAM 1562: 1978. HORMIGON FRESCO DE CEMENTO PORTLAND. Métodos de determinación de la densidad, el rendimiento y el contenido de aire.
- IRAM 1569: 1990. HORMIGONES Y MORTEROS Y SUS MATERIALES COMPONENTES. Definiciones.
- IRAM 1570: 1955. MORTEROS DE CEMENTO PORTLAND. Determinación de la consistencia por el método de escurrimiento.
- IRAM 1573: 1958. NIO HORMIGONES Y MORTEROS. Métodos de determinación de la calidad del agregado fino.
- IRAM 1574: 1990. HORMIGONES. Método para la determinación del espesor de testigos y de la altura de probetas de hormigón endurecido.
- IRAM 1593: 1994. Material calcáreo para cemento Pórtland con “filler calcáreo”.
- IRAM 1601: 1986. AGUA PARA MORTEROS Y HORMIGONES DE CEMENTO PORTLAND.
- IRAM 1602-1: 1988. HORMIGONES DE CEMENTO PORTLAND. Método por presión para la determinación del contenido de aire en mezclas frescas de hormigones y morteros- Método A.
- IRAM 1602-2: 1988. HORMIGONES DE CEMENTO PORTLAND. Método por presión para la determinación del contenido de aire en mezclas frescas de hormigones y morteros- Método B.

- IRAM 1604: 1991. HORMIGON DE CEMENTO PORTLAND. Método de determinación de la exudación.
- IRAM 1622: 2000. CEMENTO PORTLAND. Método de determinación de las resistencias a compresión y a flexión.
- IRAM 1623: 1965. CEMENTO PORTLAND. Método de ensayo de finura por determinación de la superficie específica por permeametría (método de Blaine).
- IRAM 1624: 1962. CEMENTO PORTLAND. Método de determinación de la densidad absoluta.
- IRAM 1627: 1997. AGREGADOS. Granulometría de agregados para hormigones.
- IRAM 1643: 1965. CEMENTOS. Muestreo.
- IRAM 1644: 1967. AGREGADOS GRUESOS PARA HORMIGONES. Método de ensayo de partículas blandas.
- IRAM 1657: 1968. AGREGADOS FINOS PARA HORMIGONES DE CEMENTO PORTLAND. Método de ensayo de la resistencia estructural.
- IRAM 1658: 1995. HORMIGONES. Método de ensayo de tracción simple por compresión diametral.
- IRAM 1661: 1970. HORMIGONES. Método de ensayo de resistencia a congelación en aire y deshielo en agua.
- IRAM 1662: 1995. HORMIGONES. Método de determinación del tiempo de fraguado por resistencia a la penetración.
- IRAM 1663: 2002. HORMIGON DE CEMENTO .ADITIVOS QUIMICOS.
- IRAM 1681: 1981. AGREGADO GRUESO. Método de determinación del factor de cubicidad.
- IRAM 1682: 1992. AGREGADO FINO. Determinación del equivalente de arena.
- IRAM 1687-1: 1996. AGREGADOS. Método para la determinación de partículas lajosas (Índice de lajosidad).
- IRAM 1687-2: 1997. AGREGADOS. Método para la determinación partículas elongadas (Índice de elongación).
- IRAM 1697: 1978. HORMIGON DE CEMENTO PORTLAND. HORMIGON FRESCO. Método de separación de agregados gruesos por tamizado.
- IRAM 1704: 1987. AGREGADOS. Método de determinación de las partículas desmenuzables.
- IRAM 1705: 1985. COMPACTADO DEL HORMIGON POR VIBRACIÓN. Equipos y operación. Requisitos y métodos de ensayo.
- IRAM 50000: 2000. CEMENTO. CEMENTO PARA USO GENERAL. Composición, características, evaluación de la conformidad y condiciones de recepción. Reemplaza IRAM 1503, IRAM 1592, IRAM 1630, IRAM 1636, IRAM 1651-1 e IRAM 1730.
- IRAM 50001: 2000. CEMENTO. CEMENTOS CON PROPIEDADES ESPECIALES. Reemplaza IRAM 1646, IRAM 1656, IRAM 1669-1, IRAM 1669-2, IRAM 1670, IRAM 1671 e IRAM 1691.

## ANEXOS

### TRANSFERENCIA DEL CONOCIMIENTO AL MEDIO

La transferencia de conocimientos al medio académico a nivel de grado se ha realizado a través de las actividades de docencia, en el dictado de las asignaturas Tecnología de los Materiales de Construcción y Tecnología del Hormigón, de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba y en Tecnología de los Materiales de Construcción de la Universidad Nacional de Córdoba. En el medio académico a nivel de posgrado se realizó una transferencia en el Instituto del Diseño de la Facultad de Arquitectura de la Universidad Católica de Córdoba, y también al medio empresarial en la empresa Premoldeados Arena Hnos., que se presentan en el Anexo, en la que se transfirieron los conocimientos adquiridos y la experiencia lograda en el desarrollo de esta tesis.

Con respecto a la transferencia al medio científico y profesional la misma se llevó a cabo en conferencias presentando los avances del desarrollo de la tesis, que se listan a continuación:

1. Conferencia: Un nuevo enfoque para el proporcionamiento de mezclas de hormigón. Diagramas característicos. Unidad Académica La Rioja. Universidad Tecnológica Nacional. La Rioja, 26 de Octubre de 2001.
2. Conferencia: Método de dosificación de hormigones de la Universidad de San Pablo, Brasil. Primeras Jornadas de Laboratorio. Departamento Ingeniería Civil. Facultad Regional Córdoba. Universidad Tecnológica Nacional. Octubre de 2001.
3. Conferencia: "Hormigones Coloridos". III Seminario de Especialización "Rumbos y Tendencias". Asociación Vocacional de Estudiantes e Ingenieros Tecnológicos, AVEIT. Córdoba, 6 de Setiembre de 2002.
4. Conferencia: "Hormigones Coloridos: Propiedades y Durabilidad". Jornada del Color. Fundación Konex. Grupo Argentino del Color. Buenos Aires, 13 de Diciembre de 2002.
5. Conferencia: "Hormigones Coloridos: Propiedades en estado endurecido". Fagdut (Federación Argentina Gremial Docentes Universitarios Tecnológicos) Departamento Ingeniería Civil. UTN-FRC. Córdoba, 10 de Octubre de 2002.

6. Conferencia: "Hormigones Coloridos: conceptos, aplicaciones, durabilidad". Empresa Arena Hnos. Premoldeados de Hormigón. Córdoba, 29 de Octubre de 2002.

Las presentaciones de trabajos en Congresos, Reuniones Técnicas y Jornadas fueron las siguientes:

1. VI Congreso Argentino del Color "ArgenColor 2002". Rosario, 9 al 12 de setiembre de 2002.  
"Hormigones coloridos: propiedades y durabilidad". Coautora.  
Organizado por: Universidad Nacional de Rosario. Grupo Argentino del Color.
2. Congreso Nacional sobre Patología y Recuperación de Estructuras. Sobral, Brasil, 29 de Marzo de 2003.  
"La Medición del Color en Morteros y Hormigones Coloridos y su relación con la Eflorescencia". Organizado por: Universidade Estadual Vale do Acaraú.
3. XV Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón. Santa Fé, setiembre 2003  
"Experiencias realizadas para determinar el transporte de agua en hormigones comunes y coloridos".  
Organizado por: Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Santa Fé.
4. XV Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón. Santa Fé, Setiembre 2003  
"Propiedades y medición del color en bloques de hormigones coloridos".  
Organizado por: Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Santa Fé.
5. I Jornadas UTN de Ciencia y Tecnología de los Materiales "JOMAT 2004". Santa Fé, 01 y 02 de Junio de 2004.  
"La influencia de los pigmentos en las propiedades mecánicas de hormigones coloreados"  
Organizado por: Universidad Tecnológica Nacional. Facultad Regional Santa Fé.
6. 46° Congresso Brasileiro do Concreto. Florianópolis, 14 al 17 de Agosto de 2004.  
"Hormigones coloridos: envejecimiento acelerado y medición del color"  
Organizado por : IBRACON
7. XVIII Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural. Buenos Aires, 15 al 17 de septiembre de 2004.  
"Hormigón coloreado: influencia de los pigmentos en las propiedades mecánicas"

Organizado por: AIE. Asociación de Ingenieros Estructurales.

8. VII Congreso ArgenColor 2004. Buenos Aires, 9 al 12 de Noviembre de 2004.  
“Medición de las coordenadas cromáticas en hormigones pigmentados con diferentes texturas superficiales”  
Organizado por: Universidad Nacional de Buenos Aires. Grupo Argentino del Color.
  
9. VII Congreso ArgenColor 2004. Buenos Aires, 9 al 12 de Noviembre de 2004.  
“Hormigones coloreados: belleza y durabilidad para siempre?”  
Organizado por: Universidad Nacional de Buenos Aires. Grupo Argentino del Color.

---

## ANEXO I

### FRISOS DE HORMIGÓN COLOREADO. INSTITUTO DEL DISEÑO. FACULTAD DE ARQUITECTURA. UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA.

AÑOS 2002-2003

#### INTRODUCCIÓN

---

Una aplicación relevante de los hormigones coloreados es en obras de arte o estructuras donde se privilegia la estética. En los años 2002 y 2003, durante el desarrollo de la tesis, la autora realizó, como docente investigadora invitada, una experiencia de transferencia de la tecnología de hormigones coloreados en el Instituto del Diseño de la Facultad de Arquitectura de la Universidad Católica de Córdoba.

El Director del Instituto, Arq. César Naselli y las docentes del curso, Arq. Cecilia Cherubini y Arq. Adriana de Urtiaga fijaron el objetivo: la exploración fenomenológica de la materia “hormigón coloreado” logrando como producto final un friso, elaborado por docentes y alumnos, compuesto por paneles individuales.

#### DESARROLLO

---

**“ El Hormigón Armado es el mejor material que el hombre ha hallado hasta el momento. El hecho de que mediante el pueda obtener cualquier forma y que soporte cualquier sollicitación roza lo maravilloso.”**

**P.L. Nervi**

Para los docentes del Instituto del Diseño, el hormigón carece de forma propia, original y puede ser transformado a través de la voluntad creadora en una expresión de valores independientes. Sus cualidades como sustancia pueden ser aprovechadas a partir de un particular medio de generación que es el vertido, resultando de este proceso restricciones formales que están dadas por los límites técnicos del encofrado.

---

Consideran personalidades relacionadas al hormigón, como ejemplos en la historia de la arquitectura, entre otros, a:

- Auguste Perret
- Gaudí
- Torrage
- Le Corbusier
- Wright
- Nervi
- Felix Candela
- Kenzo Tange
- Paul Rudolph
- Khan
- Tadao Ando
- Scarpa
- Calatrava

### **OBJETIVOS**

- 
- 1.- Establecer los vínculos entre los diferentes componentes del hormigón y sus cualidades como materia, acto de reconocer las sensaciones a partir de la percepción.
  - 2.- Manipular los materiales intervinientes reconociendo sus cualidades.
  - 3.- Proyectar, construir y tratar los encofrados.
  - 4.- Reconocer intuitivamente las cualidades superficiales posibles del propio hormigón. Estas cualidades se asocian a ideas predeterminadas sobre el carácter de cada pieza elaborada y se unen a las posibilidades texturales, rítmicas, direccionales. Indagar en la incorporación de coloraciones, tensiones, regulaciones, orden.
  - 5.- Reconocer las cualidades expresivas del material.
  - 6.- Reconocer las ideas a partir de las cualidades encontradas.
  - 7.- Movilizar al sujeto creador en relación a las ideas y su imagen.
  - 8.- Detectar las ideas contenidas en cada uno de sus componentes.
  - 9.- Indagar las ideas implícitas en el hormigón:
    - Plástica - Pétreo
    - Libre - Móvil
    - Fantasía - Estructura
    - Audacia - Racionalidad
    - Imperfección - Perfección

---

## HIPÓTESIS CENTRALES

---

“La materia acumula desde su origen en fabricación y conformación, ideas y datos susceptibles a ser traducibles en una construcción.”

“Los procedimientos de fabricación imprimen a la materia ideas relativas a su significado.”

---

## PROCEDIMIENTO DE EXPLORACIÓN

---

- a. Selección de los materiales intervinientes en el proceso de elaboración del hormigón.
  - Agregados gruesos
  - Agregados finos
  - Cemento
  - Agua
- b. Determinación de las características y las posibilidades de cada uno de los componentes independientemente. Descripción de cada uno de los elementos constitutivos y sus cualidades.
- c. Elaboración de un encofrado de 30 x 60 x 8 cm, en forma individual.
- d. Confección de los formatos internos de los encofrados en forma grupal armando una totalidad entendida que manifieste el transcurso del tiempo de un año, materializado en piezas de hormigón, estableciendo ideas que generen una totalidad.
- e. Elaboración de la masa de hormigón.
- f. Colocación del hormigón en encofrados, previa colocación de agente desmoldante o productos que permitan su desencofrado posterior.
- g. Extracción de encofrados, luego de varios días de curado.
- h. Tratamiento superficial de los hormigones a través de procedimientos físicos y químicos.
- i. Por cada instancia exploratoria se procederá al registro descriptivo y su posterior integración al informe, siguiendo las normativas del Instituto de Diseño.

## PREPARACIÓN DE LOS PANELES COMPONENTES DEL FRISO DE HORMIGÓN

### ENCOFRADOS

- Medidas: 30 x 30 x 8 cm.
- Lograr laterales del encofrado que sean fácilmente desarmables.
- Colocar en el ángulo inferior un perfil de sección triangular para evitar el borde vivo, tal como se indica en la Fig. 1.
- Usar desmoldante para pintar el encofrado.

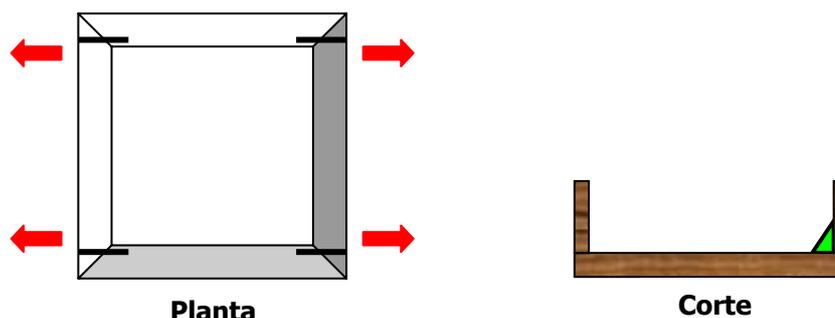


Fig. 1: Esquema de encofrado en planta y corte

### VOLÚMENES Y TEXTURAS

- Dejar libres 3 a 4cm del borde para alojar un elemento.
- Colocar 3 varillas de 4,2mm separadas aproximadamente 7cm en cada sentido (forma ortogonal) tal como se indica en la Fig. 2.
- Cuando se dejan elementos con el objetivo de conseguir un vacío, enmarcar los bordes con varilla de 4,2mm o alambre de atar y recubrir con papel o film y aceitarlo.

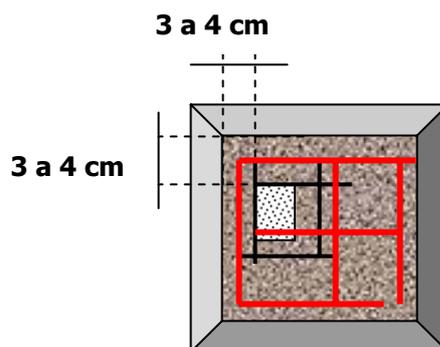


Fig. 2: Ubicación de armaduras

### Sugerencias para el desencofrado:

Desmoldar después de las 24 horas y antes de las 48 horas de vertido el hormigón, cuidando el orden de desarmado del encofrado y golpeando en forma suave.

## DOSIFICACIÓN DE HORMIGÓN SIN PIGMENTO

- Contenido de cemento alto, dosificación expresada en la Tabla 1.
- Tamaño máximo del agregado grueso 20 mm.
- Consistencia plástica.
- Compactar bien la mezcla en estado fresco.

**Tabla 1 Dosificación del hormigón sin pigmento  
H 1 (2%) Para 1 m<sup>3</sup> de hormigón**

<b>Agua</b>	200 kg
<b>Cemento</b>	400 kg
<b>Agregado fino</b>	795 kg
<b>Agregado grueso</b>	970 kg
<b>Peso de la unidad de volumen</b>	2365 kg/m <sup>3</sup>

## DOSIFICACIONES PROPUESTAS PARA HORMIGONES COLOREADOS

### H1 Hormigón con pigmento amarillo

Se dosificaron tres mezclas, cuyas dosificaciones se presentan en la Tabla 2, con un contenido de cemento alto y contenido de pigmento amarillo (con respecto al peso de cemento) de 2%, 5% y 8%. Se moldearon muestras de 15cm de diámetro por 5cm de altura para cada contenido de pigmento, realizándose un trabajo de textura superficial en varias muestras.

**Tabla 2 Dosificación de hormigones con pigmento amarillo en distintos porcentajes**

<b>H 1 (2%) Para 1 m<sup>3</sup> de hormigón</b>	
<b>Agua</b>	208 kg
<b>Cemento</b>	370 kg
<b>Agregado fino</b>	927 kg
<b>Agregado grueso</b>	834 kg
<b>Pigmento (2%)</b>	7 kg
<b>Peso de la unidad de volumen</b>	2346 kg/m <sup>3</sup>
<b>H 1 (5%) Para 1 m<sup>3</sup> de hormigón</b>	
<b>Agua</b>	208 kg
<b>Cemento</b>	370 kg
<b>Agregado fino</b>	927 kg
<b>Agregado grueso</b>	834 kg
<b>Pigmento (5%)</b>	18 kg
<b>Peso de la unidad de volumen</b>	2357 kg/ m <sup>3</sup>
<b>H 1 (8%) Para 1 m<sup>3</sup> de hormigón</b>	
<b>Agua</b>	208 kg
<b>Cemento</b>	370 kg
<b>Agregado fino</b>	927 kg
<b>Agregado grueso</b>	834 kg
<b>Pigmento (8%)</b>	30 kg
<b>Peso de la unidad de volumen</b>	2369 kg/m <sup>3</sup>

## H2 Hormigón con pigmento rojo

Se dosificaron tres mezclas, cuyas dosificaciones se presentan en la Tabla 3, con un contenido de cemento bajo y contenido de pigmento rojo (con respecto al peso de cemento) de 2, 5 y 8 %. Se moldearon muestras de 15cm de diámetro por 5cm de altura para cada contenido de pigmento, realizándose un trabajo de textura superficial varias de ellas, al igual que en las anteriores.

**Tabla 3 Dosificación de hormigones con pigmento rojo en distintos porcentajes**

<b>H2 (2%) Para 1 m<sup>3</sup> de hormigón</b>	
<b>Agua</b>	168 kg
<b>Cemento</b>	224 kg
<b>Agregado fino</b>	1120 kg
<b>Agregado grueso</b>	895 kg
<b>Pigmento (2%)</b>	4 kg
<b>Peso de la unidad de volumen</b>	2411 kg/m <sup>3</sup>
<b>H2 (5%) Para 1 m<sup>3</sup> de hormigón</b>	
<b>Agua</b>	168 kg
<b>Cemento</b>	224 kg
<b>Agregado fino</b>	1120 kg
<b>Agregado grueso</b>	895 kg
<b>Pigmento (5%)</b>	11 kg
<b>Peso de la unidad de volumen</b>	2418 kg/m <sup>3</sup>
<b>H2 (8%) Para 1 m<sup>3</sup> de hormigón</b>	
<b>Agua</b>	168 kg
<b>Cemento</b>	224 kg
<b>Agregado fino</b>	1120 kg
<b>Agregado grueso</b>	895 kg
<b>Pigmento (8%)</b>	18 kg
<b>Peso de la unidad de volumen</b>	2425 kg/m <sup>3</sup>

## H 3 Hormigón con pigmento amarillo y fibras de polipropileno

Se dosificó una mezcla similar al H1, cuya dosificación se presenta en la Tabla 4, pero con la adición de fibras para cambiar la textura.

**Tabla 4 Dosificación de hormigón con pigmento amarillo y fibras**

<b>Para 1 m<sup>3</sup> de hormigón</b>	
<b>Agua</b>	208 kg
<b>Cemento</b>	370 kg
<b>Agregado fino</b>	927 kg
<b>Agregado grueso</b>	834 kg
<b>Fibras</b>	1 kg
<b>Pigmento (5%)</b>	18 kg
<b>Peso de la unidad de volumen</b>	2358 kg/m <sup>3</sup>

#### H 4 Hormigón con pigmento negro y fibras de polipropileno

En la Tabla 5 se presenta una dosificación igual al anterior pero con pigmento negro.

**Tabla 5 Dosificación de hormigón con pigmento negro y fibras**

<b>Para 1 m<sup>3</sup> de hormigón</b>	
<b>Agua</b>	208 kg
<b>Cemento</b>	370 kg
<b>Agregado fino</b>	927 kg
<b>Agregado grueso</b>	834 kg
<b>Fibras</b>	1 kg
<b>Pigmento (5%)</b>	18 kg
<b>Peso de la unidad de volumen</b>	2358 kg/m <sup>3</sup>

#### H 5 Hormigón con pigmento marrón y sin finos

En la Tabla 6 se presenta una dosificación con pigmento marrón y sin agregado fino para lograr una textura abierta.

**Tabla 6 Dosificación de hormigón con pigmento marrón y sin agregado fino**

<b>Para 1 m<sup>3</sup> de hormigón</b>	
<b>Agua</b>	256 kg
<b>Cemento</b>	512 kg
<b>Agregado grueso</b>	1536 kg
<b>Pigmento (5%)</b>	25 kg
<b>Peso de la unidad de volumen</b>	2329 kg/m <sup>3</sup>

Con estas dosificaciones propuestas se siguió el procedimiento establecido por los docentes del curso, que se ilustra en la secuencia de figuras en las que se recorre la experiencia realizada con docentes y alumnos del curso.



**Fig. 1 Exploración inicial de texturas, tonos y colores (Año 2002)**



**Fig. 2 Dibujo en papel del friso para luego modular los paneles individuales considerando la continuidad entre los mismos (Año 2002)**



**Fig. 3 Construcción del encofrado, armado y transferencia del dibujo, agregando volúmenes (Año 2002)**



**Fig. 4 Colocación del hormigón coloreado en el encofrado (Año 2002)**



**Fig. 5 Compactación del hormigón coloreado (Año 2002)**



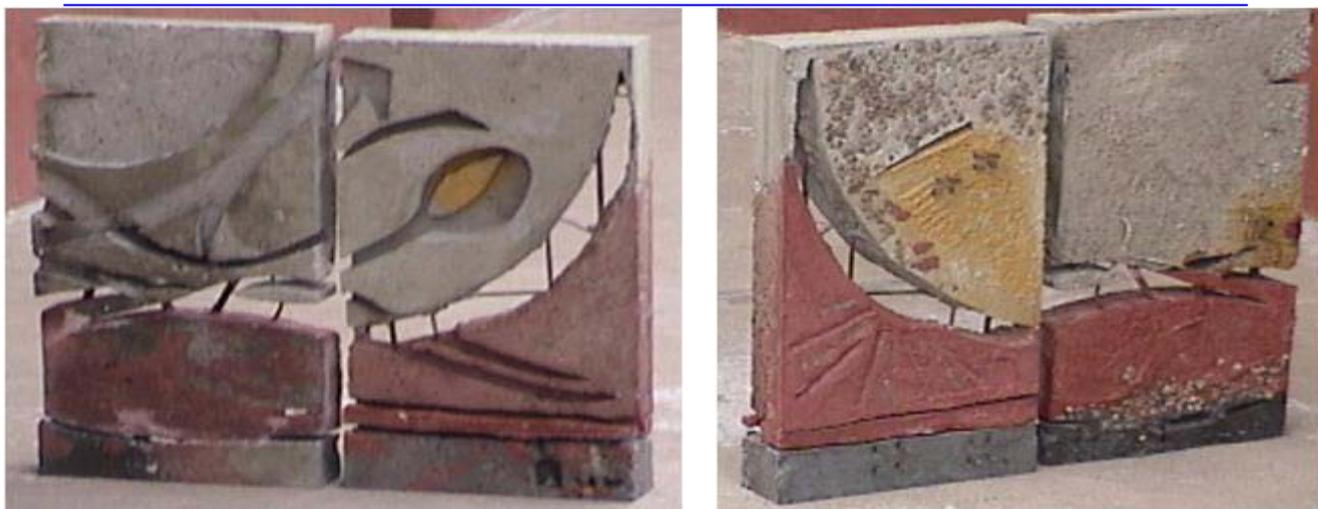
**Fig. 6 Vista del hormigón colocado y terminado (Año 2002)**



**Fig. 7 Vista de frente del panel individual de hormigón coloreado (Año 2002)**



**Fig. 8 Vista del dorso del panel individual de hormigón coloreado (Año 2002)**



**Fig. 9** Vista de paneles individuales de hormigón coloreado en los que se aprecia la continuidad de formas y colores (Año 2002)



**Fig. 10** Integración preliminar del friso con paneles individuales (Año 2002)



**Fig. 11** Friso de hormigón coloreado integrado por paneles individuales ubicado en el ingreso principal de la Facultad de Arquitectura del Universidad Católica de Córdoba (Año 2002)

En el año 2003 el objetivo del Director y docentes del Instituto del Diseño fue lograr mayor detalle en las texturas, convocando nuevamente a la autora de esta tesis y a la reconocida artista plástica, Martha Bersano. En estos paneles se logró una innovación al obtener piezas donde se lograron texturas bien definidas y variadas que combinada con los colores, tonos, distintos acabados superficiales, permitieron alcanzar objetivo con muy buenos resultados; algunos detalles se presentan en las Fig. 12 y Fig. 13.



**Figura 12 Vista de paneles que integran un friso de hormigón coloreado (Año 2003)**



**Figura 13 Detalle de texturas obtenidas con hormigón coloreado integralmente (Año 2003)**

## CONCLUSIONES

Se alcanzaron los objetivos propuestos, logrando materializar en el hormigón coloreado aplicaciones de texturas, tonos y colores que permitieron integrar frisos que hoy se encuentran expuestos en la ciudad de Córdoba, quedando abiertas propuestas de líneas de investigación futuras en el tratamiento de las superficies.

---

## **ANEXO II**

### **LA MEDICION DEL COLOR EN MORTEROS Y HORMIGONES COLOREADOS Y SU RELACION CON LA EFLORESCENCIA**

**EMPRESA PREMOLDEADOS DE HORMIGON ARENA HNOS.**

**AÑO 2002**

#### **1. INTRODUCCION**

El bloque de hormigón ha demostrado en las últimas décadas su gran economía y versatilidad para la construcción de viviendas y los adoquines constituyen en la actualidad una buena alternativa para diversas aplicaciones como plantas industriales, estacionamientos, senderos y otros.

El diseño de estructuras con bloques de hormigón permite el desarrollo de un sistema constructivo modular, racionalizado y abierto, con el que se logra un alto rendimiento económico. Su bajo costo de producción con sistemas de alta tecnología permite obtener valores muy inferiores a la mayoría de los sistemas tradicionales siendo comparativamente menor su inversión en infraestructura respecto de los sistemas industrializados. Si a eso se le suma la posibilidad de colorearlos, las ventajas se incrementan.

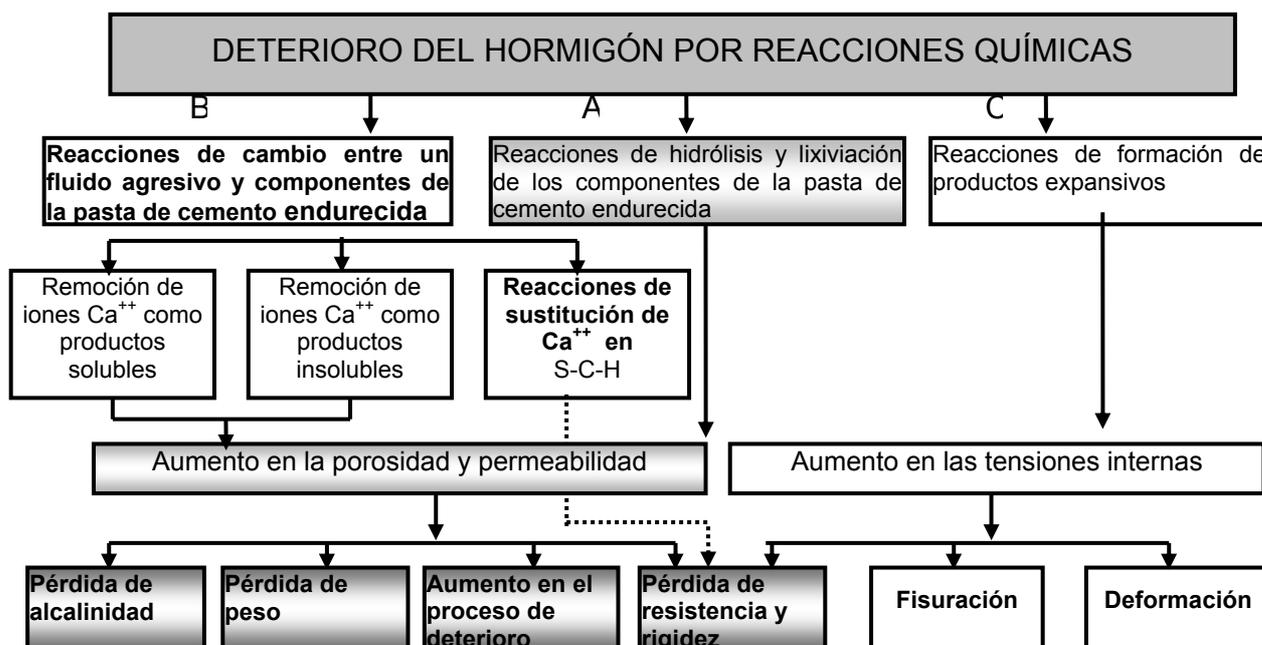
Pero no todo es ventaja; uno de los síntomas patológicos que se presentan en los bloques de hormigón con más frecuencia, según DOWSON<sup>1</sup>, es la aparición de manchas por eflorescencia. Estas manchas pueden significar un problema para la estética de la obra. Esto se ve agravado para el usuario de bloques de hormigón coloridos, que es más exigente, transformándose la eflorescencia en un fenómeno desagradable que echa a perder las expectativas puestas en el producto final, aún sin tener riesgo estructural.

En esta investigación se ha utilizado la medición de color como un método acelerado de evaluar la aparición de eflorescencias. Esa posibilidad significa un aporte a la toma de decisión, por ejemplo, de la selección de los materiales a emplear, propuestas arquitectónicas de diseño y cuidados en el curado para minimizar la presencia de eflorescencias en bloques y adoquines fabricados por Premoldeados Arena Hermanos, planta ubicada en la ciudad de Córdoba

## 2. LIXIVIACION Y EFLORESCENCIA

El agua pura generalmente se encuentra en los ríos o lagos que reciben el aporte de agua de deshielo, el agua de lluvia o de condensación en las torres de enfriamiento. El agua es considerada blanda o pura cuando contiene una muy baja proporción de sales disueltas en su composición. Ese agua en contacto con el hormigón o la pasta de cemento tiende a descomponer o hidrolizar los productos de hidratación de base cálcica ya que su solubilidad es relativamente alta en este medio. Este proceso se conoce con el nombre de *lixiviación*.

METHA & MONTEIRO<sup>2</sup> proponen el cuadro presentado en la Fig. 1, para explicar los tipos de reacciones químicas, entre ellas la lixiviación, responsables del deterioro del hormigón.



**Figura 1 Tipos de reacciones químicas responsables del deterioro del hormigón. La degradación del hormigón, como resultado de la lixiviación (B) (adaptado de METHA & MONTEIRO, 2000)<sup>2</sup>**

Por otra parte, HELENE<sup>3</sup> considera a la lixiviación como uno de los mecanismos preponderantes y frecuentes de envejecimiento y deterioro del hormigón. La sintomatología básica presenta eflorescencias de carbonato, pudiendo llegar a manifestar una superficie arenosa o con áridos expuestos sin la pasta superficial. BICZOK<sup>4</sup> presenta resultados de investigaciones mostrando la pérdida de resistencia de pastas de cemento Pórtland por la lixiviación.

IRASSAR<sup>5</sup> informa que el mecanismo de degradación por lixiviación puede modelarse teniendo en cuenta que el principal ion que lixivia es el  $\text{Ca}^{+2}$  que proviene de la disolución de CH y luego de la descomposición de C-S-H. Por este motivo la velocidad de degradación es determinada por la tasa de disolución y el movimiento del  $\text{Ca}^{+2}$  dentro del hormigón.

El incremento de la relación agua/cemento (*a/c*) que produce un aumento de la porosidad y conectividad de la estructura de poros afecta considerablemente la vulnerabilidad frente al ataque de aguas puras. Este aspecto es importante, pues como se presenta en el punto referido a la caracterización de los hormigones, se ha trabajado con relaciones *a/c* altas con el objetivo de bien verificar, a corto plazo, el fenómeno de la lixiviación.

### **3. LA MEDICIÓN DEL COLOR Y LAS EFLORESCENCIAS**

Si bien la producción de hormigones coloridos requiere un alto grado de control para lograr el producto deseado, no menos importante es garantizar el mantenimiento de las condiciones exigidas con el paso del tiempo.

Cómo podemos entonces cuantificar el color, ya que es su principal característica? La respuesta está en la colorimetría ya que esta permite que la impresión sensorial “color” pueda ser expresada cuantitativamente por un número.

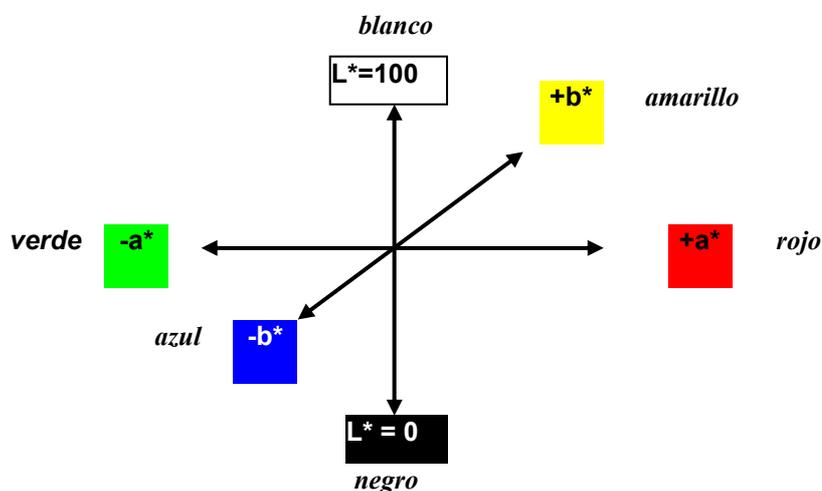
Para MARQUES FILHO<sup>6</sup> la colorimetría es la ciencia de la medición del color. Según este autor, el principio de percepción visual del color envuelve tres componentes que son:

- Luz
- Objeto
- Observador

La asociación de estos componentes forman los valores triestímulos que representan determinado color y son el entorno y el sistema visual humano los que interactúan en la creación y percepción del color.

El sistema básico CIE para especificaciones del color fue desarrollado en 1931 y reformulado en 1964 para un campo visual más grande (MISTRICK<sup>7,8</sup>); el sistema CIELAB consiste en un gráfico cartesiano espacial que describen el color de una fuente de luz reflejada por una superficie bajo condiciones de iluminación especificadas<sup>9</sup>.

La posibilidad de “medir el color” permite verificar los cambios con respecto al original dentro de márgenes establecidos y realizar mediciones para evaluar la durabilidad de los hormigones coloridos e inclusive interpretar desvíos o diferencias de color con respecto al patrón.



**Figura 2 Esquema del Sistema CIELAB donde se indican las coordenadas cromáticas. La variación sobre el eje L corresponde a cambios en la luminosidad y el centro del diagrama es acromático**

Algunos conceptos relacionados importantes son:

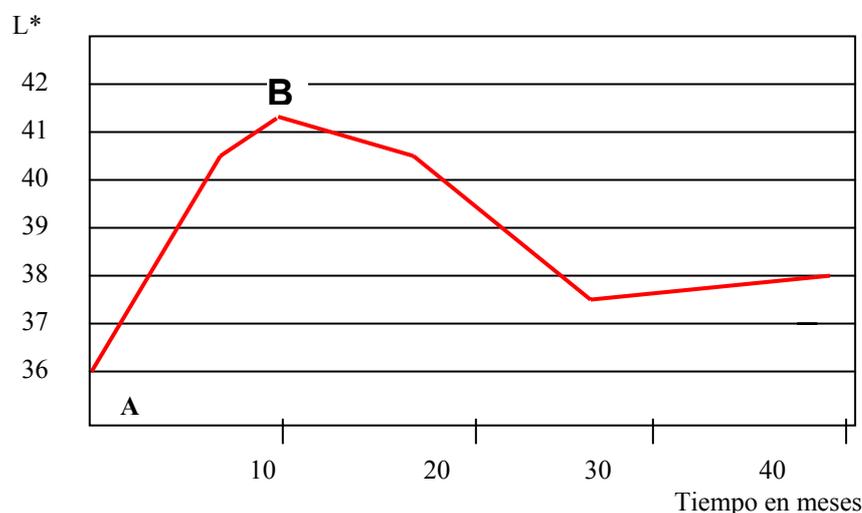
**Matiz:** posición de  $a^*$  y  $b^*$  en el sistema;  $a^*$  y  $b^*$  pueden ser utilizados para identificar los colores azul, rojo, verde y amarillo así como los matices entre ellos.

**Luminosidad:** variación de  $L^*$  en el sistema; generalmente se dice que un color es más claro o más oscuro.

**Saturación:** corresponde a  $C^*$ ; indica cuando un color es brillante o apagado. Si  $a^*$  y  $b^*$  son iguales a cero, el color es blanco, gris o negro, dependiendo del valor de  $L^*$ .

TEICHMANN<sup>10</sup> propone medir la eflorescencia utilizando directamente el valor de la luminosidad  $L^*$ . En la Fig. 3 se presenta un gráfico del desarrollo de la eflorescencia durante la exposición a la intemperie en tejas de hormigón negro que han sido expuestas durante un período de 40 meses. Los depósitos blancos de carbonato de calcio pueden ser vistos y medidos sobre el sustrato negro.

A los efectos de acortar este período, se realizó en este trabajo, como se indica más adelante, la exposición de las muestras en una cámara de envejecimiento acelerado con ultravioleta y ciclos de humedecimiento y secado, asociado a la medición del parámetro  $L^*$  con un colorímetro triestímulos.



**Figura 3 Evolución de  $L^*$  con el tiempo. Se observa una curva de crecimiento hasta el punto B y luego comienza a disminuir (TEICHMANN<sup>10</sup>, 1995)**

## 4. MATERIALES EMPLEADOS

### 4.1. Agregados pétreos

El principal componente de un bloque de hormigón es la fracción de agregados pétreos que constituye entre un 85 a 90 % de la unidad<sup>11</sup>. El alto contenido de estos componentes hace necesaria una gran fuerza de compactación y el uso de aditivos para tener la posibilidad de aglutinarse entre sí por medio del cemento Pórtland.

Los agregados deben cumplir con ciertos requisitos de granulometría, peso específico y absorción, que son las determinaciones indispensables para realizar un buen control de calidad. Con respecto a la composición granulométrica existe

en la bibliografía<sup>11,12</sup> recomendaciones referidas al módulo de fineza, que es un índice numérico que caracteriza al material. También se indican recomendaciones referidas a un contenido de 63% de agregados finos y 37% de agregados gruesos. En este caso se utilizan cuatro fracciones de agregados, de las que se tomaron dos muestras, cuyos resultados de ensayo se resumen en la Tabla 1, que se identifican de la siguiente forma:

- M1: agregado fino
- M2: agregado fino
- M3: agregado grueso
- M4: agregado grueso

**Tabla 1 Caracterización tecnológica de los áridos. Norma ASTM C 128-93<sup>14</sup>, Norma ASTM C 127-88<sup>15</sup>, Norma IRAM 1533<sup>16</sup> y Norma IRAM 1627<sup>17</sup>**

Muestras	Tipo	Peso Específico	Absorción	Granulometría	Módulo de fineza / Tmax
		[ kg/dm <sup>3</sup> ]	[%]		
M1	Arena natural	2,63	1,10	Cumplen con curvas exigidas por Normas nacionales (IRAM)	2,60
M2	Arena natural	2,62	1,00		3,70
M3	Arena trituración	2,65	0,80		3,50
M4	Agregado grueso	2,68	1,20		13,2 mm

#### 4.2. Cemento Pórtland

Con respecto al tipo de cemento se utilizó un cemento Pórtland con filler calcáreo (CPF 40) cuyos resultados de análisis físico y resistencias mecánicas se indican en la Tabla 2 .

**Tabla 2 Caracterización tecnológica del cemento Pórtland.**

CEMENTO PORTLAND CON FILLER CALCÁREO- CPF 40				
ENSAYOS FISICOS		Unidad	RESULTADO	Requisito IRAM
Retenido tamiz 75 µ m		g/100g	1.2	<15
Superficie específica (Blaine)		m <sup>2</sup> /kg	393.5	>250
Expansión en autoclave		%	-0.01	<1
Tiempo de fraguado inicial		h:min	02:30	>0:45
Tiempo de fraguado final		h:min	03:30	<10:00
RESISTENCIA MECÁNICA A LA COMPRESIÓN				
DÍAS	Unidad	RESULTADO	Requisito IRAM	
2	MPa	20.7	>10	
7	MPa	34.9	no hay	
28	MPa	44.7	>40 y <60	

### **4.3. Pigmentos**

Los pigmentos para colorear hormigones son considerados como aditivos químicos y su uso se contempla en la norma ASTM C 979<sup>18</sup>. En el ACI 212.3R<sup>19</sup> se considera su uso como aditivos colorantes para morteros y hormigones y se menciona que los pigmentos específicamente preparados para el uso en morteros y hormigones están disponibles tanto a partir de materiales sintéticos como naturales.

Los principales métodos para obtener hormigones coloridos son la coloración integral de la masa de hormigón o la aplicación del color luego que éste ha fraguado y endurecido; en este caso el proceso de fabricación de bloque utilizó la primera técnica. Consiste en la adición de un pigmento durante el ciclo de mezclado. Pueden utilizarse tres tipos de productos: pigmentos naturales y sintéticos, aditivos multicomponentes coloreantes y morteros coloreantes que contienen además de los pigmentos agentes de humectación y fillers inertes<sup>20</sup>.

De estos productos, los pigmentos sintéticos son los más utilizados y los utilizados en esta fábrica de premoldeados son de base óxidos de hierro. Para éste experimento se utilizaron pigmentos de color rojo, amarillo, terracota y negro.

### **4.4. Aditivo**

Se empleó un aditivo plastificante / reductor de agua utilizando una dosis alrededor de 0,3% en peso (masa) del cemento.

### **4.5. Caracterización del hormigón**

Los hormigones se realizaron en una planta automatizada. La consistencia es muy seca, similar a tierra seca, o sea, cero de “slump”, debido a que el proceso de fabricación de los bloques utiliza una energía de vibración muy fuerte. Las dosificaciones utilizadas fueron provistas por la empresa de premoldeados, conforme se presenta en la Tabla 3.

**Tabla 3 Resumen de dosificaciones para un metro cúbico de hormigón**

Materiales	Peso en kilogramos Color rojo		Peso en kilogramos Color amarillo	
		a/c =0,66		a/c =0,74
Agua	141		140	
Cemento	212		188	
Agregados pétreos	1809		1830	
Pigmento	8		7	
Aditivo	0,6		0,6	
Peso de la unidad de volumen	2171 kg/m <sup>3</sup>		2165 kg/m <sup>3</sup>	

## 5. PREPARACIÓN DE MUESTRAS Y MÉTODOS DE ENSAYO

### 5.1. Muestreo y preparación de las muestras

En planta se muestrearon probetas cilíndricas de 10 x 20 cm y bloques de 19 x 19 x 39 cm, tomándose muestras de hormigones de color rojo, amarillo, terracota y negro. Para la compactación de las probetas cilíndricas de debió utilizar un equipo de compactación tipo Proctor debido a que la consistencia de los hormigones es muy seca; se determinaron los pesos de las probetas a los efectos de comprobar si la compactación era efectiva, cuyos resultados se presentan en la Tabla 4.

**Tabla 4 Preparación de las muestras para cada tipo de ensayo.**

Ensayo	Preparación de las muestras
Absorción capilar	Corte de probetas de 10 x 20 cm en rodajas de 5 cm de altura
Ciclos de UV y mojado-secado	Corte las paredes de bloques de hormigón en placas de 10 cm x 10 cm.

### 5.2. Ensayos realizados

#### 5.2.1. Succión capilar recomendación RILEM 116-PCD "Permeability of concrete as a criterion of its durability"

Esta recomendación permite estimar la absorción del hormigón endurecido. La preparación de las muestras consiste en cortar cilindros de 15 cm de diámetro y 5cm de altura; estas muestras se sumergen parcialmente en agua y se determina sus peso a los 10 minutos, 1 hora, 4 horas y 24 horas de iniciado el ensayo, conforme se muestra en la Fig. 4.

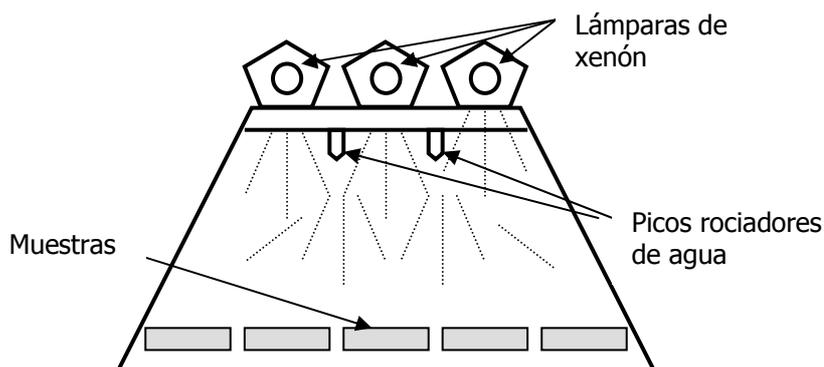
**Figura 4 Esquema de muestra sometida a ensayo de succión capilar**

### 5.2.2. Ciclos de ultravioleta y mojado-secado

Para el ensayo de intemperismo, se utilizó una equipo Q SUN 3000 Xenon Test Chamber. Esta cámara simula los efectos perjudiciales y dañinos del intemperismo y se utiliza para ensayar, bajo ciertos aspectos, la durabilidad de los materiales. Este equipo sigue las normas ASTM G151 ( Exposing Nonmetallic Materials in Accelerated Test Devices that Use Laboratory Light Sources) y ASTM G155 (Operating Xenon Arc Light Apparatus for Exposure of Nonmetallic Materials), conforme se presenta en la Fig. 5.

En pocos días o semanas puede producir daños que en el ambiente natural llevaría meses o años de exposición. El efecto perjudicial de la luz del sol es simulado utilizando lámparas de xenón. La secuencia de luz, oscuridad y períodos de spray de agua se controlan automáticamente.

El ciclo predeterminado para la exposición de las muestras, de acuerdo a la experiencia local, fue de una hora y cuarenta y dos minutos de ultravioleta y dieciocho minutos de spray con agua. El tiempo total de exposición fue de 252 horas realizándose observaciones visuales y mediciones de las coordenadas cromáticas  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$ , cada 50 horas aproximadamente.



**Figura 5 Esquema de la cámara de envejecimiento acelerado. Se indica la posición de las lámparas y picos rociadores de agua**

### 5.2.3. Medición de las coordenadas cromáticas

Para la medición del color se utilizó un Colorímetro Micro Color II Dr. Lange cuyo principio de medición es la medición del color y sus diferencias de acuerdo al método de los valores triestímulos de la norma DIN5033. El equipo está integrado por una sonda de medición de esfera combinada con lámpara de xenón; la lámpara proporciona una iluminación difusa sobre la muestra a medir la que es reflejada y medida a un ángulo de 8°. Para este trabajo se midieron las coordenadas cromáticas  $L^*$ ,  $a^*$  y  $b^*$ . Se procesaron los datos y se calcularon, los parámetros indicados en la Tabla 5.

**Tabla 5 Parámetros colorimétricos**

Parámetro	Significado	Cálculo
$\Delta L^*$	Diferencia de luminosidad	$L^*_{\text{final}} - L^*_{\text{inicial}}$
$\Delta a^*$	Diferencia eje rojo-verde	$a^*_{\text{final}} - a^*_{\text{inicial}}$
$\Delta b^*$	Diferencia eje amarillo-azul	$b^*_{\text{final}} - b^*_{\text{inicial}}$
$C^*$	Saturación	$(a^*)^2 + (b^*)^2$
$\Delta C^*$	Diferencia de saturación	$\sqrt{(\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$
$E^*$	Color total	$\sqrt{(L^*)^2 + (a^*)^2 + (b^*)^2}$
$\Delta E^*$	Diferencia total de color	$\sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$

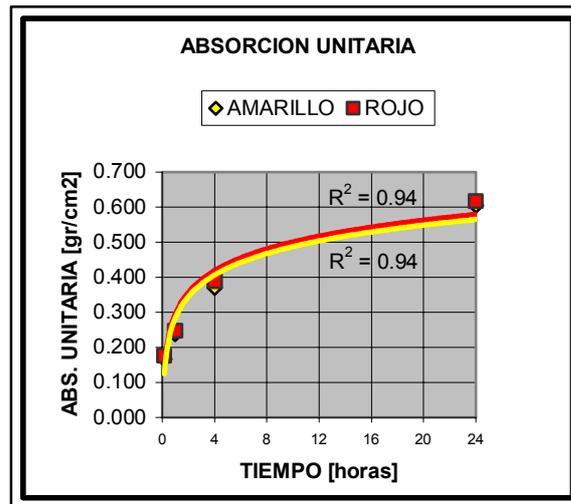
## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 6.1. Resultados del ensayo de absorción capilar. (RILEM TC 116-PCD: Permeability of Concrete as Criterion of its Durability).

A pesar de que se busque la máxima compacidad del hormigón extremando los requisitos granulométricos de los agregados y la dosificación del hormigón, siempre existirá un volumen de vacíos. La porosidad y la conectividad de la estructura de poros afecta considerablemente la vulnerabilidad del hormigón frente al ataque de aguas puras. En la Tabla 6 se presentan resultados del ensayo de absorción capilar para los hormigones con pigmentos rojo y amarillo y se grafican en la Fig. 7.

**Tabla 6 Succión capilar en g/cm<sup>2</sup> para los colores amarillo y rojo**

ABSORCIÓN UNITARIA (g/cm <sup>2</sup> )				
Color	Tiempo (Horas)			
	0.167	1	4	24
AMARILLO	0.167	0.238	0.369	0.605
ROJO	0.176	0.247	0.388	0.616



**Figura 7 Curvas de absorción unitaria de agua en función del tiempo**

En trabajos anteriores<sup>21</sup>, para materiales locales, se determinó que la absorción unitaria a las 24 horas, para las mismas relaciones agua/cemento es del orden de 0,3 a 0,4 g/cm<sup>2</sup>. En la Fig. 7 se observa que la absorción unitaria alcanza valores cercanos a 0,6 g/cm<sup>2</sup> superando ampliamente los valores obtenidos anteriormente e indicando la elevada porosidad de estos hormigones.

## 6.2. De la medición y cálculo de las coordenadas cromáticas.

Según TEICHMANN<sup>10</sup> y KRESSE<sup>22</sup>, que han estudiado la medición de la eflorescencia por métodos colorimétricos, la luminosidad  $L^*$  puede ser utilizada como una medición directa de la eflorescencia. A partir de este concepto la ventaja de esta experiencia es emplear además la cámara de envejecimiento acelerado para simular y acortar los tiempos del proceso natural.

En la Tabla 7 se presentan los resultados promedios de las determinaciones de las coordenadas cromáticas  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ , para cada muestra y para cada período de medición. También se presentan los resultados del procesamiento de los datos para obtener la variación de las coordenadas, la saturación y su variación y el color total y su variación.

**Tabla 7 Resumen de parámetros colorimétricos para los ciclos y muestras analizadas**

COLOR	CICLOS [horas]	PARÁMETROS									
		$L^*$	$a^*$	$b^*$	$E^*$	$\Delta L^*$	$\Delta a^*$	$\Delta b^*$	$C^*$	$\Delta C^*$	$\Delta E^*$
ROJO	0	48,4	20,3	8,7	53.2				22,1		
	90	47,8	19,1	8,6	52.2	-0,6	-1,1	-0,1	20,9	1,1	1,6
	138	48,7	19,2	8,1	53.0	0,3	-1,1	-0,6	20,8	1,2	1,7
	178	48,5	19,3	8,5	52.9	0,1	-1,0	-0,3	21,1	1,0	1,1
	252	49,1	19,1	8,4	53.3	0,7	-1,2	-0,3	20,9	1,2	2,0
AMARILLO	0	57,3	5,6	20,4	61.1				21,1		
	90	59,1	5,3	20,3	62.7	1,8	-0,2	0	21,0	0,2	3,3
	138	55,8	5,4	20,8	59.8	-1,5	-0,2	0,5	21,5	0,5	2,5
	178	59,0	5,4	20,7	62.8	1,7	-0,2	0,4	21,4	0,4	3,1
	252	59,2	5,3	20,2	62.8	1,8	-0,3	-0,2	20,9	0,4	3,4
TERRACOTA	0	53,9	14,1	14,5	57.6				20,2		
	90	55,9	13,7	14,1	59.3	2,0	-0,4	-0,4	19,7	0,6	4,3
	138	55,5	13,7	14,0	58.9	1,6	-0,4	-0,5	19,6	0,6	3,0
	178	55,8	13,6	14,4	59.2	1,9	-0,4	-0,1	19,8	0,4	3,8
	252	54,9	14,0	14,8	58.6	1,0	-0,1	0,2	20,4	0,2	1,1
NEGRO	0	35,8	0,13	0,3	35.8				0,4		
	90	37,3	-0,2	-0,4	37.3	1,5	-0,4	-0,8	0,5	0,8	3,0
	138	35,9	-0,2	-0,3	35.9	0,1	-0,3	-0,6	0,3	0,7	0,5
	178	39,4	-0,3	-0,7	39.4	3,6	-0,4	-1,0	0,7	1,1	14,1
	252	40,0	-0,3	-0,8	40.0	4,3	-0,4	-1,1	0,8	1,2	19,9

### 6.3. Medición de la eflorescencia utilizando la luminosidad ( $L^*$ )

Durante el envejecimiento del hormigón se producen cambios en sus coordenadas cromáticas, perdiendo luminosidad ( $L^*$ ) y saturación ( $C^*$ ) del color. En esta sección se analiza la variación de la luminosidad,  $L^*$ , para las muestras de hormigones en estudio ya que los valores de  $\Delta C^*$ , del orden de 1 pueden considerarse muy pequeños. Las muestras fueron secadas a temperatura constante a los efectos de reducir errores en las lecturas iniciales. En general se observa un aumento progresivo de la luminosidad, aunque con ligeras variaciones, conforme se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8 Valores de L\* y su tratamiento estadístico

Color	Tiempo (horas)	L* Promedio	Desviación Standard	Coefficiente de variación
Rojo	0	48.4	1.9	0.04
	90	47.8	2.1	0.04
	138	48.7	1.2	0.03
	178	48.5	1.8	0.04
	252	49.1	2.1	0.04
Amarillo	0	57.3	1.5	0.03
	90	59.1	1.8	0.03
	138	55.8	<b>5.9</b>	<b>0.11</b>
	178	59.0	1.0	0.02
	252	59.2	1.2	0.02

En el caso de los hormigones pigmentados con rojo el aumento de la luminosidad, L\* es leve, del orden del **1,4%**, mientras que para los amarillos se observa un comportamiento similar, un poco mayor con un crecimiento del **3,3%**, como se puede observar en la Fig. 8.

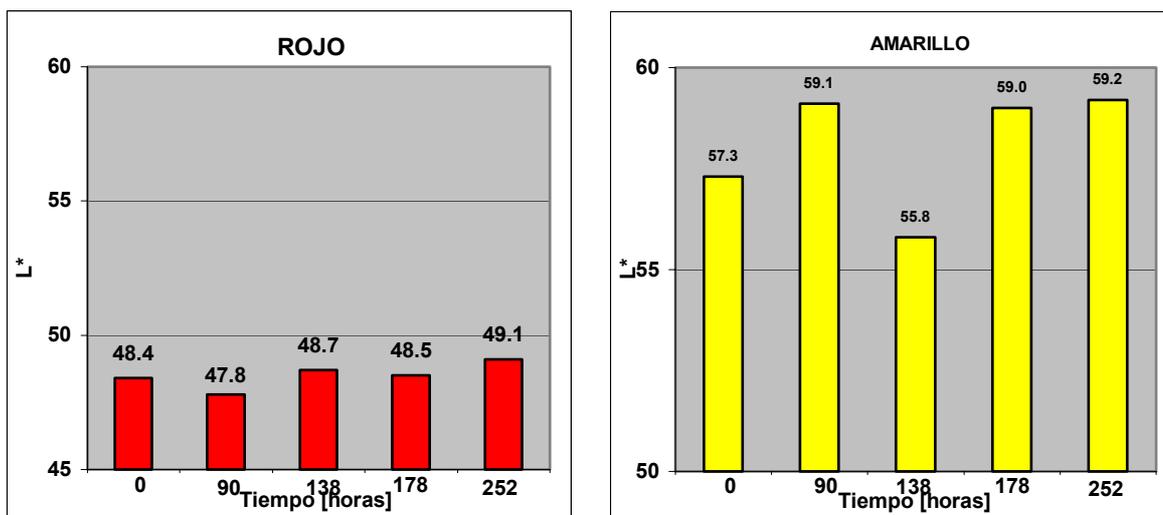


Figura 8 Variaciones de L\* para los colores rojo y amarillo

Si se analiza el coeficiente de variación:

- Para el color rojo se observa que es pequeño, del orden de **4 %** lo que indica una buena repetibilidad de los resultados o sea que las muestras se comportan en forma similar.
- En el caso del color amarillo el comportamiento es análogo, manteniéndose los valores bajos, salvo para la medición a las 138 horas en donde aumenta a un

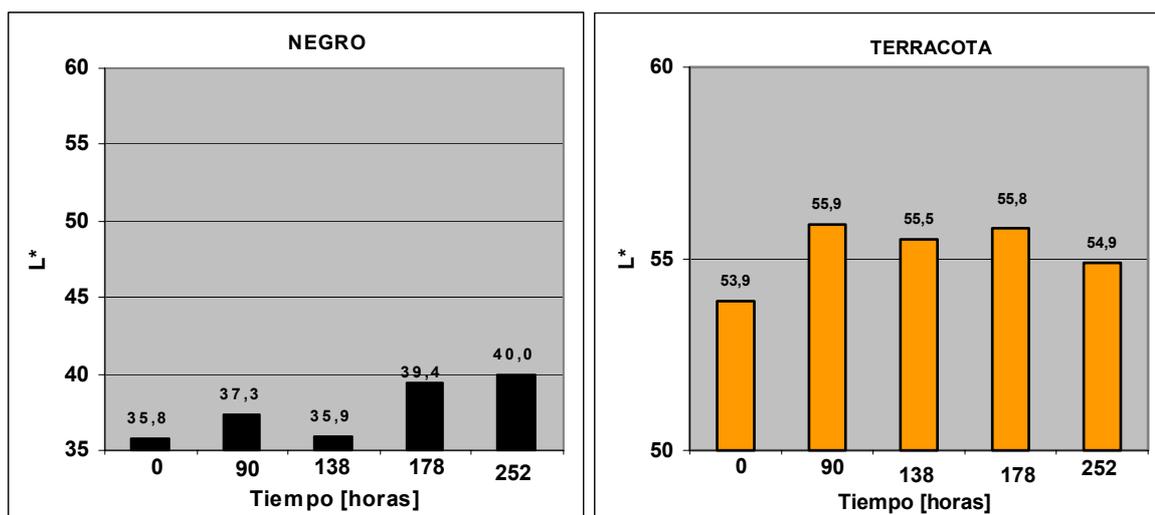
**11%**; este valor es discordante con el resto y es posible asignarlo a la presencia de humedad en las muestras en el momento de la medición.

Si se analizan la Tabla 9 y Fig. 9 para valores de luminosidad para el color terracota el coeficiente de variación para  $L^*$  es muy pequeño, del orden de los anteriores o sea la tendencia de  $L^*$  también es a aumentar, similar al color rojo con un porcentaje del **1,8%**.

**Tabla 9 Valores de  $L^*$  y su tratamiento estadístico**

Color	Tiempo (horas)	$L^*$ Promedio	Desviación Standard	Coefficiente de variación
Terracota	0	53.9	1.0	0.02
	90	55.9	1.2	0.02
	138	55.5	1.9	0.03
	178	55.8	1.5	0.03
	252	54.9	1.9	0.03
Negro	0	35.8	1.3	0.04
	90	37.3	3.6	<b>0.10</b>
	138	35.9	4.7	<b>0.13</b>
	178	39.4	4.2	<b>0.11</b>
	252	40.0	3.9	<b>0.10</b>

Esta tendencia es más significativa en el color negro debido a que la eflorescencia es más notable mientras más oscuro es el color de la superficie del hormigón siendo del **11,7%**, conforme lo presentado en la Tabla 9 y Fig. 9.



**Figura 9 Variaciones de  $L^*$  para el color negro y terracota**

Si se analiza el coeficiente de variación, para el color terracota es de igual orden que los correspondientes a los colores rojo y amarillo.

En el color negro la diferencia es notable. Prácticamente todos los valores del coeficiente de variación son superiores al **10%** y esto es asignable a la presencia de eflorescencias ya que los valores de  $\Delta C^*$  se mantienen en el mismo orden de magnitud de los otros colores, conforme lo presentado en la Fig. 10.



**Figura 10** En la fotografía se puede observar la presencia de eflorescencias producidas debido al agua de los ciclos de humedecimiento secado.

#### 6.4. Medición de la decoloración

Otra aplicación de la colorimetría a la patología de los materiales de construcción es la determinación de la decoloración. Aquí se analiza el comportamiento colorimétrico con la variación del color total,  $\Delta E^*$ . El  $\Delta E^*$ , al incluir las variaciones de  $\Delta a^*$ ,  $\Delta b^*$  y  $\Delta L^*$  permite realizar una evaluación global de los cambios de color. Según TEICHMANN, la relación entre  $\Delta E^*$  y la evaluación visual de la diferencia del color en la industria de la pintura es la indicada en la Tabla 11.

**Tabla 11** Valores de diferencia de color total y evaluación a simple vista.

$\Delta E^*$	Evaluación de la diferencia de color
menor que 0,2	no visible
0,2 - 0,5	muy leve
0,5 - 1,5	Leve
1,5 - 3,0	Notable
3,0 - 6,0	muy notable
6,0 - 12,0	Grande
mayor que 12,0	muy grande

Sin embargo de acuerdo a su experiencia en la medición del color en superficies rugosas como la del hormigón, valores de  $\Delta E^*$  menores que 1,5 son

imperceptibles para el ojo humano y difíciles de medir con instrumentos. En las Fig. 11 y 12 se observa que los colores han sufrido un cambio perceptible por el ojo humano, destacándose, como en el caso de las mediciones de  $L^*$ , la notable pérdida del color negro, coincidiendo con estudios realizados por CARVALHO<sup>23</sup> en su tesis doctoral.

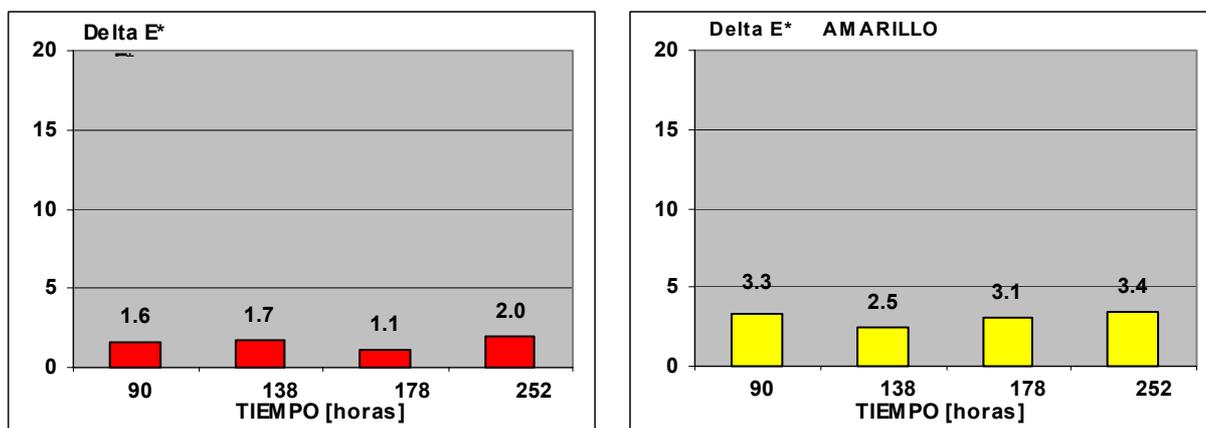


Figura 11 se indican variaciones de color total. Se aprecia un leve aumento de  $\Delta E^*$

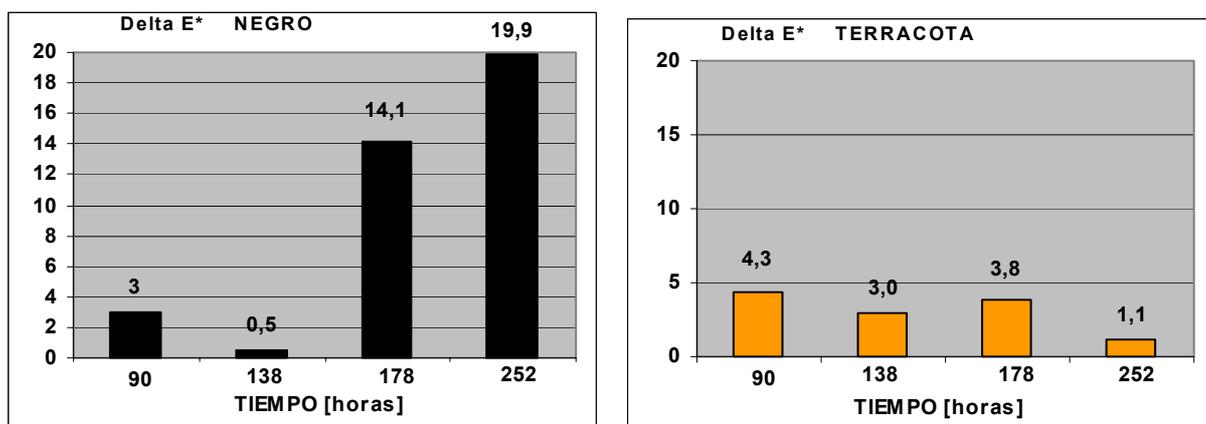


Figura 12 Variaciones de color total. Se aprecia un notable incremento de  $\Delta E^*$  para el color negro

## 7. CONSIDERACIONES

Este trabajo es una de las experiencias sobre mediciones del color que se están desarrollando en la actualidad; se realizan algunas consideraciones sobre el tema teniendo en cuenta los resultados obtenidos.

- Con respecto a los hormigones utilizados:
- ✓ Las relaciones agua-cemento están en el orden de 0,6 -0,7, de consistencia muy seca.

- ✓ La textura superficial inicial de los bloques de hormigón es rugosa.
- ✓ Visualmente se observan diferentes texturas superficiales de terminación.

Estos factores podrían considerarse desventajosos para el fenómeno de lixiviación y manifestación de eflorescencias.

- Con respecto a la determinación de eflorescencias midiendo la luminosidad:
  - ✓ Se verifica un aumento de la luminosidad en función del tiempo de envejecimiento acelerado.
  - ✓ Estos incrementos presentan diferentes magnitudes para cada color, siendo notablemente mayores en el color negro.
  - ✓ Posiblemente los valores analizados corresponden a la parte inicial de la curva luminosidad en función del tiempo (ver Fig. 3) por lo que es conveniente extender el período de envejecimiento.
  - ✓ El tratamiento de las mediciones de las coordenadas cromáticas, el coeficiente de variación y la desviación standard permiten determinar la presencia de eflorescencias y realizar su seguimiento en el tiempo.

1. J. DOWSON. ¿Será durable el efecto IOPIC (pigmento de óxido de hierro) en el concreto?. Pave Colombia'98. Instituto Colombiano de Cemento. Colombia, 1998.
2. P.K. METHA, & P. MONTEIRO, (1994). Concreto. Estructura, propiedades e materiais. Editora Pini.
3. Paulo HELENE. Durabilidad. Interpretación y evaluación de resultados. Manual de diagnosis e intervención en estructuras de hormigón armado. Col.legi d'Aparelladors i Arquitectes Tècnics de Barcelona. Barcelona, 2000.
4. I. BICZOCK. Corrosión y protección del hormigón. Ediciones Urmo. Bilbao, 1972.
5. E. IRASSAR. Ataque químico al hormigón. Durabilidad del hormigón estructural. Olavarría, 2001.
6. O. MARQUES FILHO. Colorimetría I-Curso Entrenamiento. Bayer. LS- Materias Primas Industriais. Divisão Civil. PE04T13. Mayo, 2001.
7. R. MISTRICK. Color. Illuminating Engineering Society of North America. 1993.
8. R. MISTRICK. Vision. Illuminating Engineering Society of North America. 1993.
9. Commission Internationales de L'éclairage. Comisión Internacional del Alumbrado. CIE. INTI. La luz como una verdadera magnitud visual: principios de su medición. Buenos Aires, 1981.
10. G. TEICHMANN. The use of colorimetric Methods in the Concrete Industry? Betonwerk+Fertigteil-Technik. 1995
11. PFEIFFENBERGER, L. Granulometría y proporcionamiento de agregados para bloques de concreto. Revista IMCYC, Vol 25, Num. 196. Setiembre, 1987.
12. ICPA. Instituto del Cemento Portland Argentino. Bloques de hormigón (segunda edición). Buenos Aires.
13. ORGANISMO ARGENTINO DE NORMALIZACION. Norma IRAM 1505. Agregados: Análisis granulométrico. Setiembre de 1987.

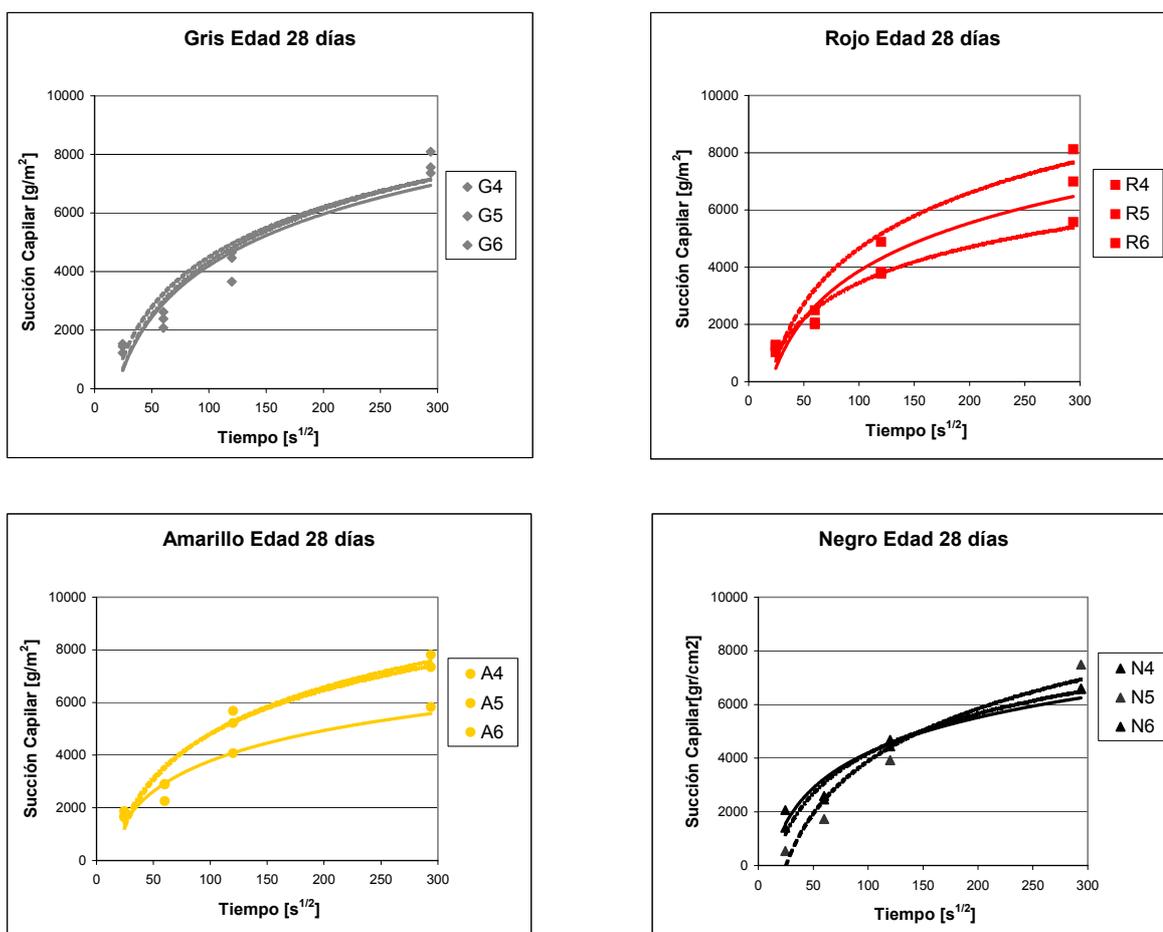
14. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C 128-93 Standard Test Method for specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate. Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, EUA.
15. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C 127-88 (Reapproved 1993) Standard Test Method for specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate. Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, EUA.
16. ORGANISMO ARGENTINO DE NORMALIZACION. Norma IRAM 1627. Agregados: Granulometría de los agregados para hormigones. Octubre de 1997.
17. ORGANISMO ARGENTINO DE NORMALIZACION. Normas IRAM 11561. Bloques de hormigón. Setiembre de 1992.
18. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C 979-82 (reapproved 1993). "Standard Specification for Pigments for Integrally Colored Concrete." Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, EUA.
19. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 212.3R-91. Chemical Admixtures for Concrete.
20. V.S. RAMACHANDRAN. Concrete Admixtures Handbook. Properties, Science, and Technology. Second Edition. Noyes Publications. 1995.
21. M. POSITIERI. Seminario Estructura Interna y Dosificación de Hormigones. Universidad Tecnológica Nacional. Mendoza, Argentina, 2000.
22. P. KRESSE. Efflorescence and its prevention. Betonwerk+Fertigteil-Technik. 1991.
23. F. CARVALHO. Variación de color y textura superficial de hormigones vistos con adición de pigmentos inorgánicos, sometidos a distintos estados de exposición ambiental. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España. Tesis doctoral. 2000.

## AGRADECIMIENTOS

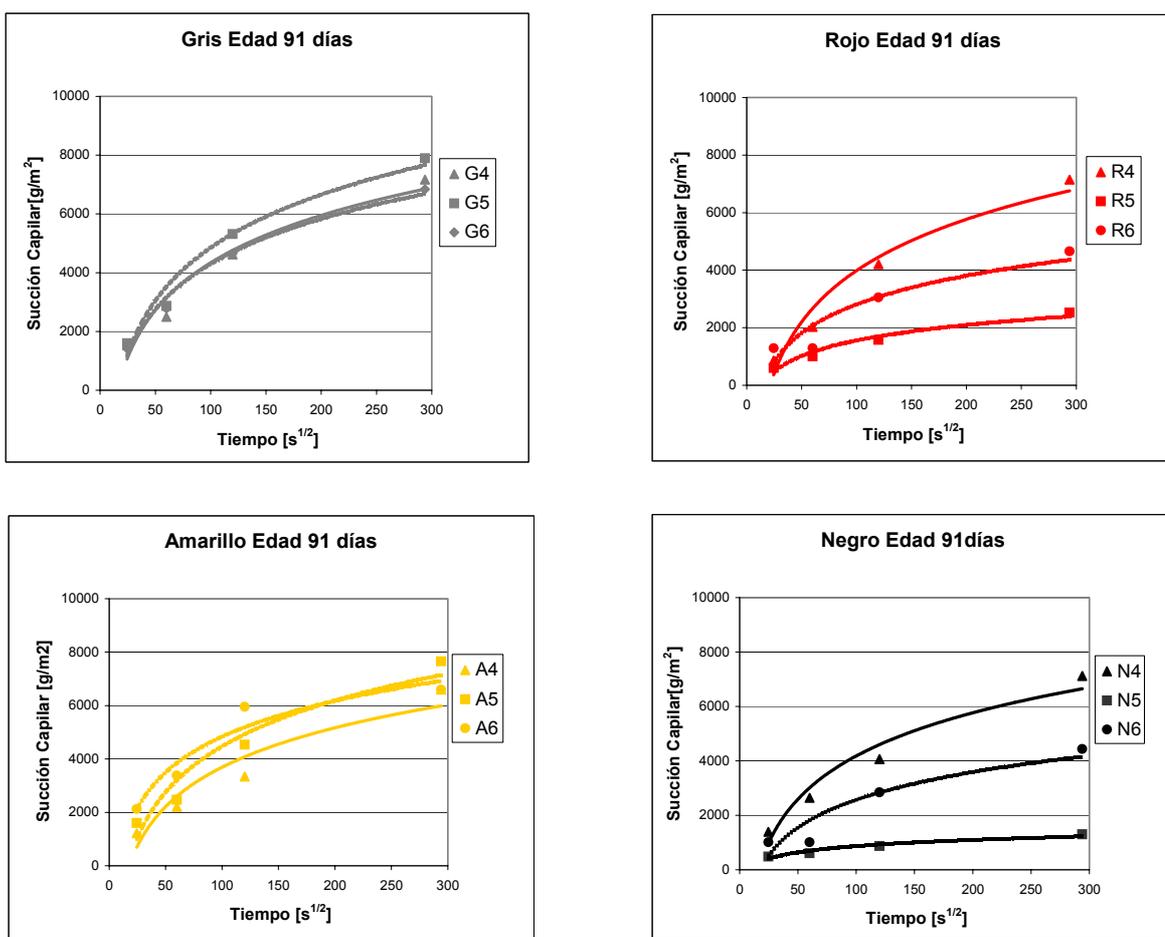
- A la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Facultad Regional Córdoba y a los becarios de investigación: Srta. Anahí López, Srta. Marcela Fernández, Sr. Cristián di Gioia e Ing. Sebastián Sureda, por la colaboración brindada.
- A Rafael Arena y a Juan Blangino por viabilizar los estudios de campo, equipos e instalaciones.

## ANEXO III

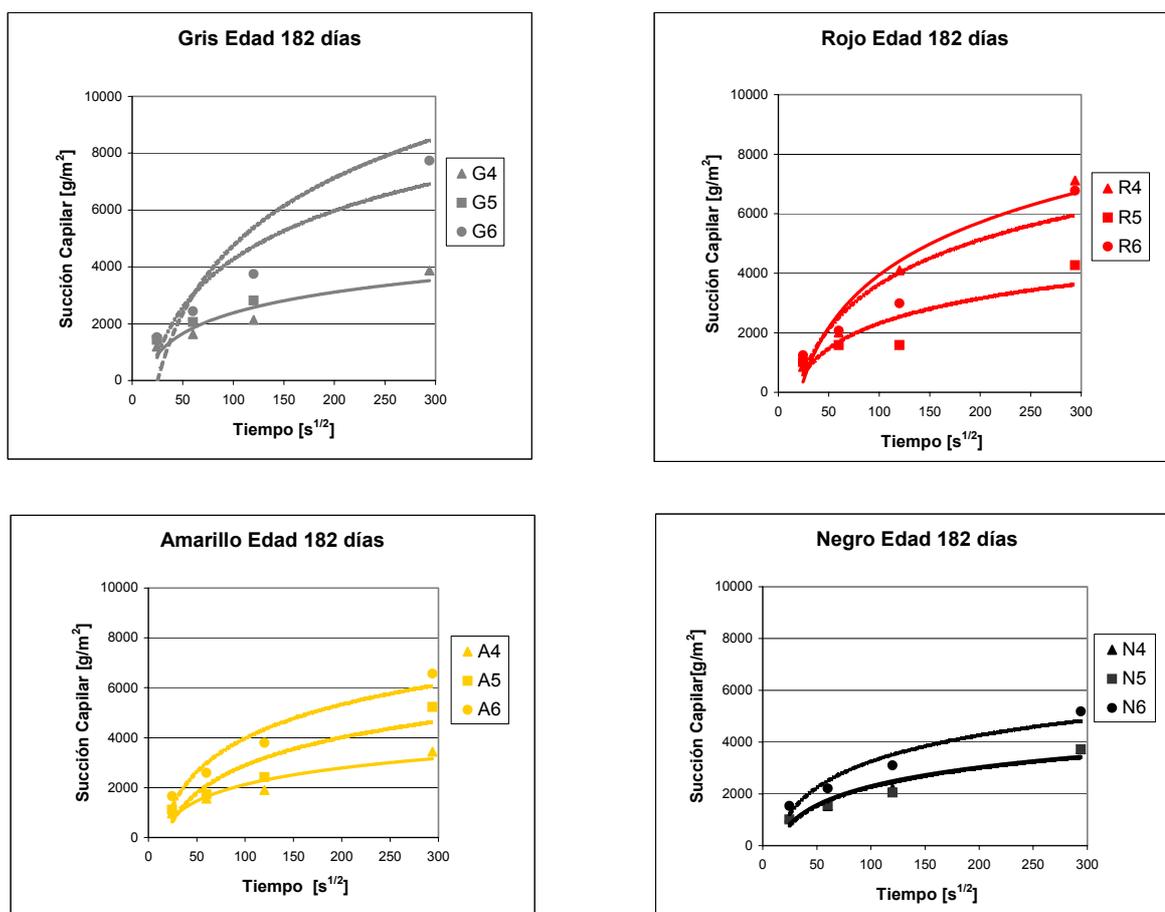
### FIGURAS COMPLEMENTARIAS



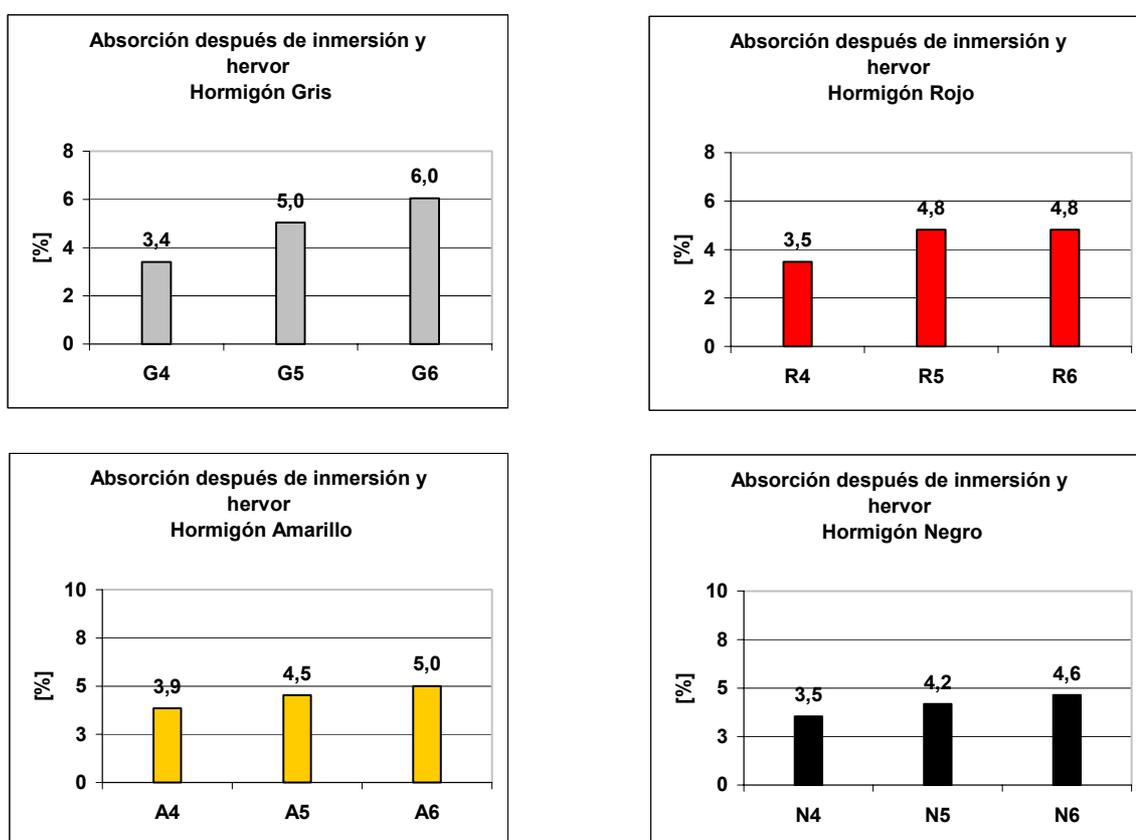
**Figura 1. Succión capilar en función de la raíz cuadrada del tiempo en el hormigón de referencia y pigmentados a la edad de 28 días**



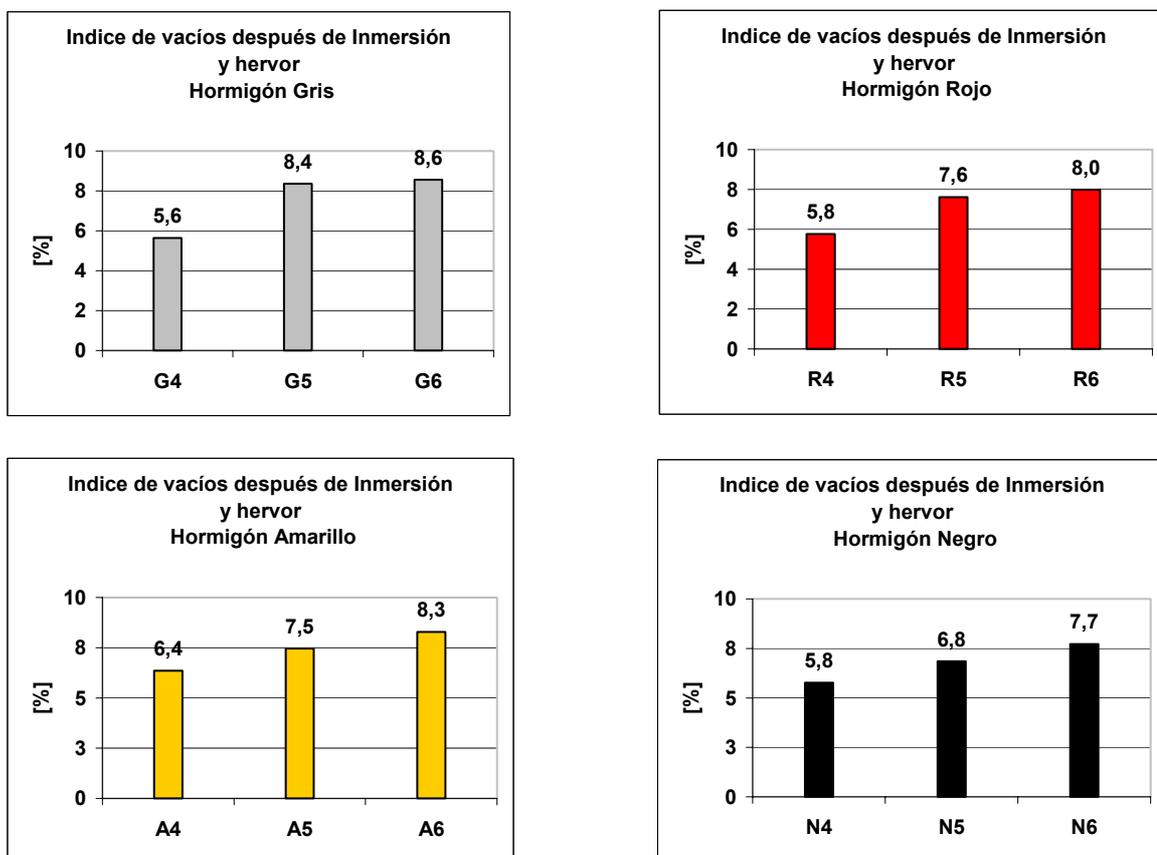
**Figura 2** Sución capilar en función de la raíz cuadrada del tiempo en el hormigón de referencia y pigmentados a la edad de 91 días



**Figura 3** Succión capilar en función de la raíz cuadrada del tiempo en el hormigón de referencia y pigmentados a la edad de 182 días.



**Figura 4 Resultados de absorción por inmersión, después de hervor, para el hormigón de referencia y los pigmentados**



**Figura 5 Resultados de índice de vacíos por inmersión, después de hervor, para el hormigón de referencia y los pigmentados**