



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

Universidad de la República
Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo
Maestría en Construcción de Obras de Arquitectura

TESIS DE MAESTRÍA

Efectos de la incorporación de pigmentos empleados para la producción de pinturas en el comportamiento en estado fresco, la resistencia mecánica y la estabilidad frente a la acción de rayos UV de hormigones autocompactantes.

Javier Eduardo Borgno Martín

Montevideo, Uruguay

Julio, 2018



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

Efectos de la incorporación de pigmentos empleados para la producción de pinturas en el comportamiento en estado fresco, la resistencia mecánica y la estabilidad frente a la acción de rayos UV de hormigones autocompactantes.

Autor: Javier Eduardo Borgno Martín

Tesis de Maestría presentada al Programa de Posgrado Maestría en Construcción de Obras de Arquitectura, Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo de la Universidad de la República, como parte de los requisitos necesarios para la obtención del título de Magíster.

Tutor: Dr. Gemma Rodríguez de Sensale

Montevideo, Uruguay

Julio, 2018

Borgno Martín, Javier Eduardo

Efectos de la incorporación de pigmentos empleados para la producción de pinturas en el comportamiento en estado fresco, la resistencia mecánica y la estabilidad frente a la acción de rayos UV de hormigones autocompactantes / Javier Eduardo Borgno Martín. Montevideo, Universidad de la República, Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, 2018.

128p.; 29,7 cm.

Tutor:

Dr. Gemma Rodríguez de Sensale

Tesis de Maestría – Universidad de la República, Maestría en Construcción de Obras de Arquitectura, 2018.

Referencias bibliográficas p. 101 –104.

1. pigmentos, 2. pinturas, 3. estado fresco, 4. resistencia mecánica, 5. rayos UV. I. Rodríguez de Sensale, Gemma. II. Universidad de la República, Programa de Posgrado Maestría en Construcción de Obras de Arquitectura. III. Efectos de la incorporación de pigmentos empleados para la producción de pinturas en el comportamiento en estado fresco, la resistencia mecánica y la estabilidad frente a la acción de rayos UV de hormigones autocompactantes.

INTEGRANTES DEL TRIBUNAL DE DEFENSA DE TESIS

Dr. Juan José Fontana, por UA-España

Mag. Carola Romay, por UNMDP-Argentina

Mag. Fernando Tomeo, por UFRGS-Brasil

Montevideo, Uruguay
Julio, 2018

AGRADECIMIENTOS:

Hay muchas personas para agradecer, no solo por lo referente a la elaboración del presente trabajo sino los que han hecho posible que mis estudios fuesen posible, a quienes me enseñaron lo importante que es luchar por los sueños en la vida y lo importante que es siempre crecer como profesional y como persona.

En particular quisiera agradecer a mis abuelos que siempre apoyaron mi crecimiento y me enseñaron lo que es el valor de trabajar por lo que uno quiere, a mis padres que hicieron posible mi educación y también me impulsaron a estudiar, a mis hermanos que siempre me apoyaron en todas las etapas de mi vida.

En estos últimos años he encontrado a la persona que me ha impulsado a seguir capacitando y apoyando, para que nunca deje de crecer como profesional ni como persona, mi esposa Mirta Pintos, ya que sin su apoyo este trabajo hubiese sido imposible de llevar adelante, en todas esas horas que he dejado de pasar tiempo con ella para dedicarme al crecimiento profesional.

Debo hacer un especial agradecimiento a los docentes de la maestría que han transmitido sus conocimientos y en especial a la orientadora de la presente tesis la Dra. Arq. Gemma Rodríguez.

También debo agradecer a la empresa SLB S.A., a su personal y a su dirección quienes han puesto a disposición sus equipos, personal e instalaciones para la elaboración del campo práctico.

A la empresa Punto Color, en conjunto con INCA quienes brindaron los pigmentos sin costo para poder efectuar los ensayos necesarios, como también el acceso a sus instalaciones para el uso del espectrofotómetro de su propiedad.

Agradecer al personal de los laboratorios del Instituto de la Construcción de la Facultad de Arquitectura de la UDELAR y del Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Facultad de Ingeniería de la UDELAR, ya que sin su apoyo no hubiese sido posible poder trabajar en dichas instalaciones.

RESUMEN:

El hormigón autocompactante coloreado es un material utilizado cuando se requiere una aplicación de carácter arquitectónico, industrial, ingenieril, etc., donde al añadirle color al hormigón autocompactante, se pretende un material perdurable en el tiempo tanto en aspectos mecánicos (que lo aporta la elección del hormigón autocompactante), como estéticos (que lo aportan los pigmentos), disminuyendo mantenimientos periódicos normales; a partir de esto se abre una gran cantidad de interrogantes sobre las propiedades del material resultante, como su durabilidad, resistencia, estabilidad de color, resistencia ante diversos ambientes, etc., además de cambiar su color típico de diferentes tonos de gris.

El hormigón coloreado es un material cada vez más utilizado en la construcción, tanto en obra directamente como en sub-productos para la construcción. Si bien hay algunos estudios y ensayos sobre hormigón coloreado, queda mucho por investigar sobre este material y esta tesis pretende realizar aportes en relación al conocimiento que se tiene con respecto a este material que cada vez es más empleado ya que desde el punto de vista arquitectónico se trata de un material que simplifica muchas etapas de trabajo, con cierta economía y tiempos de producción más eficientes. Si tenemos en cuenta que los materiales se encuentran expuestos a la acción de las condicionantes climáticas, exposición a rayos UV, y cada vez se tienen mayores exigencias a nivel de resistencias mecánicas, podemos preguntarnos cuan durable puede ser el hormigón autocompactante coloreado frente a la acción de estas inclemencias.

Sobre hormigón coloreado en su versión autocompactante hay mucho para investigar, el material teórico al respecto es escaso. Al añadir pigmentos, obviamente se alteran algunas propiedades del material, tanto en estado fresco como en estado endurecido. Aspectos como su durabilidad, su estabilidad frente a las diversas acciones climáticas, los aspectos derivados de su resistencia mecánica, se ponen en juego.

El objetivo del presente trabajo es profundizar en el conocimiento de las propiedades del hormigón autocompactante coloreado como material, desarrollando un trabajo teórico y experimental que estudia los aspectos en estado fresco, de resistencia mecánica y desgaste del color frente a la acción de los rayos UV, estudiando los colores rojo, amarillo y azul incorporados al hormigón autocompactante con cemento portland gris y blanco. A nivel experimental se analizan las variaciones que se producen en las mencionadas propiedades del hormigón autocompactante, con la adición de pigmentos inorgánicos utilizados para elaborar pinturas.

INDICE GENERAL

NOMENCLATURA	IV
LISTA DE FIGURAS.....	VI
LISTA DE TABLAS.....	VIII
1- INTRODUCCIÓN.....	1
1.1- Objetivos.	3
1.2- Estructura de la tesis.....	4
1.3- Limitaciones.	5
2- ESTADO DEL ARTE	7
2.1- Definiciones relativas al hormigón coloreado.....	7
2.2- Antecedentes y ejemplos contemporáneos.	9
2.2.1- Antecedentes.	9
2.2.2- Ejemplos de obras realizadas contemporáneas.	14
2.2.3- Productos para la construcción.....	19
2.3- Investigaciones realizadas.....	22
2.3.1- Estudios sobre la elaboración y/o aplicación de los pigmentos.	23
2.3.2- Adiciones complementarias a los pigmentos	28
2.3.3- Productos para la construcción de hormigón coloreado.....	32
2.3.4- Patologías en el hormigón coloreado.	34
2.3.5- Producción	36
2.4- Sistemas de medición de color	38
2.4.1- Color	38
2.4.2- Sistema CIE L*a*b*	40
2.4.3- Colorimetría.	41
3- PLANEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN.....	44
3.1- Investigación experimental.....	45
3.2- Materiales.	46
3.2.1- Agregados	46
3.2.2- Aditivo Super-plastificante.....	50
3.2.3- Cemento.....	50
3.2.4- Pigmentos	53
3.3- Dosificación	56
3.4- Métodos	57
3.4.1- Equipos Utilizados.....	57
3.4.2 – Elaboración de pastones, probetas y ensayos	62

3.4.3- Medición del color.	72
4- RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	75
4.1- Ensayos en estado fresco.....	75
4.1.1- Ensayo de escurrimiento.....	75
4.1.2- Ensayo Anillo J.....	78
4.1.3- Comparación de datos de ambos ensayos.....	80
4.2- Ensayos en estado endurecido.	81
4.2.1- Resistencia a compresión de los hormigones.	81
4.2.2- Resistencia de probetas prismáticas de 40 x 40 x 160 mm.	85
4.2.3- Análisis comparativo de los resultados de puntos 4.2.1 y 4.2.2.	88
4.3- Ensayos en cámara UV y análisis con espectrofotómetro.	89
4.3.1 - Diferencia de luminosidad.	92
4.3.2- Saturación.	93
4.3.3- Diferencia de color total.	95
5- CONCLUSIONES.	97
5.1- Conclusiones de los ensayos en estado fresco.	97
5.2- Conclusiones de los ensayos en estado endurecido.....	98
5.3- Sugerencias para investigaciones futuras.....	100
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101
ANEXOS	105
ANEXO A – RESULTADOS DE ENSAYOS EN ESTADO FRESCO.....	105
ANEXO B - RESULTADOS DE ENSAYOS EN ESTADO ENDURECIDO.	109
ANEXO C - TABLAS DE CÁLCULO DE VALORES CIE L* a* b*.	117
ANEXO D – FICHAS TÉCNICAS DE PIGMENTOS UTILIZADOS.	119
ANEXO E - DATOS TÉCNICOS DE ESPECTROFOTÓMETRO X-RITE.....	128

NOMENCLATURA

A: Absorción en agregados

a*: Posición entre rojo y verde en espacio CIELAB

a/c: Relación agua/cemento en peso

ACI: American Concrete Institute

af: Agregado fino

ag: Agregado grueso

ASTM: American Society for Testing and Materials

AU: Pigmento azul de ultramar.

b*: Posición entre amarillo y azul en espacio CIELAB

C*: Saturación en espacio CIELAB.

CAS: Chemical Abstracts Service.

Ca(OH)₂: Hidróxido de calcio.

CEM I 52,5 R: Cemento normal clase I con resistencia a compresión a los 28 días de 52,5 MPa.

C-SCC: Coloured Self Compacting Concrete (Hormigón autocompactante coloreado)

C-SCM: Coloured Self Compacting Mortar (Mortero autocompactante coloreado)

CIELAB: Espacio de color CIE L*a*b* de 1976 (espacio de color lineal).

CIRSOC: Centro de Investigaciones de Reglamentos para Obras Civiles

CPN40: Cemento portland normal (el número corresponde a f'ck a los 28 días en MPa).

CSH: Silicato de calcio hidratado.

EN: Comité Europeo de Normalización.

ΔE^* : Diferencia de color total en espacio CIELAB.

f'ck: Resistencia específica a compresión

HA-r: Hormigón convencional con pigmento rojo.

HAC: Hormigón Autocompactante

HAC-r: Hormigón Autocompactante con pigmento rojo.

HACC: Hormigón Autocompactante Coloreado.

ISO: International Organization for Standardization

L*: Luminosidad de color en espacio CIELAB

ΔL^* : Diferencia de luminosidad en espacio CIELAB.

MF: Módulo de finura

MPa: Mega Pascal.

Número CAS: número de registro de determinado compuesto químico

PEF: Polvo de Electro-Filtro.

SBR: Styrene - Butadiene – Rubber (caucho estireno-butadieno)

SCC: Self Compacting Concrete (Hormigón autocompactante)

SCM: Self Compacting Mortar (Mortero autocompactante)

T'50: Tiempo en alcanzar una circunferencia de 50cm de diámetro en el ensayo de escurrimiento.

UNE: Asociación Española de Normalización.

UNIT: Instituto Uruguayo de Normas Técnicas.

UdelaR: Universidad de la República

UV: Ultravioleta

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1 – Lynn Mason Scofield.
- Figura 2.2 – Casa Ennis de 1924 (autor: F.L. Wright).
- Figura 2.3 – Observatorio Paranal.
- Figura 2.4 – Soccer City.
- Figura 2.5 – Daum Kakao Space 1.
- Figura 2.6 – Edificio Masdar Institute de Foster + Partners.
- Figura 2.7 – Ciudad de la Justicia de Barcelona.
- Figura 2.8 – Palacio de las Artes Reina Sofía.
- Figura 2.9 - Praça das Artes en São Paulo.
- Figura 2.10 – Plaza de la libertad y Alianza Francesa.
- Figura 2.11 – Adoquines de hormigón coloreado.
- Figura 2.12 – Rehabilitación de la Alameda de Hércules.
- Figura 2.13 – Casa Betania.
- Figura 2.14 – Tejas de hormigón coloreado.
- Figura 2.15 – Prefabricados de hormigón coloreado.
- Figura 2.16 – Resistencia a la flexión de prismas de mortero con AU.
- Figura 2.17 – Resistencia a la compresión de prismas de mortero con AU.
- Figura 2.18 – Resistencia a compresión de muestras cubicas y cilíndricas.
- Figura 2.19 – Microscopía electrónica de barrido de diferentes pigmentos con hidróxido de hierro, aumento x7500.
- Figura 2.20 – Percepción del color.
- Figura 2.21 – Espectro visible de longitudes de onda.
- Figura 2.22 – Parámetros $L^* a^* b^*$.
- Figura 3.1 – Curva granulométrica de áridos gruesos.
- Figura 3.2 – Curva granulométrica de áridos finos.
- Figura 3.3 – Prensa Controls.
- Figura 3.4 – Cámara UV.
- Figura 3.5 – Espectrofotómetro X-RITE CAPSURE.
- Figura 3.6 – Moldes empleados para realización de probetas.
- Figura 3.7 – Placa de base y cono de Abrams.
- Figura 3.8 – Ensayo de escurrimiento con cono de Abrams.
- Figura 3.9 – Diseño del anillo J.
- Figura 3.10 – Ensayo anillo J.
- Figura 3.11 – Moldes empleados para los ensayos en estado endurecido.

- Figura 3.12 – Rotura de probeta cilíndrica HACCC rojo.
- Figura 3.13 – Ensayo a flexión de probeta prismática.
- Figura 3.14 – Ensayo a compresión de mitad de probeta prismática.
- Figura 3.15 – Ensayo en cámara UV.
- Figura 3.16 – Medición del color.
- Figura 4.1 – T'50cm obtenido en ensayo de escurrimiento.
- Figura 4.2 – Diámetro final obtenido en ensayo de escurrimiento (en cm).
- Figura 4.3 – Diámetro final obtenido en ensayo anillo J (en cm).
- Figura 4.4 – Diámetros obtenidos en ensayo de escurrimiento y Anillo J (en cm).
- Figura 4.5 – Resistencia a compresión de probetas cilíndricas de los diferentes hormigones realizados.
- Figura 4.6 – Densidades y volúmenes de probetas cilíndricas.
- Figura 4.7 – Resultados de ensayo a flexión de probetas prismáticas.
- Figura 4.8 – Resultados de ensayo a compresión de mitades de probeta prismática.
- Figura 4.9 – Resultados de ensayo a compresión de prismas y cilindros.

LISTA DE TABLAS

- Tabla 2.1 – Métodos y aplicaciones del hormigón coloreado.
- Tabla 2.2 – Estabilidad de color en morteros expuestos al ambiente A1 y C1.
- Tabla 2.3 – Resistencia a la compresión de morteros con pigmento, cemento blanco y escoria granulada de alto horno en diversos porcentajes.
- Tabla 2.4 – Contenido de burbujas sobre las caras de los paneles con HA-r y HAC-r.
- Tabla 2.5 – Evolución de la dosificación, Ciudad de la Justicia, Barcelona.
- Tabla 2.6 – Interpretación de valores de ΔE^* .
- Tabla 2.7 – Cálculo de parámetros colorimétricos.
- Tabla 3.1 – Densidad, Peso Específico y Absorción de los Agregados.
- Tabla 3.2 – Propiedades físicas del PEF.
- Tabla 3.3 – Composición química del filler empleado PEF.
- Tabla 3.4 – Propiedades físicas del CPN40 y del CEM I 52,5R.
- Tabla 3.5 – Propiedades mecánicas del CPN40 y del CEM I 52,5R.
- Tabla 3.6 – Composición química del CPN40 y del CEM I 52,5 R.
- Tabla 3.7 – Composición mineralógica del clinker para ambos cementos.
- Tabla 3.8 – Componentes de los diferentes pigmentos.
- Tabla 3.9 – Precios de pigmento.
- Tabla 3.10 – Dosificación en kg/m^3 .
- Tabla 3.11 – Datos básicos del espectrofotómetro X-RITE CAPSURE RM200.
- Tabla 3.12 – Dimensiones de probetas.
- Tabla 3.13 – Código de las probetas.
- Tabla 4.1 – Resultados generales de ensayos en estado fresco.
- Tabla 4.2 – Clasificación de HAC en estado fresco (norma EN 206-1:2000).
- Tabla 4.3 – Identificación de la evaluación de bloqueo (norma ASTM C 1621).
- Tabla 4.4 – Resultados de ensayo a compresión de probetas cilíndricas.
- Tabla 4.5 – Tabla de resultados de ensayos a flexión y compresión de probetas prismáticas.
- Tabla 4.6 – Tabla de resultados de resistencia a flexión y compresión de mitades ensayadas.
- Tabla 4.7 – Horas en equipo UV
- Tabla 4.8 – Hormigón con pigmento rojo.
- Tabla 4.9 – Hormigón con pigmento azul.

- Tabla 4.10 – Hormigón con pigmento amarillo.
- Tabla 4.11 – Hormigón de referencia.
- Tabla 4.12 – Graficas de ΔL^*
- Tabla 4.13 – Graficas de C^*
- Tabla 4.14 – Graficas de ΔE^*

1- INTRODUCCIÓN

El hormigón es un material que se puede moldear dándole formas complejas y obtener acabados delicadamente pulidos; además puede colocarse en combinación con otros materiales para proporcionar una superficie terminada, siendo este uno de los materiales de construcción cada vez más empleado en la región y en el mundo; de ahí surgen preocupaciones sobre su resistencia, trabajabilidad, durabilidad, etc.

El hormigón coloreado es una variante que aporta calidad visual al material siendo cada vez más utilizado para fines como hormigón estructural a la vista en puentes, fachadas, edificios diversos, naves industriales, prefabricados, pavimentos de colores de aplicación urbanística como por ejemplo sendas peatonales, ciclovías, zonas de exclusión, etc., consistente con la idea de que un mismo material pueda solucionar la problemática de mejorar la durabilidad, la capacidad portante, etc., reduciendo los mantenimientos periódicos (Positieri, 2005) y evitando aplicación de pinturas o diversos materiales de terminación, etc.

El hormigón coloreado a la vista juega un papel importante que es ser la cara expuesta al ambiente, y la responsable de la resistencia a la intemperie y de la permanencia inalterada del color. Al agregar pigmento al hormigón éste pasa a formar parte de los finos de la mezcla, y de ellos dependerá el color de la superficie del hormigón, estos dos componentes son los que determinan el color del hormigón; siendo una característica muy importante a considerar la estabilidad del color, ya que de los cambios que se presenten en este aspecto es que depende el desempeño estético buscado del material.

En lo referente a durabilidad, estabilidad de color, hormigón con pigmentos y resistencias mecánicas en hormigones coloreados, hay estudios realizados por investigadores como Lee et al. (2005), Positieri (2005), Guiachetti (2005), López et al. (2007), García y Álvarez (2008), Kiran et al. (2009), López (2009), Corinaldesi et al. (2012), Jang et al. (2013), López et al. (2016), entre otros.

En esta tendencia creciente de uso de materiales que con tecnología y economía aporten estética y desempeño es donde se torna interesante el análisis del hormigón coloreado, hormigón poco estudiado a nivel teórico pero cada vez más utilizado. Claros ejemplos de esto son obras donde se ha empleado como el Soccer City (Sudáfrica,

2010) reformado para ser estadio sede de la Copa del Mundo del 2010, la subestructura de hormigón del puente Rittoh Bridge en Ōtsu, (Japón, 2007), el hotel del Observatorio Paranal (Chile, 1996), el edificio del Masdar Institute (Emiratos Árabes Unidos, 2008) de Foster + Partners, y muchos ejemplos más.

Citando a Lee et al. (2005), traducido de original en inglés, “Cuando se utilizaron morteros de pigmento rojo y amarillo, la fluidez disminuyó rápidamente al aumentar la relación de pigmento. Para asegurar una trabajabilidad aceptable, se tuvo que aumentar la cantidad de agua de mezcla o se usó un superplastificante”, esto motiva el desarrollo de hormigones autocompactantes coloreados (HACC) como solución técnica racional al problema mencionado por los autores.

Para el uso de hormigones autocompactantes coloreados es necesario un correcto diseño de la dosificación, ya que se debe asegurar una correcta relación entre componentes para evitar segregación y poder aprovechar todos los beneficios del hormigón autocompactante HAC con la característica extra del color. Como se expresa en el texto de Corinaldesi et al. (2012) traducido del inglés “Como es bien sabido el diseño de HAC requiere una combinación cuidadosa de los diversos componentes materiales de la mezcla. HAC debe alcanzar una alta trabajabilidad y flujo en el encofrado bajo su propio peso sin compactación y sin segregación.”

En particular, es el uso de pigmentos naturales o artificiales lo que se requiere para la producción de hormigón u hormigón autocompactante coloreado. La durabilidad de estos dependerá directamente de la función que cumplen, que en este caso además de ser resistencia mecánica, impermeabilidad, etc., es estética; entonces se puede estar frente a un material que, con todas sus cualidades mecánicas se encuentre perfectamente en servicio, pero puede dejar de cumplir su desempeño a nivel estético por el simple hecho de decolorarse.

La apariencia, al correr del tiempo, de este tipo de materiales, depende directamente de su capacidad de resistir impactos medioambientales, por lo que, en particular, se pone de manifiesto la necesidad de analizar aspectos vinculados a la estabilidad del color del hormigón autocompactante coloreado y sus características mecánicas, con diferentes pigmentos de base; ello implica estudios frente a la acción de rayos UV a la que se encuentra expuesta cualquier superficie de hormigón en servicio, y la influencia de los

pigmentos en la resistencia del material sin modificar la dosificación de base al ser comparado con un hormigón de idénticas características pero sin pigmentar, de donde surge la siguiente pregunta, ¿La incorporación de los diferentes pigmentos al hormigón autocompactante influye en su estado fresco, su resistencia mecánica y la estabilidad frente a la acción de rayos UV?.

1.1- Objetivos.

Existe un interés creciente en el uso del hormigón autocompactante coloreado, lo que se puede observar en obras de arquitectura como las recientes para la EXPO 2008 de Zaragoza, donde el material por excelencia fue el hormigón autocompactante con cemento blanco, o las obras con hormigón autocompactante coloreado blanco para la Sagrada Familia de Barcelona (en la actualidad), entradas sobre hormigón autocompactante color rojo como el monumento Pedro Almodóvar Calzada de Calatrava Argocret (2012), etc., donde las ventajas del uso de este material es que proporciona color, terminación superficial, textura y evita defectos en el proceso de llenado si los encofrados son ejecutados correctamente para evitar fugas de material.

Es necesario seguir profundizando en el estudio de este material para conocer mejor sus propiedades, tanto en estado fresco como endurecido, al momento de su producción, pero también en su etapa de servicio, analizando el desgaste que puede presentar frente a la acción de los rayos UV, ya que muchas publicaciones de productores de pigmentos para hormigón, no hacen énfasis en estas características y los trabajos teóricos publicados de referencia son muy escasos.

A esto debemos añadir la preferencia en este trabajo, por pigmentos para la producción de pinturas, ya que se plantea llevar a la mayor economía posible la producción de este material y en etapas previas a la investigación de pigmentos a utilizar se comprobó la diferencia económica sustancial a favor de estos pigmentos frente a los pigmentos diseñados para hormigones de empresas reconocidas internacionalmente.

En síntesis, la importancia de estudiar el hormigón autocompactante coloreado es lo que motiva el presente trabajo, y estudiar los efectos que presentan los pigmentos para la producción de pinturas, con respecto a las propiedades en estado fresco, en estado

endurecido, estudiándose la resistencia a compresión y flexión así como la estabilidad frente a la acción de rayos UV. De allí que se tienen los siguientes objetivos:

Objetivo general:

- Estudiar los efectos de la incorporación de pigmentos empleados para la producción de pinturas en el comportamiento en estado fresco, la resistencia mecánica y la estabilidad frente a la acción de rayos UV de hormigones autocompactantes.

Objetivos específicos:

- Estudiar propiedades en estado fresco del hormigón autocompactante coloreado (HACC) con cemento gris y cemento blanco, las que serán comparadas con hormigón autocompactante (HAC) de igual dosificación sin pigmentar, para poder establecer las diferencias entre ellos.
- Realizar ensayos a tracción y compresión de diferentes probetas de HACC con cemento gris y cemento blanco, las que serán comparadas con HAC de igual dosificación sin pigmentar, para poder establecer diferencias entre las resistencias mecánicas obtenidas.
- Realizar estudios con espectrofotómetro de diversas muestras de HACC en estado endurecido, antes y después de pasar por cámara de envejecimiento UV para poder establecer si se afecta el color o no y en qué grado.

1.2- Estructura de la tesis.

Esta tesis se estructura en base a cinco capítulos.

El capítulo uno es una introducción donde se plantean la importancia, los objetivos principales y la estructura de la tesis.

En el capítulo dos se analiza el estado del arte del hormigón coloreado y del HACC, desde su historia hasta su presente con ejemplos concretos, obras realizadas,

investigaciones en curso, actores influyentes en el desarrollo de este tipo de materiales y sus componentes principales como lo es el desarrollo de pigmentos específicos para adicionar a las mezclas.

En el capítulo tres, planeamiento de la investigación, se presenta primeramente la metodología general seguida en esta tesis, luego los materiales empleados y sus propiedades, se explicita el marco normativo para ensayos y producción de probetas, se presenta la dosificación empleada, se detallan los ensayos realizados y se describen los procedimientos utilizados, además del equipamiento específico para los ensayos.

En el capítulo cuatro, resultados y discusión, se presentan y analizan los resultados obtenidos de ensayos en estado fresco y endurecido (ensayos de compresión, flexión y de desgaste de color en cámara UV).

En el capítulo cinco se presentan las conclusiones de los resultados obtenidos de los diferentes ensayos y experiencias, se presentan sugerencias sobre los diferentes aspectos a tener en cuenta en hormigones autocompactantes coloreados, tanto en obras a realizar como en investigaciones posteriores.

1.3- Limitaciones.

Como se ha descripto brevemente en la introducción este trabajo se basa en el estudio de algunas propiedades del HAC con la incorporación de pigmentos derivados de la industria de las pinturas.

Si bien existen empresas que elaboran pigmentos específicamente para ser incorporados al hormigón en masa (Pigmentos LANXESS, origen Alemania; SIKA, origen Suiza; Buddy Rhodes, origen USA; Davis Colors, origen USA; Interstar Pigments, origen Canadá; Serra Cements, origen España; G & C Colors, origen España, etc.), no siempre son económicos. Los pigmentos empleados en la industria de las pinturas para la construcción son en base agua, elemento fundamental para poder ser incorporados al hormigón en masa; si bien poseen otros compuestos químicos que reaccionan químicamente diferente a los pigmentos producidos específicamente para ser adicionados al hormigón en masa, son muy fáciles de conseguir en el mercado nacional

para uso ya que es un producto de uso masivo, ello fue fundamental al optar por emplear este tipo de pigmentos en la investigación a realizar en la Tesis.

Los pigmentos que fueron utilizados para el presente trabajo fueron suministrados por la empresa Punto Color Pinturas, importados y comercializados por la empresa INCA (perteneciente a la multinacional AzkoNobel). En el capítulo 3 se presentan las características técnicas de estos pigmentos utilizados en el sector de pinturas para la construcción y específicamente los utilizados en este trabajo.

La necesidad de elaborar un material con propiedades como textura y color no siempre requiere tener una resistencia mecánica específica, por lo que, para optimizar tiempos en cronogramas estrictos de construcción, el presente trabajo, incorpora la gama de los pigmentos de base para elaborar casi todos los colores disponibles en pinturas para la construcción, estos pigmentos son el rojo, el azul y el amarillo. La limitación al uso de 3 pigmentos es debido a que esta tesis es de maestría se dispone de un tiempo limitado para su realización.

En este trabajo para evaluar las propiedades en estado fresco se empleó el ensayo de escurrimiento y el anillo J. Muchos trabajos detallan ensayos adicionales como embudo V y caja L, o ensayos para conocer tiempos iniciales y finales de fraguado para poder evaluar si ciertas propiedades son alteradas o no por el uso de pigmentos. Con respecto a los ensayos de embudo V y caja L, cabe observar que el ensayo de escurrimiento con la determinación de T'50cm aporta valores para prescindir de la evaluación mediante el ensayo de embudo V y el ensayo de anillo J permite evaluar la capacidad de paso entre armaduras, por lo que en esta tesis se prescindirá de ellos.

En relación a los tiempos de fraguado, no se dispone de equipos para la realización de ensayos de determinación de tiempo de fraguado en hormigón, en los laboratorios del IC o del IEM (de Facultad de Arquitectura o Facultad de Ingeniería, respectivamente) por lo que se dejará para futuras investigaciones la realización de estudios sobre los efectos de los pigmentos en los tiempos iniciales y finales de fraguado del hormigón.

2- ESTADO DEL ARTE

En el presente capítulo se desarrolla el estado del arte del hormigón coloreado y del HACC, desde su historia hasta su presente con ejemplos concretos, obras realizadas contemporáneas, investigaciones en curso, actores influyentes en el desarrollo de este tipo de materiales y sus componentes principales como lo es el desarrollo de pigmentos específicos para adicionar a las mezclas; para concluir se desarrolla una sección dedicada a los sistemas de medición de color y los sistemas desarrollados para poder evaluar las diferencias de color, tema de relevancia al estudiar materiales con color.

2.1- Definiciones relativas al hormigón coloreado

Para la definición de hormigón coloreado, se hace referencia al concepto de hormigón arquitectónico, de acuerdo a lo que resulta de su definición por parte del American Concrete Institute.

De acuerdo a la ACI, en su comité 303, el hormigón arquitectónico es:

“Aquel que queda expuesto como superficie interior o exterior dentro de una estructura terminada, contribuye en forma determinante a su aspecto visual y está diseñado especialmente como tal en los planos y especificaciones del contrato”.

Cuando se analiza el hormigón coloreado como material, se hace referencia a una versión de hormigón arquitectónico, no solo por aporte de color, sino también por el papel estético que juega el material.

La diferencia del hormigón coloreado con el hormigón convencional, es que este aporta un papel estético diferencial a la obra arquitectónica sobre la que se aplica; esto ha sido utilizado a lo largo de la historia en varias obras de referencia, tanto a nivel estético como a nivel estructural. Debido a ello, en la actualidad el hormigón coloreado ha tomado importancia en la industria de la construcción y el diseño tanto por sus propiedades estructurales que es lo que aporta el papel del hormigón, como su aporte estético a las mismas, que es lo que aporta el papel de los pigmentos adicionados.

El desarrollo del hormigón coloreado como material de uso a nivel estructural con una estética diferente a la convencional, ha llevado a desarrollar cada vez más su tecnología intrínseca lo que ha involucrado un aumento sostenido a nivel de propiedades como resistencia mecánica, estabilidad de color, resistencia a diversos agentes presentes en el medio ambiente, etc., es en este sentido que en este trabajo se haga énfasis en el HACCC (hormigón autocompactante coloreado), pues su estudio en profundidad nos lleva a ver que se incorporan más elementos en la dosificación de los hormigones para mejorar sus propiedades.

Antes de hacer referencia a estudios teóricos se debe comenzar primero por entender la evolución histórica del material, pero precisamente hablando en términos de material contemporáneo; es ahí donde se debe analizar el material teórico desarrollado por las empresas productoras de pigmentos para la construcción, se entiende por esto, desarrollo de normas y patentes que generan lineamientos que encausan el desarrollo actual y futuro del material, porque no solo se trata de la producción de pigmentos para colorear hormigón en masa, sino de todos los subproductos desarrollados como materiales de construcción, ya sea pigmentos para aplicaciones superficiales en pisos industriales, producción de mampuestos de hormigón, elaboración de prefabricados de hormigón coloreado, etc.; por lo que se analiza la evolución del material desde la perspectiva de las empresas productoras de pigmentos, luego se analizan las patentes y normas generadas a nivel internacional de referencia y luego se enumeran algunos trabajos de investigadores sobre las características del material y algunos de sus sub-productos.

Estudios teóricos vinculados al estudio del hormigón coloreado y del hormigón autocompactante coloreado, se basan principalmente en la estabilidad del color, por ello al final de este capítulo se trata la temática de los sistemas de medición de color que están muy vinculados con su variación y estabilidad. En el punto 2.4 se desarrolla dicha temática expresando los conceptos que engloba, las normas vinculadas y todo lo referente al sistema de medición del color de acuerdo al CIE L*a*b* que es el método adoptado para ensayos efectuados en la presente Tesis.

2.2- Antecedentes y ejemplos contemporáneos.

2.2.1- Antecedentes.

Si se analiza al hormigón coloreado en su versión contemporánea, se debe remitir al año 1915, donde L. M. Scofield, funda la Scofield Company, primera compañía en producir colores como aditivos para hormigón. Sus productos variaban entre selladores para hormigón, componentes químicos para mejorar algunas propiedades, colorantes para hormigón, etc., en figura 2.1 se aprecia la empresa y la figura de L. M. Scofield.



Figura 2.1 - Lynn Mason Scofield.

(Fuente: <http://www.concreteconstruction.net>)

Scofield, ingeniero radicado en Chicago, presentó los primeros productos para colorear, manchar y proteger el hormigón. Su sistema patentado, produjo hormigones con otra estética por aportar color al hormigón normalmente empleado. La empresa de Scofield se traslada de Chicago a Los Ángeles durante el período en que los arquitectos de California adoptaron los estilos modernos, influenciados por el Art Nouveau y Art Decó.

De acuerdo a lo expresado por Stratton et al. (2012), existe un interés creciente en los pigmentos que ayudan a reflejar los rayos infrarrojos y con ello contribuir a una mejor eficiencia energética de las ciudades; esto se expresa en patentes, como la US8157910 B2, cuyo cesionario original es la Scofield Company. La mencionada patente trata sobre la producción de estos pigmentos estudiando los que cuentan con mejores propiedades reflectivas de rayos infrarrojos.

En 1938, su hijo asumió el liderazgo de la compañía quien implementó programas de entrenamiento para constructores, aceleró las mejoras e innovaciones del producto durante el boom de la construcción de la posguerra. El interés en el hormigón arquitectónico fue cada vez mayor, de hecho, fue muy utilizado por F. L. Wright en algunas de sus casas, como por ejemplo en la casa Ennis que se puede apreciar en la figura 2.2, donde se construye con bloques de hormigón con granito triturado de la zona.



Figura 2.2 – Casa Ennis de 1924 (autor: F.L. Wright).
(Fuente: <https://es.wikiarquitectura.com/edificio/casa-ennis/>)

En 1962 la compañía fue adquirida por el ingeniero D. Arnold, quien desarrolló sistemas con controles de calidad más estrictos para entregar resultados más confiables. D. Arnold también amplió la gama de colores y ofertas de productos y desarrolló una amplia documentación técnica, además de contribuir con los estándares de la industria, incluyendo la Especificación Estándar ASTM C979 sobre Pigmentos para Hormigón de Color Integral.

En 1994, su hijo, P. Arnold, asume el liderazgo, quien reconoció la necesidad de tener productos más respetuosos con el medio ambiente para los arquitectos que cumplen con la certificación LEED, desarrollando e introduciendo el Sistema de Concreto High-

SRI de SOLACHROME. Actualmente la Scofield Company fue absorbida por la internacional SIKA, empresa productora de aditivos y adiciones para la construcción.

Se han desarrollado paralelamente muchas empresas que proveen pigmentos para hormigón en la construcción, como lo es el ejemplo de la empresa LANXESS Inorganic Pigments, productora de pigmentos de óxido de hierro instalada en los cinco continentes. En relación al hormigón coloreado, la empresa LANXESS es productora de los pigmentos marca Bayferrox®, los que se presentan en el mercado como productos de calidad en todas las propiedades químicas, físicas, en la fuerza de coloración y la consistencia del color. Estos productos tienen su origen en Alemania, donde han sido fabricados desde 1926. Hoy en día los pigmentos de color inorgánico LANXESS son utilizados en una amplia gama de aplicaciones, en caminos, en instalaciones deportivas, en pavimentos exteriores e interiores.

Con el desarrollo de los diferentes pigmentos producidos por diferentes empresas, se comienzan a desarrollar patentes y un marco normativo de referencia para clasificar y ensayar los mismos y sus aplicaciones.

Un punto importante en el desarrollo de pigmentos es la gran cantidad de patentes que se han generado en este sentido, se puede comenzar por las patentes para los propios pigmentos como las de la L. M. Scofield Company a principios del S.XX; Kaufman (1923), que desarrollan una cera en la que se puede disolver el pigmento y así reparar superficies de hormigón coloreado, explica que como el material colorante se lleva a los poros, la cera utilizada puede ser cera de abejas, cera de carnauba o parafina, o una mezcla de las ceras precedentes u otras, aunque la parafina sola es demasiado blanda para la mayoría de los usos. El disolvente empleado puede ser benceno, bencina, benzol. Scripture (1934), desarrolla un medio gelatinoso para disolver los pigmentos y así facilitar la coloración de forma uniforme del hormigón, en esencia se siguen inventando estos tipos de medios acuosos para mejorar la distribución de pigmentos en la masa del hormigón, según Perry, Dulaney y Moore(2004), patente US6786965 B2, en dicha invención, se refieren a una dispersión acuosa de pigmento orgánico adecuada para colorear materiales de construcción tales como mortero de hormigón, asfalto, yeso, mortero y cemento. Más particularmente, esta invención se refiere a dispersiones acuosas que contienen un aglutinante de sílice, un pigmento orgánico y un agente dispersante.

El trabajo realizado de mitad a fines de los años 70 y principios de los 80 en ASTM estableció un estándar para los pigmentos usados para integrar al hormigón. Por ejemplo, ASTM Research Report, Pigments for Integrally Colored Concrete, Journal of Cement, Concrete and Aggregates (1980); la norma ASTM C 979 (1982-1986) "Standard Specification for Pigments for integrally colored concrete", contiene las especificaciones que deben cumplir los pigmentos en polvo, usados en mezclas de hormigón íntegramente coloreadas; la norma ASTM C 979-99, es la norma que especifica la cantidad a dosificar de pigmento en el hormigón en masa, la misma indica que lo máximo prescrito para dosificar de un pigmento, será igual o menor que 10% del peso del cemento. Cuando una combinación de pigmentos es usada para producir un color e intensidad deseado, la proporción de la dosificación total de todos los pigmentos combinados no excederá a ninguna de las máximas dosificaciones recomendadas de pigmento en relación al cemento. Sin embargo, algunos pigmentos como el negro de carbón deben ser usados en menores cantidades que lo establecido debido a que es un conocido carcinógeno y daña el tracto respiratorio si se inhala, por a su alto contenido en hidrocarburos policíclicos aromáticos.

Más recientemente, la norma europea EN 12878, "Pigmentos para la coloración de materiales de construcción a base de cemento y/o cal", ha sido adoptada por el CEN (Comité Europeo de Normalización). La norma EN 12878:2014 (Pigments For The Colouring Of Building Materials Based On Cement And/Or Lime, Specifications And Methods Of Test), que define pigmentos aptos para colorear materiales en base a cemento o cal, enumera especificaciones de los mismos y métodos de ensayos; esta se puede relacionar con la norma BS EN 206-1/BS 8500 – 2001, que define las diferentes formas de coloreado del cemento; como ejemplo se presenta a continuación la tabla 2.1 publicada por Positieri (2005), quien analiza en su trabajo los diferentes métodos de coloreado de hormigón citando normas y autores de referencia.

En la tabla 2.1 se pueden observar los métodos de coloreado de hormigón y sus aplicaciones principales definidos en la citada norma. El método que corresponde a Tintas químicas reactivas, corresponde a la reacción química que produce cierto compuesto químico al entrar en contacto con la pasta de cemento, cambiando el color característico de la misma.

Tabla 2.1 - Métodos y aplicaciones del hormigón coloreado (BS EN 206-1/BS 8500, 2000).
(Fuente: Positieri, 2005).

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

La norma EN 12878:2014, especifica y detalla métodos de ensayo de pigmentos para la coloración de materiales de construcción fabricados a partir de cemento y/o cal; según ella los tipos de pigmentos empleados para este fin, pueden ser pigmentos simples, mezclas de pigmentos o mezcla de pigmentos y extendedores, en forma pulverulenta o granular, o en preparaciones acuosas. Detalla las clases de compuestos a los que generalmente pertenecen estos pigmentos, que son óxidos e hidróxidos de hierro naturales o sintéticos; óxidos de cromo, titanio y magnesio; pigmentos de complejos inorgánicos, por ejemplo, combinaciones de los óxidos e hidróxidos metálicos anteriormente mencionados junto con óxidos o hidróxidos de cobalto, aluminio, níquel y antimonio; pigmentos de ultramar; azul o verde de ftalocianina; carbono puro (debe ser considerado como un pigmento inorgánico); mezclas de los materiales anteriormente citados (que pueden incluir también extendedores). Con respecto a los óxidos de hierro la norma EN ISO 1248:2008 (Iron Oxide Pigments - Specifications And Methods Of Test), especifica los requisitos y métodos de ensayo correspondientes a los pigmentos de óxido de hierro, tipo de pigmento muy utilizado para el coloreado de hormigón en masa, se aclara que no se analizan posibles patologías que pueda producir este tipo de pigmento, en los hormigones, en el presente trabajo.

La industria de la producción de pigmentos, se basa fuertemente en la calidad de los pigmentos, para lo cual es muy importante el estudio de la estabilidad del color, para esto, se han desarrollado normas específicas y métodos de codificación de colores para poder establecer las diferencias en los mismos y cuantificarlas.

En relación al estudio de la colorimetría desde la óptica CIE L*, a*, b* (ver 2.4) como método de medición, fue desarrollada la norma EN ISO 11664-4:2011 (Colorimetry - Part 4: CIE 1976 L*A*B* Colour Space), norma que especifica el método de cálculo de las coordenadas del espacio de color L*, a*, b*, CIE de 1976, e incluye métodos de cálculo para definir entre otros, la magnitud relativa percibida de las diferencias de color, a modo de que sea cuantificable.

2.2.2- Ejemplos de obras realizadas contemporáneas.

A continuación, serán presentadas algunas obras contemporáneas de las muchas que hay con hormigón coloreado, se pueden encontrar más ejemplos en la página web de Bayferrox: <http://bayferrox.com/products-applications-bfx/colored-concrete-works/case-studies/>. También es de destacar que cada dos años se lleva a cabo un concurso en Berlín de obras de arquitectura realizadas con hormigón coloreado del que ya se han efectuado 3 ediciones (Colored Concrete Works Award), y que la Universidad Politécnica de Valencia edita desde 2008 una revista que está dedicada a difundir obras en hormigón blanco y coloreado llamada "EN BLANCO revista de arquitectura"

2.2.2.1- *El Observatorio Europeo Austral (ESO)*

Se encuentra a 2.600 metros sobre el nivel del mar en la región Cerro Paranal del desierto chileno de Atacama. El hotel ESO situado en las proximidades del observatorio, cumple la función de casa de huéspedes para los científicos y trabajadores del observatorio. En la figura 2.3 se pueden observar imágenes del edificio y la fachada principal.

La intención con el uso de hormigón coloreado con pigmentos Bayferrox® en este caso puntual es el de mimetizarse con el entorno desértico característico del lugar, por ello el tono adoptado.



Figura 2.3 – Observatorio Paranal (ESO) – Chile
(Fuente: bayferrox.com).

2.2.2.2- Soccer City.

Estadio de fútbol ubicado en Sudáfrica (figura 2.4), fue construido como sede del mundial de futbol desarrollado en Sudáfrica en 2010, es un claro ejemplo de arte y arquitectura donde fue utilizado en fachada un sistema de paneles de hormigón coloreado con Bayferrox®.



Figura 2.4 – Estadio Soccer City – Sudáfrica
(Fuente: bayferrox.com).

2.2.2.3- Daum Kakao Space.1.

Daum Kakao, una de las mayores compañías de Tecnologías de la Información de Corea del Sur, encargó el proyecto a Minsuk Cho, arquitecto de Corea. Para implementar su diseño, Minsuk Cho seleccionó un material y color que eran una representación auténtica de las características típicas de la isla. Después de una

búsqueda intensa, decidió sobre el concreto coloreado con pigmentos Bayferrox® para imitar la roca volcánica de la isla. En la figura 2.5 se aprecia el edificio.



Figura 2.5 – Edificio Daum Kakao Space.1

(Fuente: bayferrox.com).

2.2.2.4- Edificio Masdar Institute de Foster + Partners.

Ubicado en Abu Dabi, Emiratos Árabes Unidos, es un edificio que presenta una fachada construida de hormigón coloreado con arena del lugar y perforado según un diseño utilizado comúnmente en la ornamentación de la arquitectura tradicional islámica.

En la figura 2.6 se puede apreciar la particular fachada de este edificio cuyo material es el hormigón coloreado con pigmentos Bayferrox®.



Figura 2.6 – Edificio Masdar Institute

(Fuente: bayferrox.com).

2.2.2.5- Ciudad de la Justicia.

Ubicado en Barcelona, España, se trata de una serie de edificios proyectados por el Arquitecto David Chipperfield, ubicados en Gran Vía de Carles III, 111, 08034 Barcelona, España, en el año 2009.

La particularidad de los mismos es que sus fachadas están enteramente proyectadas en HACC, cuyas características se describen en el capítulo 2, punto 2.1 del presente trabajo. En la figura 2.7 se puede apreciar el grupo de edificios.



Figura 2.7 – Ciudad de la Justicia de Barcelona
(Fuente: bayferrox.com).

2.2.2.6- Palacio de las Artes Reina Sofía.

Construido en el año 2006, por el Arq. Santiago Calatrava, el Palau de les Arts Reina Sofía, es el teatro de la ópera de Valencia y sede de la Orquesta de la Comunidad Valenciana. Es obra de Santiago Calatrava y forma parte del complejo arquitectónico de la Ciudad de las Artes y las Ciencias. El material por excelencia es el hormigón autocompactante blanco que forma parte de los grandes soportes estructurales del edificio, mientras que el recubrimiento cerámico, el segundo material de mayor uso, reviste las vistosas “cascaras” del Palacio. En la figura 2.8 se puede apreciar la particular imagen del conjunto de edificios.



Figura 2.8 – Palacio de las Artes Reina Sofía.

(Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Palacio_de_las_Artes_Reina_Sof%C3%ADa)

2.2.2.7- Praça das Artes en São Paulo.

El proyecto Praça das Artes en São Paulo, lanzado en 2009, pretendía ser una acción delicada pero audaz donde lo viejo y lo nuevo se combinan en perfecta simbiosis. Los edificios antiguos restaurados se vincularon arquitectónicamente con las nuevas construcciones para crear un nuevo centro cultural y promover la interacción pública en el vecindario, mientras que al mismo tiempo revitalizaba el centro de São Paulo. El complejo cultural de tres módulos se fusionó en una sola unidad arquitectónica que abarca una superficie total de 28.500 m², conformando un acento en un paisaje urbano gris. Debido a que el edificio está expuesto a cantidades relativamente grandes de contaminación debido a su entorno urbano, los arquitectos tomaron la decisión de utilizar hormigón coloreado con pigmentos Bayferrox®, como se aprecia en la figura 2.9.



Figura 2.9 – Praça das Artes en São Paulo.

(Fuente: www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-237947/plaza-de-las-artes-brasil-arquitetura)

2.2.2.8- Plaza de la Libertad y Alianza Francesa.

El complejo de edificios se encuentra ubicado en el centro de Medellín, es un monumento arquitectónico conformado por un complejo de edificios. Las estructuras de las dos torres, que se elevan a una altura de 24 y 17 pisos respectivamente, deliberadamente evocan asociaciones con los árboles. Los elementos estructurales de la Plaza de la Libertad se basan en un hormigón coloreado con unas 60 toneladas métricas de Bayferrox® 918 LOM en el edificio principal y siete toneladas métricas de los pigmentos Bayferrox® 130M y Bayferrox® 318M en el Auditorio. La Alianza Francesa es un espacio creado recientemente para más de 12,500 estudiantes y 10,000 libros, destinado a ser un lugar para el intercambio cultural. El conjunto se puede apreciar en la figura 2.10.



Figura 2.10 – Plaza de la libertad y Alianza Francesa
(Fuente: bayferrox.com).

2.2.3- Productos para la construcción.

La variedad de productos para la construcción elaborados con hormigón coloreado es muy amplia y abarca desde bloques, adoquines, accesorios para espacios públicos como bancos, columnas, fuentes, elementos decorativos, etc.

Este tipo de elementos es mundialmente conocido, en el mercado local nacional, se comercializan productos de este tipo, los mas utilizados son los adoquines de hormigón coloreado, pero también se comercializan tejas y elementos de mobiliario urbano en este material.

2.2.3.1- Adoquines de hormigón coloreado



Figura 2.11 – Adoquines de hormigón coloreado.

(Fuente: <https://www.prefabricadosroda.com/>)

Con gran variedad de diseños y formas posibles estos elementos se encuentran cada vez más vigentes y su uso se hace cada vez más profuso. Ejemplos en las figuras 2.11 un acceso con adoquines de color rojo y 2.12 la rehabilitación de la Alameda de Hércules.



Figura 2.12 - Rehabilitación de la Alameda de Hércules. Sevilla (España), 2009.

(Fuente: www.publicspace.org/es/obras/f139-rehabilitacion-de-la-alameda-de-hercules)

2.2.3.2- Bloques de hormigón coloreado.

Ejemplo: Casa Betania, año 2012, Colombia, Arq. Laureano Forero.

Como idea se trabaja con bloques de cemento en las fachadas. En la casa todo es alargado, entonces para la Casa Betania se trabajó con un bloque que tuviera 60 cm, esto da un bloque muy largo, la mampostería se ve más liviana según expresa el arquitecto; en cuanto al color, se trabajó con cemento blanco al que se le agregaron

platos rotos de cerámica blanca y otra serie de agregados que permitieron hacer bloques totalmente blancos y de una enorme impermeabilidad con un coeficiente de dilatación prácticamente nulo. Se puede apreciar su estilo en la figura 2.13.



Figura 2.13 – Casa Betania – Colombia.

(Fuente: <http://blog.360gradosenconcreto.com/casa-betania/>)

2.2.3.3- Tejas de hormigón coloreado

Cada vez más utilizadas por diversos factores este tipo de teja de hormigón coloreado puede producirse de dos formas diferentes. Una forma de producción es agregándole pigmentos de óxidos de hierro a la mezcla y después, para evitar una eventual eflorescencia, se las cubre con un rociado de acrílico pigmentado. Este tipo de teja se emplea en los países europeos, la variación de los colores es ilimitada y puede competir en materia de colores con las tejas cerámicas. Por otra parte, se producen tejas cubiertas con una mezcla acuosa de cemento y pigmento, se fabrican sin agregado de pigmentos a la mezcla, se aplica a la teja fresca una mezcla acuosa basada en pigmentos de óxidos de hierro, cemento, agua, y se protege con un sellador transparente basado en un solvente. Esta teja se parece más a la cerámica esmaltada y se emplea en zonas cálidas de los EEUU, Nueva Zelanda, Australia, Malasia y otros países. Se pueden apreciar una imagen ilustrativa del material en la figura 2.14.

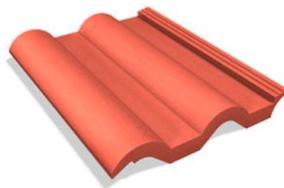


Figura 2.14 – Tejas de hormigón coloreado.

(Fuente: <http://www.archiexpo.es/prod/kb-blok/product-150455-1690673.html>)

2.2.3.4- Prefabricados de hormigón coloreado

A nivel mundial, el empleo de HACC ha tenido una gran aceptación en la industria de los prefabricados, lo cual responde a numerosos factores tales como: reducción de los tiempos de ejecución y de los costos de producción, mejora de las condiciones de trabajo por eliminación del vibrado, mejora de la calidad del producto final (acabado y durabilidad), permite el uso de moldes complejos y piezas con armaduras densas. No solo podemos encontrar ejemplos a nivel de grandes edificaciones, sino que hay una gran tendencia a utilizar este tipo de material en elementos del mobiliario urbano, como bancos para plazas, cestos de basura, columnas para iluminación, elementos decorativos diversos. Algunos ejemplos de esto se pueden apreciar en la figura 2.15.



Figura 2.15 – Prefabricados de Hormigón coloreado.

(Fuente: <https://www.cittaurbana.cl/>)

2.3- Investigaciones realizadas

En los siguientes párrafos se hace una síntesis de los diferentes puntos de interés en la investigación del hormigón coloreado y del HACC desarrollados en los últimos años, agrupando las diversas investigaciones por tipo, ya sea por investigaciones de algunas de las propiedades del material en sí, por las de algunos de sus componentes, o por el estudio de su puesta en obra, sus patologías o su aplicación en la elaboración de productos derivados del uso del mismo; pero siempre considerando las más recientes e intentando buscar las de mayor relevancia dentro del amplio espectro de investigaciones que genera el estudio de estos materiales.

2.3.1- Estudios sobre la elaboración y/o aplicación de los pigmentos.

Dentro de la amplia gama de pigmentos, hay una serie industrial de los mismos elaborados específicamente para ser utilizados en productos para la construcción, según el libro de Herbst y Hunger (2004), ya sea para fabricar pinturas y aplicar como recubrimiento o para ser incluidos en la masa del material, como lo es el caso de los morteros y hormigones coloreados, en el libro se hace un análisis de todos los pigmentos empleados en la industria en general, pero cuando se enfoca en el análisis de los pigmentos para la construcción a ser aplicados sobre hormigones, analiza por una parte las coberturas exteriores y por otra parte los que pueden ser mezclados directamente con cemento, haciendo la apreciación de que son estos últimos de muy pocos tipos, pero muchos cumplen con las condiciones para ser utilizados en la superficie del hormigón. Establece la necesidad de probar la resistencia a la cal de los pigmentos de modo que se aplique una capa de pigmento sobre una placa de asbesto cemento y luego de 24 horas se compare con el pigmento original para notar si hay diferencias de color.

A pesar de la permanente evolución del hormigón coloreado y del HACCC, sigue habiendo resistencia por algunos técnicos a su uso, principalmente por desconocimiento de algunas de sus propiedades, pero también por desconocimiento de su desempeño, como se plantea por Kosmatka, Kerkhoff y Panarese (2008), antes de mezclar un colorante en el hormigón para el desarrollo de un proyecto, se debe probar la solidez a la luz solar y autoclave, estabilidad química en el cemento y efectos sobre las propiedades del hormigón. Recomienda no utilizar cloruro de calcio con pigmentos para evitar distorsiones en el color, además de mencionar que los pigmentos deben ajustarse a la norma ASTM C979.

En la actualidad los diversos análisis se enfocan en los pigmentos derivados de óxidos de hierro, cromo, titanio y los de ftalocianina, los que normalmente pueden ser considerados como “fillers” y tienen un rol “pasivo” en la dosificación, pero se puede destacar el análisis del pigmento azul ultramar, que se encuentra el trabajo de C. Giraldo et al. (2010), donde se concluye que se trata de un tipo de pigmento que al ser adicionado a mezclas con cemento portland blanco, se comporta como una adición activa, ya que es un aluminosilicato polisulfurado de sodio que reacciona con el aluminato tricálcico (C_3A) y con el óxido de calcio (CaO) del cemento portland blanco en

presencia de agua, generando cantidades considerables de etringita a edad temprana y en menor proporción de tobermorita y como consecuencia aumentando la resistencia a la compresión tanto con la edad como con el porcentaje de sustitución, lo que indica que el pigmento es una puzolana no convencional.

En el mencionado trabajo, los resultados de resistencia a la flexión en condiciones normales de curado (Figura 2.16) muestran que los morteros sustituidos con azul de ultramar (AU) presentaron mayores resistencias que las muestras de control especialmente a edades tempranas, según se destaca por el autor, esto se debe a la forma de agujas no orientada de como se presenta la etringita.

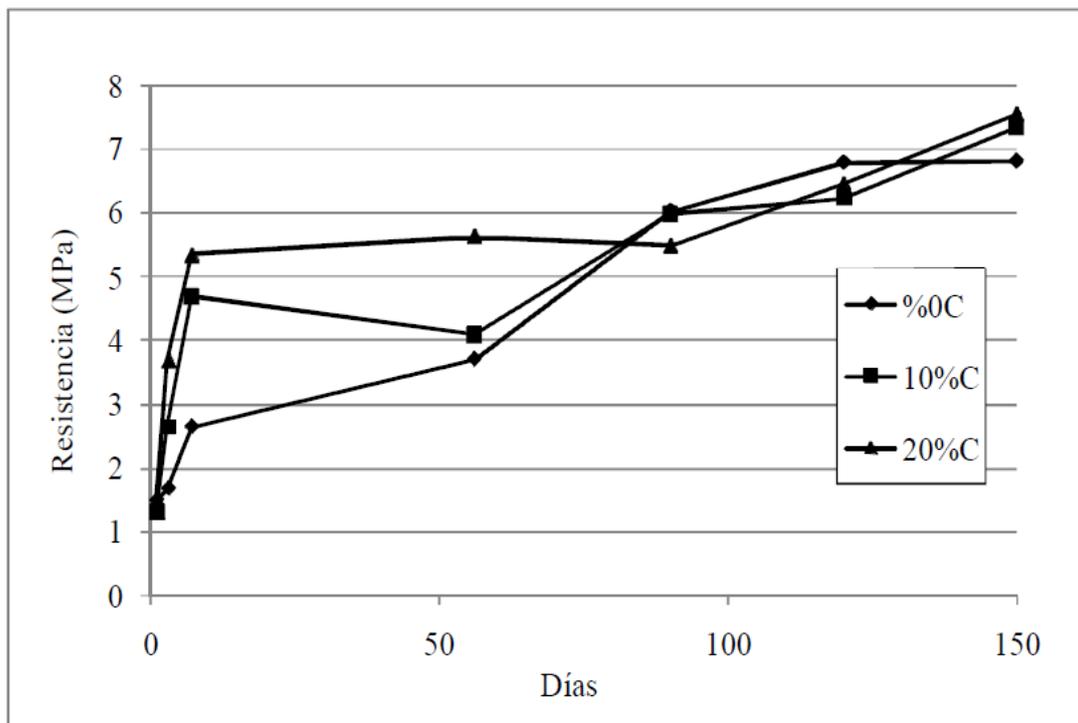


Figura 2.16 – Resistencia a la flexión de prismas de mortero con AU

(Fuente: C.Giraldo et al., 2010)

La resistencia a la compresión, en condiciones normales de curado (Figura 2.17), tal como se aprecia en la gráfica, aumenta con el porcentaje de sustitución de cemento por azul de ultramar AU para una misma edad, lo que indica que el pigmento AU actúa como una adición activa (puzolana).

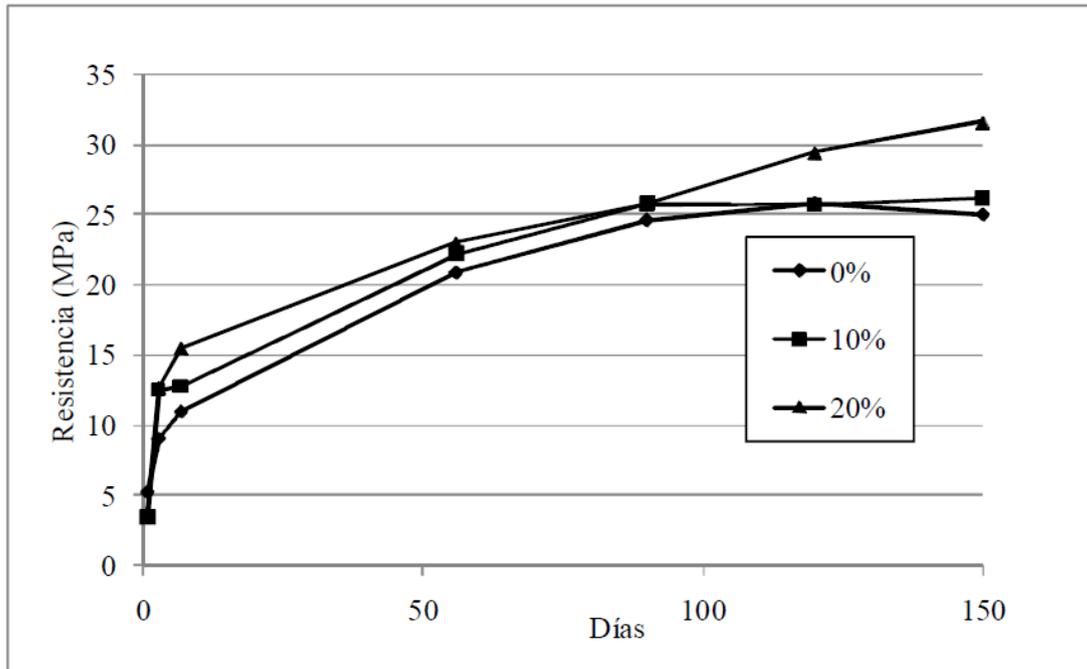


Figura 2.17 – Resistencia a la compresión de prismas de mortero con AU
(Fuente: C.Giraldo et al., 2010)

En el análisis de los diferentes tipos de pigmentos y formas de presentación para su utilización por parte de las empresas proveedoras, Kořátková y Reiterman (2014), además de analizar las diferentes formas disponibles en el mercado como polvo, granulados y en solución, junto a las influencias de otros componentes del hormigón y los efectos de partículas de pigmento fino sobre las propiedades del mismo, se analiza la mayor necesidad de agua y la trabajabilidad de cada mezcla ya que con el aumento de la superficie específica del pigmento, disminuye el flujo de hormigón fresco. Por otra parte, esta característica causa una densidad ligeramente mayor de la matriz de hormigón que resulta en una mejor durabilidad. Las dosis óptimas difieren dependiendo de la forma del pigmento, para los polvos es alrededor del 5% del peso del contenido de cemento y las cantidades más altas no provocan un mayor tinte, es más, en el caso de más del 10% sus propiedades mecánicas pueden verse afectadas negativamente.

En cuanto a la estabilidad del color analizado desde el punto de vista de la agrupación del pigmento en la matriz estructural del hormigón, se puede hacer mención al trabajo de López, Guzmán, Di Sarli (2016), “Existe una resistencia a las mezclas de cemento y pigmentos debido a las pocas experiencias que aseguran un color duradero. Para que un pigmento incorporado sea satisfactorio en la industria de la construcción, su

respuesta en elementos expuestos a condiciones climáticas exteriores debe ser evaluado en un período de 5 a 7 años. A pesar de que hay pruebas de envejecimiento acelerado que permiten investigar la estabilidad del color, no son ampliamente aceptados, ya que no han demostrado la existencia de una correlación entre los cambios acelerados y los reales. La solidez del pigmento también depende de su agrupación, por lo tanto, está fuertemente relacionado con la matriz estructural”, traducido del inglés.

En el trabajo desarrollado se describe la metodología utilizada para evaluar la estabilidad del color (ver punto 2.4) en morteros expuestos a dos ambientes. Para evitar las subjetividades de "color", se utilizó el espacio de color CIE L*a*b* para definir valores de color. Por consiguiente, se usaron las fórmulas de diferencias de color CIE DE1976 y CIE DE2000, para evaluar la estabilidad del color.

Para desarrollar el trabajo, los autores produjeron dos grupos de muestras con dos tipos diferentes de cementos, el grupo F se hizo con cemento G1 (cemento Portland comercial con relleno calcáreo), mientras que el grupo N con el G2 (cemento Portland "gris" ordinario o común). Ambos grupos de mortero contenían un superplastificante y pigmento amarillo a una relación de 2%, 4% o 6% en peso de cemento (pigmento / cemento o (p/c)), para evaluar el posible efecto del incremento del pigmento sobre la fluidez y viscosidad de los morteros. El aditivo sólido incorporado en los grupos F y N se expresó como una relación de peso de cemento de 0,40% y 0,35%, respectivamente. Se utilizó una relación agua / cemento = 0,50 en ambos grupos. Las muestras se expusieron a dos ambientes diferentes uno corresponde a una cámara (C1) que opera bajo humedad controlada ($55 \pm 5\%$) y temperatura ($21 \pm 2^\circ \text{C}$) y el otro corresponde a la naturaleza o medio ambiente (A1) de la estación de La Plata en Argentina (zona urbano-industrial), con grandes variables climáticas; los tiempos de exposición fueron de 18 meses.

En la tabla 2.2 se expresan los resultados obtenidos de acuerdo a lo expresado, los valores finales de L*, a* y b*, se obtuvieron usando un espectrofotómetro BYK Gardner, para evaluar la estabilidad del color, se calculó el parámetro total de diferencia de color (ΔE) utilizando mediciones sucesivas realizadas en diferentes momentos.

Tabla 2.2 – Estabilidad de color en morteros expuestos al ambiente A1 y C1.

(Fuente: López, Guzmán, Di Sarli, 2016)

Env	Mor	i	L _i	a _i	b _i	C _i	h _i	ΔE ₇₆	ΔE ₀₀
A1	F	1	67.2	1.6	7.4	7.6	77.8	3.6	2.92
		2	63.8	1.7	8.3	8.5	78.3		
	F2	1	65.0	3.3	18.9	19.2	80.0	2.6	2.15
		2	62.5	3.4	19.5	19.8	80.0		
	F4	1	63.2	4.9	23.4	23.9	78.1	2.1	1.41
		2	61.9	4.3	21.9	22.3	79.0		
	F6	1	63.0	6.1	28.0	28.6	77.7	2.7	2.03
		2	60.7	6.2	29.4	30.0	78.1		
	N	1	66.3	1.5	8.2	8.3	79.6	2.9	2.38
		2	63.5	1.6	9.1	9.2	80.1		
	N2	1	64.0	6.1	19.8	20.2	79.8	3.8	3.51
		2	61.2	3.6	19.5	19.9	79.5		
	N4	1	62.5	5.3	25.1	25.7	78.2	2.4	2.05
		2	60.2	5.3	25.1	25.6	78.1		
N6	1	62.8	6.8	29.6	30.4	77.1	3.3	2.29	
	2	60.4	6.1	27.5	28.1	77.4			
C1	F	1	73.7	1.0	6.1	6.2	80.4	6.3	4.79
		2	67.8	1.1	8.1	8.2	82.4		
	F2	1	68.7	2.6	19.3	19.4	82.4	1.5	1.21
		2	67.2	2.8	19.5	19.7	81.8		
	F4	1	67.8	4.5	26.0	26.4	80.3	1.3	1.04
		2	66.6	4.5	25.6	26.0	80.1		
	F6	1	68.1	6.1	30.7	31.3	78.8	0.9	0.70
		2	67.3	6.2	30.7	31.3	78.6		
	N	1	65.3	0.9	8.4	8.5	83.9	0.6	0.48
		2	64.8	0.9	8.6	5.7	84.1		
	N2	1	64.7	2.6	19.8	20.0	82.6	0.7	0.56
		2	64.1	2.7	19.6	19.8	82.3		
	N4	1	64.3	4.0	25.1	25.4	80.9	0.8	0.53
		2	63.8	4.0	24.5	24.8	80.7		
N6	1	66.6	5.5	31.1	31.6	79.9	1.2	0.91	
	2	65.6	5.7	30.5	31.1	79.4			

Con respecto a la estabilidad del color, se destaca que si los valores de ΔE_{76} son $>$ que 1.5, las diferencias de color en las superficies de hormigón se pueden percibir a simple vista. De acuerdo con esta afirmación, los valores de ΔE_{76} y ΔE_{00} obtenidos en el presente estudio indicaron que los cambios de color fueron menos percibidos en el ambiente C1 ($\Delta E_{76} < 1.5$ y $\Delta E_{00} < 1.2$) que los obtenidos en el ambiente A1 ($\Delta E_{76} > 2.1$ y $\Delta E_{00} > 1.4$). Estos resultados revelan que además de la ausencia de radiación solar, la exposición bajo condiciones de humedad y temperatura controladas contribuyó a la estabilidad del color. La exposición al entorno A1 permite afirmar que el color estaba ligeramente implicado, ya que se obtuvieron valores de $\Delta E_{76} < 3.8$ en un tiempo relativamente corto. Se observó también que a medida que aumentaba la cantidad de

pigmento, los niveles de ΔE_{76} permanecieron similares en ambos ambientes (A1 y C1), por lo tanto, la pérdida inicial de color es independiente del contenido de pigmento. Se puede concluir también que después de 18 meses de exposición en el ambiente A1, la superficie de las muestras se volvió más oscura, como lo demuestran los valores negativos de las diferencias (ΔL_i).

El trabajo analiza la evolución del color en muestras de mortero coloreadas con pigmentos de óxido de hierro amarillo y expuestas a ambientes industriales-urbanos o a otro que presenta condiciones de humedad y temperatura estables. En tales circunstancias, el color se definió según el espacio de color CIE $L^*a^*b^*$ y su evolución se caracteriza por las fórmulas de diferencia de color CIE DE1976 y CIE DE2000.

2.3.2- Adiciones complementarias a los pigmentos

Muchas veces es requerido que para lograr ciertos colores se deba utilizar cemento portland blanco, lo que trae como consecuencia además de los aumentos de costos de producción, en algunos casos problemas de trabajabilidad y posibilidad de formación de eflorescencias, es en esta línea que algunos autores han investigado en relación a la adición de escoria granulada de altos hornos (de color blanco) para reducir la cantidad de cemento portland blanco, y con esto mejorar dichas consecuencias, en este sentido es que se hace referencia al trabajo de Jang, Kang, y So (2013), donde se analizan las consecuencias de adicionar escoria granulada de alto horno (escoria granulada molida derivada de la combustión de un alto horno al fundir hierro) a mezclas de hormigón coloreado con cemento portland blanco. Dentro de las conclusiones de dicha investigación se puede destacar que, al adicionar escoria granulada de alto horno a mezclas de hormigón coloreado con cemento blanco, se reduce la posibilidad de formación de eflorescencias, obviamente se influye en el color del material, se mejoró la fluidez, mejoró la resistencia a compresión a largas edades, pero a los 28 días mantuvo resistencia mayor el mortero de cemento blanco sin adición.

Los resultados de la resistencia a la compresión del mencionado trabajo se presentan en la Tabla 2.3, como era de esperar, la resistencia a la compresión de todos los especímenes aumentó con el período de tiempo de curado. La resistencia a la compresión de los morteros coloreados con escoria granulada de alto horno aumentó significativamente a largo plazo, aunque fue relativamente menor que la de los morteros con cemento portland blanco sin adición a edades tempranas (hasta 28 días).

Tabla 2.3 – Resistencia a compresión de morteros con pigmento (Pigment), cemento blanco y escoria granulada de alto horno (GGBFS) en diversos porcentajes.
(Fuente: Jang, Kang, y So, 2013)

Pigment	GGBFS (%)	Compressive strength (MPa)			
		3 days	7 days	28 days	182 days
Non	0	16.93	23.21	27.80	32.54
	20	14.90	19.40	24.22	33.20
	40	12.94	19.48	24.70	35.28
	60	10.47	12.54	19.87	29.01
Yellow	0	14.11	22.34	26.34	30.38
	20	12.35	20.27	23.72	30.58
	40	9.21	20.38	23.13	31.63
	60	7.92	19.40	22.54	29.80
Green	0	16.07	23.72	33.01	40.18
	20	14.58	22.54	30.18	39.28
	40	11.76	23.01	28.89	38.02
	60	10.19	20.85	25.56	32.14
Red	0	15.76	21.64	29.09	31.44
	20	12.94	21.56	24.89	34.77
	40	10.27	20.85	33.99	34.18
	60	8.82	18.70	28.69	33.91

Según el trabajo, esto se debe a la reacción puzolánica y al efecto de relleno de la matriz por alta finura de la escoria granulada de alto horno. La reacción puzolánica de la escoria granulada de alto horno condujo a una microestructura más densa porque se consumió el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (hidróxido de calcio) y se formaron los geles CSH (silicato de calcio hidratado). La sustitución parcial de la escoria por la masa de cemento puede disminuir la resistencia inicial, pero aumentar significativamente la resistencia final y mejorar la microestructura y durabilidad del cemento Portland y hormigón endurecido.

Por otra parte, la adición de pigmentos inorgánicos condujo a la reducción de la resistencia a la compresión de los morteros, como se muestra en la Tabla 2.3. Sin embargo, la resistencia a la compresión de los morteros con pigmento verde fue mayor que la de otros pigmentos. Debido a que el ingrediente principal es óxido de cromo y las partículas de gran diámetro causan una acción considerable. El resultado fue acordado con lo reportado por Oner et al. (2007), para los autores el nivel óptimo de contenido de escoria granulada de alto horno para maximizar la resistencia está en aproximadamente

55 a 59% del contenido total de aglutinante, después de ese punto máximo, el exceso se comporta como un agregado fino.

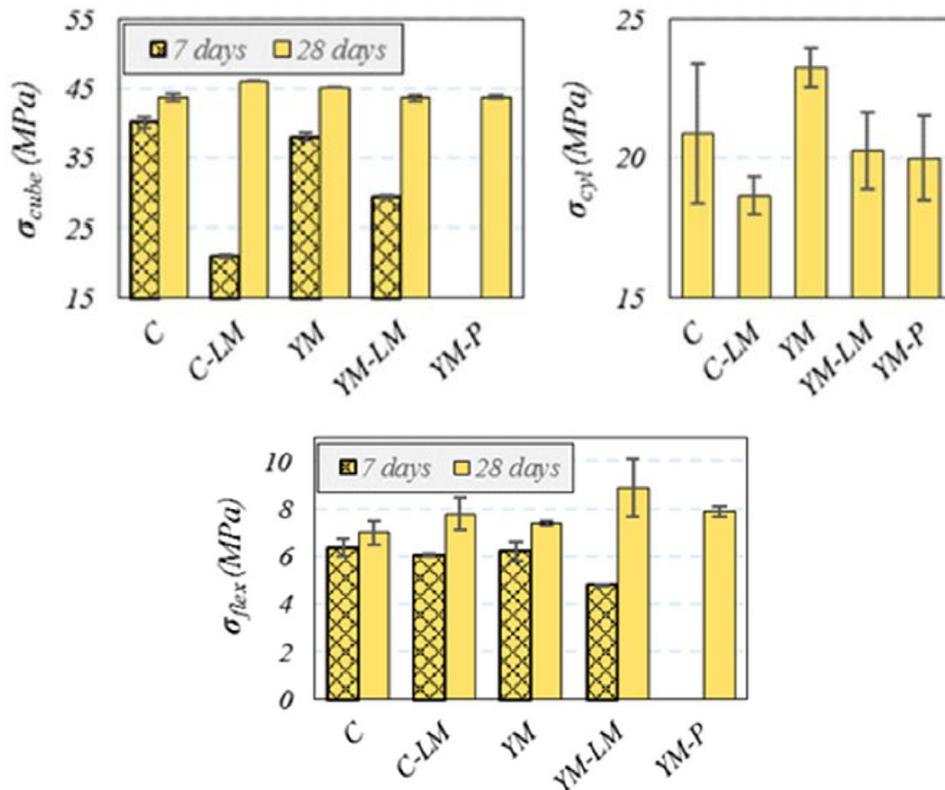
El uso principal del hormigón coloreado, como ya ha sido mencionado, es en superficies a la vista y como material de terminación, por lo que cada vez más, se estudian tipos de aditivos y adiciones para mejorar ciertas características, es en este sentido que Craeye et al. (2014), estudian la posibilidad de mejorar la durabilidad y resistencia de los caminos ejecutados con hormigón coloreado a los ciclos de congelación y descongelación, se estudia el hormigón coloreado con pigmentos rojos, considerando y evaluando posibles acciones de mejora, como la adición de SAPs (Super Absorbent Polymers, en español Polímeros Super Absorbentes), para controlar la hidratación del cemento ya que estos polímeros son capaces de absorber mucha agua, tanto como 50 veces su propio peso, y luego liberarla durante el proceso de hidratación, con lo que se logra reducir la cantidad de fisuras por retracción durante el proceso de curado, generando poros pequeños además, que colaboran para disminuir los esfuerzos internos durante procesos de congelamiento y descongelamiento del hormigón.

Para Hatami y Jamshidi (2015) la construcción arquitectónica ha experimentado mejoras considerables gracias a los recientes HACC. Es muy importante prevenir la reducción de la resistencia en morteros coloreados cuando se apunta a intensidades de color específicas, en su investigación, los efectos de la ftalocianina y pigmentos de hidróxido de hierro en morteros autocompactantes con SBR (Styrene – Butadiene – Rubber), modificado con látex. Los experimentos incluyeron pruebas de resistencia a compresión y resistencia a la flexión; se encontró que la incorporación de látex al mortero autocompactante SBR mejoró las propiedades de flexión y la intensidad del color, pero disminuyó la pureza y condujo al aumento de la porosidad.

La adición de pigmento inorgánico al mortero autocompactante con y sin SBR fue de un contenido de 5%. La Figura 2.18 muestra las propiedades mecánicas de las muestras analizadas, siendo C el mortero autocompactante de referencia, C-LM el mortero autocompactante SBR de referencia, modificado con látex, YM el mortero autocompactante de referencia con pigmento amarillo, YM-LM el mortero autocompactante SBR con pigmento amarillo, modificado con látex y YM-P el mortero autocompactante SBR con pigmento amarillo.

Figura 2.18 – Resistencia a compresión de muestras cúbicas y cilíndricas.

(Fuente: Hatami y Jamshidi, 2015)



La presencia de FeO(OH) (hidróxido de hierro) en el mortero autocompactante causó una reducción en la resistencia a la compresión en muestras curadas de 7 días, pero finalmente superó la resistencia a la compresión de la muestra de control. Las muestras fueron prismáticas de 4x4x16cm, cúbicas de 5x5x5cm y cilíndricas de Ø10cm por 20cm de alto.

La presencia de partículas de pigmento en YM-LM aumentó la resistencia a la compresión de 7 días en comparación con C-LM debido al aumento de cohesión. Se observó una disminución en la resistencia a la flexión de la muestra YM-LM en 7 días de curado, se atribuye a los efectos negativos simultáneos del pigmento y del látex sobre las características del mortero. Teniendo en cuenta C-LM, YM e YM-LM, es obvio que la resistencia a la compresión de la muestra cúbica YM-LM es menor a los 28 días, se visualiza que la adición de látex en un mortero coloreado autocompactante disminuiría la resistencia a la compresión, aunque las variaciones son menores. Del análisis de las muestras cilíndricas se reveló que la adición de látex y pigmento inorgánico no tienen efectos importantes sobre la resistencia a la compresión.

2.3.3- Productos para la construcción de hormigón coloreado

Los trabajos de teóricos independientes a la industria de producción de pigmentos, se basan fuertemente en la calidad de los pigmentos, del estudio de la estabilidad del color, de sus características en estado fresco y sólido, de su resistencia mecánica, etc., pero hay una serie de teóricos que se han dedicado especialmente al análisis de productos para la construcción de hormigón coloreado, como bloques, adoquines, tejas, elementos prefabricados, y el estudio del prefabricado con hormigón coloreado en sí mismo. Es en este sentido que son analizados algunos ejemplos de esta línea de investigación.

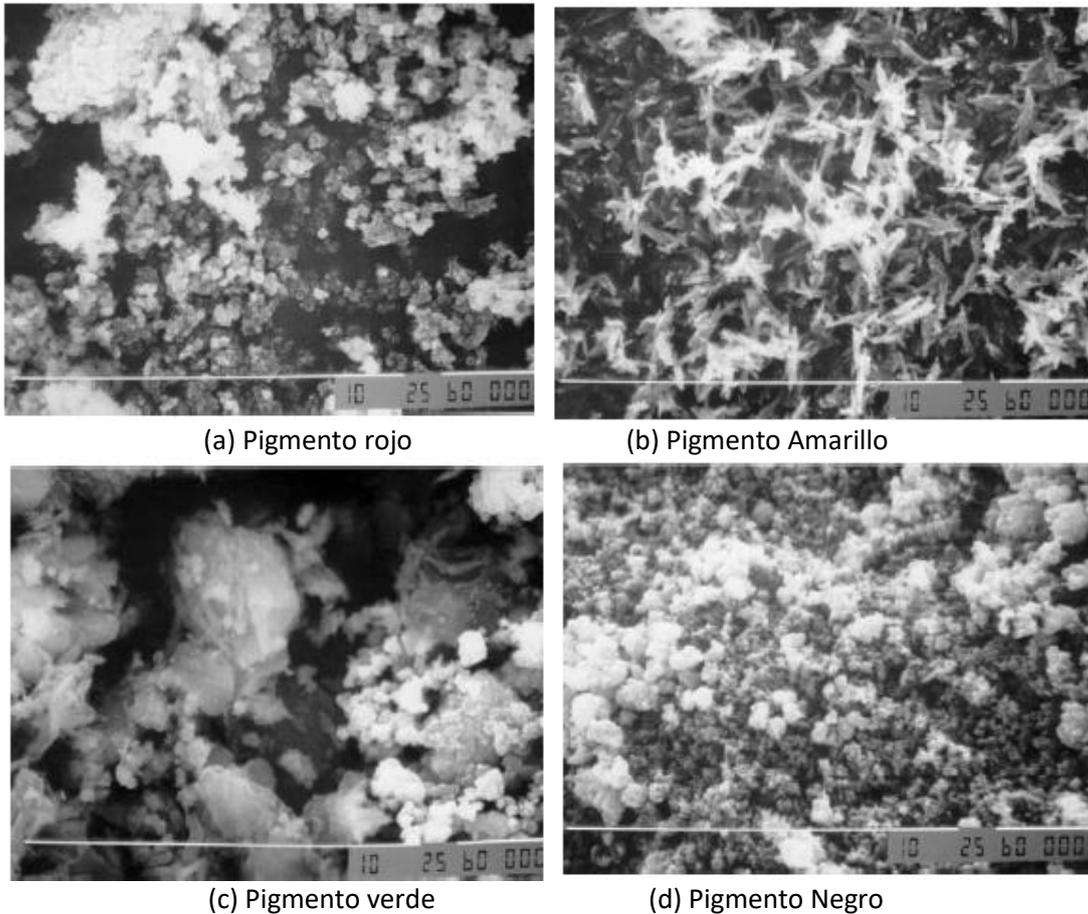
En el análisis de productos de hormigón coloreado se identifica el trabajo de Szadkowski (1980), donde se analiza el efecto de los pigmentos sobre los adoquines de hormigón coloreado, en el mismo, además de analizar los tipos de pigmentos, los compara como “fillers” o partículas de adición finas en su influencia en el hormigón, también analiza la necesidad de aumentar la relación agua/cemento para mejorar la trabajabilidad con la adición de pigmentos lo que lleva a una pérdida de resistencia, no por la acción de los pigmentos sino por el aumento de la relación a/c, cosa que no sucede al mantener inalterable dicha variable.

En la misma línea de análisis se presenta el trabajo de Lee et al. (2005), trabajo que presenta los resultados experimentales detallando las propiedades de los adoquines de hormigón teñidos con pigmentos de óxido de hierro. El autor alude que los resultados de estos experimentos son los siguientes debido a que las partículas de pigmentos de óxido de hierro son más finas que las de óxido de hierro marrón, los adoquines de hormigón, mezclados con el primero adquirieron mayor intensidad de color que con este último. El análisis adicional determinó una relación definida entre la resistencia a la flexión y la relación de absorción de adoquines teñidos de pigmento.

El ingrediente principal de los pigmentos rojo, amarillo y negro utilizados en el mencionado trabajo, es el hidróxido de hierro (Fe_2O_3) y el del pigmento verde es el óxido de cromo (Cr_2O_3). La figura 2.19 muestra las formas de las partículas, observadas por microscopía electrónica de barrido, donde los pigmentos rojo, verde y negro son de forma esferoidal, el pigmento rojo se encontró que era finito, y el pigmento verde se encontró que era un pigmento verde pintado sobre un polvo de piedra finita. Además, se encontró que el pigmento negro era una mezcla de negro de carbón y polvo fino,

como se muestra en la Figura 2.19 (d), lo que mejoró la cromaticidad negra total; las partículas de pigmento amarillo eran alargadas, diferentes de la forma esferoidal de los pigmentos rojo, verde y negro, como se muestra en la Figura 2.19 (b), y tiene una influencia considerable en la disminución de la fluidez.

Figura 2.19 – Microscopía electrónica de barrido de diferentes pigmentos con hidróxido de hierro (Fe_2O_3), aumento x7500.
(Fuente: Lee et al., 2005)



No solo elementos constructivos en base al uso del hormigón coloreado individuales pueden ser parte de una obra de arquitectura, sino que la obra en sí misma puede estar conformada en base a elementos prefabricados elaborados con este material, en la constante tendencia a generar ciudades más limpias y ecológicas, Bennett (2005), analiza en su publicación este tipo de arquitectura conformada por el arte del prefabricado, en dicha publicación analiza la producción de piezas prefabricadas con hormigón coloreado en Europa, donde desde la posguerra ha tenido un desarrollo

sostenido. Con respecto al estudio de la fabricación de elementos prefabricados de hormigón colorado, plantea que los pigmentos con cemento blanco crean colores brillantes y los pigmentos con cementos grises crean colores de tierra más aburridos. En cuanto a la firmeza del color, menciona que las empresas de prefabricados de Europa del Norte están de acuerdo en que es imposible mantener la tonalidad original de un hormigón pigmentado, especialmente hormigones grises oscuros o negros, ya que como el color se desvanece con el tiempo y puede ser diferente cuando se hormigona en invierno o verano, debido a las temperaturas del aire predominante y la humedad. Para asegurar el color más consistente, siempre se especifica el uso del cemento blanco, ya que, si se utiliza un cemento portland gris ordinario o cemento con escoria de alto horno, existe un riesgo grave de que el color del cemento pueda cambiar durante el año debido a sutiles variaciones en la materia prima que afectan al color final.

Según Tajne y Thakare (2009), el hormigón es una piedra artificial a la que se puede dar formas y acabados deseados; es un material estructural también. El autor añade que, si el hormigón está coloreado con pigmentos integralmente, con su belleza radiante se pueden crear columnas, balcones, bloques prefabricados, pavimentos y bordillos especiales, características del paisaje, bancos, fuentes de agua y piscinas. Para él hacer hormigón coloreado es un arte y ciencia ya que, en sitio, con hormigoneras normales no se puede obtener color uniforme y parejo en las distintas canchadas.

2.3.4- Patologías en el hormigón coloreado.

Un tema recurrente en el estudio de patologías del hormigón coloreado es el de las eflorescencias, ya que si se trabaja sobre un material uniforme en masa y acabado superficial, cualquier problema intrínseco del mismo puede provocar su falla de desempeño en términos estéticos, las eflorescencias son comunes cuando se elaboran elementos prefabricados de hormigón, por el fraguado rápido por ejemplo según afirma Bennett (2005) quien estudia este tipo de patologías, expresando que como en la producción del hormigón se hidratan también carbonatos, el CO_2 se combina con estos en el cemento, se forma carbonato de calcio, lo que tiene el efecto de blanquear ligeramente el color de la superficie del hormigón. Según el autor, el efecto es más evidente en hormigones de colores oscuros, pero para minimizar este riesgo las empresas productoras de prefabricados realizan una limpieza química de la superficie, procurando siempre tener superficies ricas en cemento pigmentado.

Como se desarrolla punto a punto en el presente trabajo, también en esta instancia hay análisis desarrollados a partir de la temática de la estabilidad de color, como se desarrolla en el trabajo de Bertolini y Lollini (2011), es muy frecuente ver esta problemática asociada a los diferentes materiales empleados en construcción, como por ejemplo los adoquines de hormigón que por lo general se producen con hormigón en llenado doble y la capa superficial se colorea a través de la adición de pigmentos cuando estos son de color, el trabajo desarrollado trata sobre el descoloramiento de los bloques causados por la intemperie y otros factores, lo que se traduce en la pérdida de los requisitos estéticos. En el trabajo se examinó el color y las diferencias microestructurales entre los pavimentos de hormigón nuevos y degradados con diferentes coloraciones; el color se midió mediante análisis de imagen y espectrofotometría, se obtuvieron resultados comparables entre las dos técnicas, se midieron las diferencias de color entre bloques de hormigón nuevos y degradados. Los análisis macro y micro estructural mostraron que la exposición al medio ambiente alteró la capa superficial de la pasta cementada endurecida del adoquín de hormigón, lo que causó cambios de color.

López (2013) analiza una metodología que permite evaluar la homogeneidad del color y la cantidad de burbujas en distintas superficies obtenidas con Hormigones Coloreados de diferente fluidez. “El método consiste en realizar una inspección visual, detectar defectos, decidir los lugares para medir el color según el espacio CIE $L^*a^*b^*$, relevar las burbujas, y así elaborar el diagnóstico. Los resultados muestran que la calidad varía según el tratamiento que reciben los moldes y según la fluidez del hormigón. En general, la homogeneidad del color en los HACC rojo y amarillo fue mejor que la obtenida en los hormigones coloreados compactados mecánicamente. También se destacó la menor presencia de burbujas en los HACC.”.

Como se describe en el párrafo anterior, para el mencionado trabajo se ejecutaron HACC y hormigón coloreado con pigmento rojo y amarillo, los hormigones se colocaron en un molde metálico de 0.08 x 1.0 x 2.0 m, sobre los laterales interiores del molde se aplicaron dos tratamientos superficiales, un agente desmoldante de base oleosa (AD) y un film de plástico (F), luego se analizaron los resultados visualizando los diferentes porcentajes de burbujas obtenidos, para esto se plantean categorías de porcentajes de acuerdo a un molde cuadrado de 50x50cm en el que un porcentaje P1 corresponde a

3000 mm²=1.2%; P2 corresponde a 2250mm²=0.9%; P3 1500mm²=0.6% y P4 750mm²=0.3%.

En la tabla 2.4 se detallan los resultados obtenidos del análisis de los HACC con pigmento rojo (HAC-r) y hormigón convencional con pigmento rojo (HA-r), donde se puede observar que los autocompactantes en contacto con una superficie de base oleosa son los que presentan un porcentaje menor de burbujas; y que en general los HACC presentan menor cantidad de burbujas que el hormigón convencional.

Tabla 2.4 – Contenido de burbujas sobre las caras de los paneles con HA-r y HAC-r.
(Fuente: López, 2013).

N° de Cuadrícula	HA-r						HAC-r					
	Lado A (AD)			Lado F (F)			Lado A (AD)			Lado F (F)		
	(%)	mm ²	P	(%)	mm ²	P	(%)	mm ²	P	(%)	mm ²	P
1	7.6	3816	> P1	1.6	4027	> P1	0	0	P4	0.0	13	P4
2	2.8	7007	> P1	1.3	3160	P1	0	0	P4	0.1	244	P4
3	2.7	6818	> P1	0.9	2305	P2	0	0	P4	0.8	1994	P2
4	2.0	5082	> P1	0.8	1958	P2	0	0	P4	1.0	2599	P1

2.3.5- Producción

Del estudio del material con respecto a su puesta en obra se desarrollan trabajos muy interesantes, vinculados algunos a edificios concretos y otros a nivel general, ya que de la teoría a la práctica en obra se pueden generar diferencias no solo a nivel de colores sino a nivel de dosificaciones, debiendo hacer las correcciones necesarias al momento de producir el hormigón, esto es más delicado cuando se trata de HACC.

Según López et al. (2007) en el estudio del HACC no solo se debe trabajar con la dosificación y la elaboración de pastones de prueba, sino que se debe sistematizar el control de medición de color, mediante controles en la producción, efectuando controles en los cementos, ya que existen diferencias de luminosidad entre los diferentes cementos, controlando los fillers, controles en los super-fluidificantes y pigmentos utilizados, controles en cambios de color por contacto con moldes por diferencias de tonalidades entre superficies de terminación. En este sentido podemos encontrar

trabajos como el de López et al. (2009) que recomiendan realizar estudios sobre morteros, como una buena alternativa de predecir el comportamiento de la luminosidad, saturación y tono en los HACC correspondientes.

En el presente trabajo se plantea como muy importante el método de trabajar sobre morteros, apoyando lo analizado por López et al. (2009) donde se expresa que dicho método permite, entre otras posibilidades, definir la dosis de superplastificante para diferentes combinaciones de pigmento / cemento / adiciones, así como para verificar el efecto de los pigmentos sobre la viscosidad del HAC y su variación a lo largo del tiempo. El uso de morteros permite evaluar aspectos específicos requeridos para HACC como los parámetros colorimétricos, la homogeneidad del color y el acabado superficial de los diferentes tipos de moldes, se encontró que la capacidad de auto-compactación del mortero casi no se ve afectada cuando hay pequeños cambios en el contenido de pigmento. La metodología de diseño de la mezcla permite obtener las propiedades de color deseadas sin numerosos ensayos.

En vías de definir un proceso de fabricación, control y puesta en obra de un hormigón autocompactante coloreado en una planta dosificadora y validarlo en una obra real ejecutada con diversos tipos de hormigones, se desarrolla el trabajo de Ainchil, García y Álvarez (2008), se trata con detalle el empleo de hormigón autocompactante en cantidades relevantes para la construcción de la fachada de hormigón visto in situ coloreado en masa de un conjunto de edificios singulares en construcción situados en la Ciudad de la Justicia de Barcelona. Es uno de los casos más singulares del uso de este tipo de material donde se definen pigmentos, dosificaciones, y procesos productivos para evitar patologías posteriores como problemas de pigmentación, eflorescencias, fallas en encofrados al momento del llenado lo que produce huecos y deformaciones en las superficies terminadas, diferencias de tonalidad por diferentes llenados. Para evitar este tipo de problemas se realizaron llenados a escala real, utilizando encofrados metálicos y desmoldantes incoloros, haciendo varios pastones de prueba para efectuar correcciones a la dosificación calculada. Como conclusión se expresa que el pigmento no alteró las características del HACC y que el resultado final fue de acuerdo a lo esperado. A continuación, se expresa en la tabla 2.5 la dosificación original en comparación con la dosificación utilizada, siempre utilizando materiales comunes para la producción de cemento de la ciudad de Barcelona.

Tabla 2.5 - Evolución de la Dosificación, Ciudad de la Justicia, Barcelona.

(Fuente: Ainchil, García y Álvarez, 2008)

DOSIFICACIÓN	Inicial determinada por el Laboratorio de FCC Co	Patrón final empleado
CEM I 52,5 R	450 Kg	450 Kg
Pigmento	4,5 Kg	5 Kg
Agua	230 kg	207 kg
árido fino 0/5	926 Kg	1000 Kg
árido fino 5/12	505 Kg	545 Kg
árido grueso 12/20	252 Kg	100 Kg
Sikament 177	1,5 litros	4 litros
Sika Viscocrete 5-900	4,5 litros	6,5 litros
Relación a/c	0.51	0.46

La dosificación fue calculada para obtener un HACCC con una $f'_{ck} = 35$ MPa la que fue superada en obra de acuerdo a los ensayos realizados.

2.4- Sistemas de medición de color

2.4.1- Color

El color es una sensación que producen los rayos luminosos en los órganos visuales y que es interpretada en el cerebro. Se trata de un fenómeno físico-químico donde cada color depende de la longitud de onda. Los cuerpos iluminados absorben parte de las ondas electromagnéticas y reflejan las restantes, dichas ondas reflejadas son captadas por el ojo y, de acuerdo a la longitud de onda, son interpretadas por el cerebro.

El filósofo Aristóteles (384 - 322 AC) definió que todos los colores se conforman con la mezcla de cuatro colores y además otorgó un papel fundamental a la incidencia de luz y la sombra sobre los mismos. Estos colores que denominó como básicos eran los de tierra, el fuego, el agua y el cielo. Siglos después, Leonardo Da Vinci (1452-1519) quien también consideraba al color como propio de la materia, avanzó aún más definiendo la siguiente escala de colores básicos: primero el blanco como el principal ya que permite recibir a todos los demás colores, después en su clasificación seguía amarillo para la tierra, verde para el agua, azul para el cielo, rojo para el fuego y negro para la oscuridad, ya que es el color que nos priva de todos los otros. Finalmente fue Isaac Newton (1642-1519) quien estableció un principio hasta hoy aceptado; la luz es color. En 1665 Newton

descubrió que la luz del sol, al pasar a través de un prisma, se dividía en varios colores conformando un espectro.

Así como Newton definió físicamente el color, también se le debe a J. Goethe (1749-1832) el estudio de las modificaciones fisiológicas y psicológicas que el ser humano sufre ante la exposición a los diferentes colores. En 1950 el Profesor A. Münsell desarrolló un sistema, mediante el cual ubica en forma precisa a los colores en un espacio tridimensional. Para ello define tres atributos en cada color, el primero **matiz**, la característica que nos permite diferenciar entre el rojo, el verde, el amarillo, etc. que comúnmente llamamos color, el segundo **valor**, indica la claridad de cada color o matiz. Este valor se logra mezclando cada color con blanco o bien negro y la escala varía de 0 (negro puro) a 10 (blanco puro), el tercero **intensidad**, es el grado de partida de un color a partir del color neutro del mismo valor.

La percepción del color incluye tres elementos necesarios, una fuente de luz, un objeto que es iluminado y un observador. La fuente de luz ilumina al objeto el que rechaza ciertas ondas de determinada longitud las que son percibidas por el observador como un determinado color. Esto se puede observar en la figura 2.20.

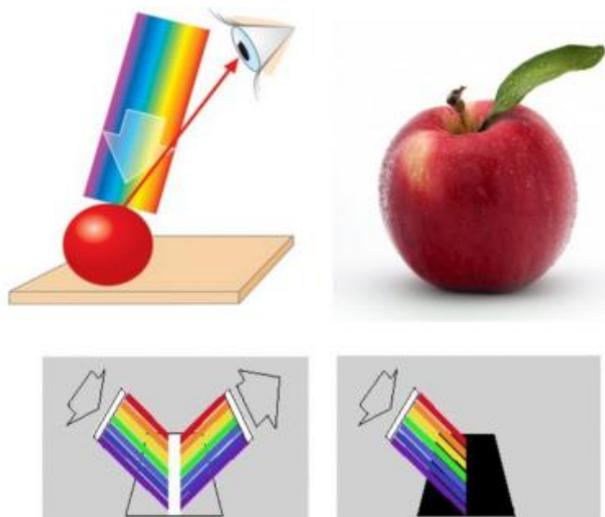


Figura 2.20 – Percepción del color

(Fuente: <http://daovortex.blogspot.com/2015/11/unidad-2-la-imagen-digital-23-el-color.html>)

La luz es una forma de energía y se propaga en forma de ondas electromagnéticas. La longitud de onda es una característica importante de la onda electromagnética y varía desde fracciones de nanómetros ($1 \text{ nm} = 10^{-7} \text{ cm}$) hasta kilómetros.

Isaac Newton uso por primera vez la palabra espectro (del latín, "apariciencia" o "aparición") al describir sus experimentos en óptica. Newton observó que cuando un estrecho haz de luz solar incide sobre un prisma de vidrio triangular con un ángulo, una parte se refleja y otra pasa a través del vidrio y se desintegra en diferentes bandas de colores.

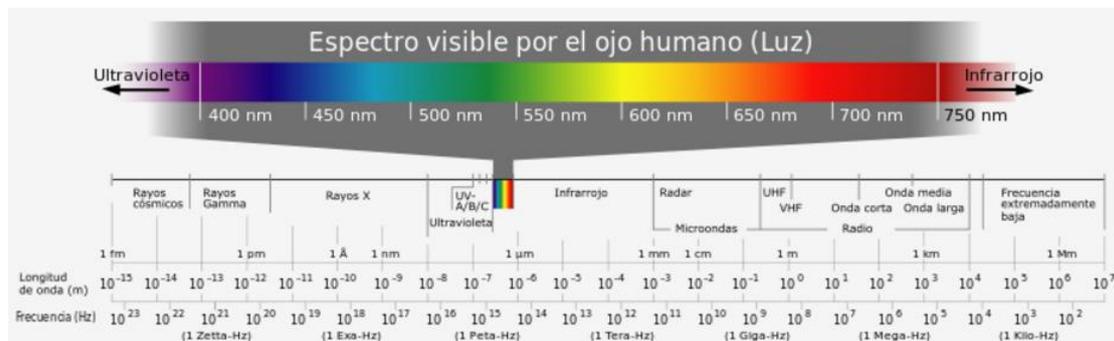


Figura 2.21 – Espectro visible de longitudes de onda.

(Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Espectro_visible)

El ojo humano solo puede detectar longitudes de onda de la región visible únicamente, esta región va desde los 380 nm a los 780 nm del espectro electromagnético (figura 2.21).

2.4.2- Sistema CIE $L^*a^*b^*$

El CIE $L^*a^*b^*$ (CIELAB) es un modelo cromático que se utiliza para describir todos los colores que puede percibir el ojo humano. Fue desarrollado específicamente con este propósito por la Commission Internationale d'Éclairage (Comisión Internacional de la Iluminación), razón por la cual se abrevia CIE.

El espacio de color CIE 1931 es el nombre de uno de los primeros espacios de color definidos matemáticamente. En 1931 la Comisión Internationale de l'Éclairage (CIE), define este modelo matemático basándose en una serie de experimentos realizados a finales de los años 1920 por Wright y Guild; con él se definieron con precisión los tres colores primarios de la síntesis aditiva de color, a partir de los cuales pueden crearse todos los demás. CIE 1976 $L^*a^*b^*$ está basado en el espacio de color CIE de 1931 como un intento de corregir las diferencias de color que percibe el ojo humano. Las relaciones no lineales para L^* , a^* y b^* pretenden emular la respuesta no

lineal del ojo, tratando cada color como un punto en un espacio tridimensional, con tres componentes: L^* , a^* , b^* . Los asteriscos (*) que siguen a cada letra forman parte del nombre, ya que representan L^* , a^* y b^* , de L , a y b .

Los tres parámetros en el modelo representan, L^* , la luminosidad de color (L^* , $L^*=0$ rendimientos negro y $L^*=100$ indica blanca), a^* , su posición entre rojo y verde (a^* , valores negativos indican verde mientras valores positivos indican rojo) y b^* , su posición entre amarillo y azul (b^* , valores negativos indican azul y valores positivos indican amarillo).

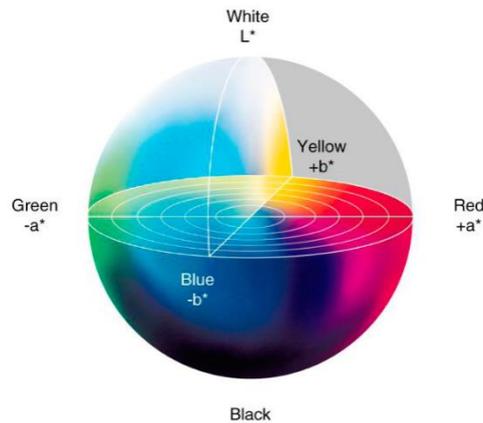


Figura 2.22- Parámetros $L^*a^*b^*$.

(Fuente: <https://disenoypreimpresionmozadr.wordpress.com/2012/03/20/espacio-cielab/>)

El modelo de color $L^*a^*b^*$ (figura 2.22) ha sido creado para servir como un dispositivo independiente modelo para ser utilizado como referencia. El modelo de color $L^*a^*b^*$ es tridimensional y solo puede ser representado adecuadamente en un espacio tridimensional.

2.4.3- Colorimetría.

De acuerdo a lo expresado por Bastie (2013) la colorimetría se convirtió en un tema de estudio específico en la CIE. Todo el trabajo realizado en este campo es probablemente el logro más importante de la CIE cuya actividad importante fue definir un espacio de color uniforme para determinar fácilmente las diferencias de color. Para ello, después de algunos intentos iniciados en 1960, fue adoptado el espacio de color, en 1976, CIE 1976 $L^*a^*b^*$. Más recientemente, en 1994 y 2000, se recomendaron fórmulas de diferencia de color las que ya han sido nombradas en el punto 2.4 como varias normas sobre el sistema colorimétrico de la CIE, las que se han publicado conjuntamente con ISO para la mayoría de ellas.

Según Ungvarsky (2016), la colorimetría es la técnica científica de medir el color de un objeto o sustancia. El estudio del color de un objeto o de una sustancia puede realizarse con una herramienta conocida como colorímetro.

La diferencia entre dos colores medidos con el sistema CIE L*a*b* se conoce como ΔE o lo que es lo mismo el error delta o el “delta e”. Donde la letra griega delta denota diferencia y la “E” proviene del término alemán Empfindung o Sensación, por lo que su traducción literal es la “diferencia de sensación” que percibimos al exponernos a dos colores. Habitualmente se escribe también como ΔE* donde el asterisco denota el uso de valores CIELAB para los cálculos.

Hay varias fórmulas para el cálculo de ΔE, siendo la más común y sencilla de implementar la CIE76

$$\Delta E^* = \sqrt{((L^*1-L^*2)^2+(a^*1-a^*2)^2+(b^*1-b^*2)^2)}$$

Si ΔE* es inferior a 3, se considera JND o “just noticeable difference” lo que se traduce como diferencia apenas perceptible que se produce entre dos niveles de intensidad de un estímulo sensorial. O lo que es lo mismo, una diferencia de color muy difícilmente apreciable por el ser humano (ver tabla 2.6).

La norma ISO 12647-2 es la encargada de los estándares de impresión, entre otras muchas definiciones, aborda los umbrales de tolerancia para ΔE* en la industria gráfica.

Tabla 2.6 – interpretación de valores de ΔE*
(Fuente: elaboración propia en base a norma ISO 12647-2)

ΔE*	Calidad
1	Excelente
1-2	Buena
2-4	Normal
4-5	Suficiente
> 5	Mala

Valores superiores a 5 se proponen como inaceptables en la mayoría de procesos ya que indican que la diferencia de color es especialmente evidente. Con la diferencia de color se puede conocer la diferencia entre un color y otro de patrón, pero no es el único parámetro que puede obtenerse mediante cálculo, en la siguiente tabla se expresan los diferentes valores y su significado, entre ellos, C^* que corresponde a la saturación y la diferencia entre saturaciones de dos muestras expresados como ΔC^* .

Tabla 2.7 – Cálculo de parámetros colorimétricos.
(Fuente: elaboración propia en base a CIE $L^* a^* b^*$:1976)

PARAMETRO	SIGNIFICADO	FÓRMULA
ΔL^*	Diferencia de luminosidad	$L^*_{final} - L^*_{inicial}$
Δa^*	Diferencia eje rojo-verde	$a^*_{final} - a^*_{inicial}$
Δb^*	Diferencia eje amarillo-azul	$b^*_{final} - b^*_{inicial}$
C^*	Saturación	$\sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2}$
ΔC^*	Diferencia de saturación	$\sqrt{(\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$
E^*	Color total	$\sqrt{(L^*)^2 + (a^*)^2 + (b^*)^2}$
ΔE^*	Diferencia total de color	$\sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$

En base a la tabla 2.7 es que se elaboran los cálculos correspondientes desarrollados en el capítulo 4, dichas fórmulas expresan diferentes características del color y permiten predecir cambios eventuales y futuros dentro de los parámetros detallados en la tabla 2.6.

3- PLANEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

Como ha sido expresado anteriormente la idea de esta tesis es estudiar propiedades en estado fresco y endurecido del HACC con cemento gris y cemento blanco, las que serán comparadas con HAC de igual dosificación sin pigmentar, para poder establecer las diferencias entre ellos, y realizar estudios con espectrofotómetro de diversas muestras de HACC en estado endurecido, antes y después de pasar por cámara de envejecimiento UV para poder establecer la estabilidad del color.

Para alcanzar estos objetivos es que se ha desarrollado una campaña experimental en la que se ha realizado una serie de hormigones donde en particular se fijan los áridos, adiciones y aditivos, tipos de cemento (cemento portland gris o cemento portland blanco en idéntica cantidad, 445,50 kg/m³) y procedimientos de mezclado para intentar individualizar como parámetro de estudio la influencia en las mencionadas propiedades de los pigmentos involucrados, por lo que, como variables se tienen los pigmentos involucrados (tres: rojo, amarillo y azul) y dos cementos Portland con características diferentes (gris y blanco).

Los hormigones realizados se han planteado en base a dos grupos, como hormigones con idéntica dosificación realizados con cemento blanco o gris; se trabajó en base a un hormigón patrón (con cemento gris para un grupo y cemento blanco para el otro grupo), de referencia, el cual no posee pigmento y tres hormigones con distintos colores de pigmentos, siempre con igual porcentaje de agregados en función del peso de cemento por metro cúbico de hormigón, esto conforma un total de 8 mezclas, cuya dosificación se indica más adelante, en la sección 3.4, las cuales también se comparan entre sí.

Para poder aislar como elemento de estudio el efecto de cada pigmento como adición en el estudio del HACC, se plantea el estudio del mismo en su versión HACC con cemento gris y HACC con cemento blanco, siendo el cemento lo único que se varía para facilitar el análisis de cambios de tonalidades, pero sin variar ningún otro elemento. A cada tipo de cemento se adiciona cada tipo de pigmento en la dosificación indicada sin variar ningún otro componente ni en tipo ni en su dosificación.

3.1- Investigación experimental.

Para la investigación experimental las variables consideradas fueron:

- Tipo de cemento: se utilizó cemento Portland gris CPN40 de la empresa Cementos Artigas de Uruguay y cemento Portland blanco CEM I 52,5R de la empresa CIMSA de Turquía; se han obtenido sus respectivas características directamente del proveedor. Se tomaron estos dos cementos para poder evaluar con los mismos pigmentos diferentes tonos de color, ya que con cemento blanco es posible obtener una gama de colores más claros.
- Tipo y color de pigmento: se han utilizado pigmentos inorgánicos, de tres colores, amarillo, rojo y azul. Los pigmentos son los utilizados para la fabricación de pinturas. Se tomaron estos pigmentos ya que son más comunes en los comercios de la ciudad y más accesibles a nivel de costos (ver punto 3.3.4).
- Porcentaje de pigmento: se adoptó un porcentaje fijo del 3% en peso del cemento más el material fino empleado para obtener la autocompactabilidad del HAC (en esta tesis el material fino fue polvo de electrofiltro de empresa cementera, PEF); de acuerdo a la bibliografía hay un porcentaje óptimo a partir del cual no se obtienen cambios significativos en el color que ronda de 3 a 6% para pigmentos fabricados para colorear hormigones específicamente. Se opta por el 3% ya que se usa menos cantidad de pigmento y por ende se obtiene un material más económico.
- Edad: la edad de ensayo se fijó en 28 días ya que es la edad usualmente empleada para ensayos de hormigón.

Se aclara que se ha estudiado un solo porcentaje de pigmento y una edad de ensayo para dejar fijas estas variables y poder alcanzar el objetivo del presente trabajo.

Se plantea la elaboración de hormigón autocompactante de acuerdo a dosificación que se describe en el punto 3.4, la cual brindó excelentes resultados en una investigación realizada en el Instituto de la Construcción (IC) de FADU-UdelaR (Rodríguez et al.,2015).

En la Figura 3.1 se observan las curvas granulométricas (UNIT-NM 248:2001) de ambos áridos gruesos y la combinación gravillín/pedregullo utilizada, que corresponde a la mezcla 40-60.

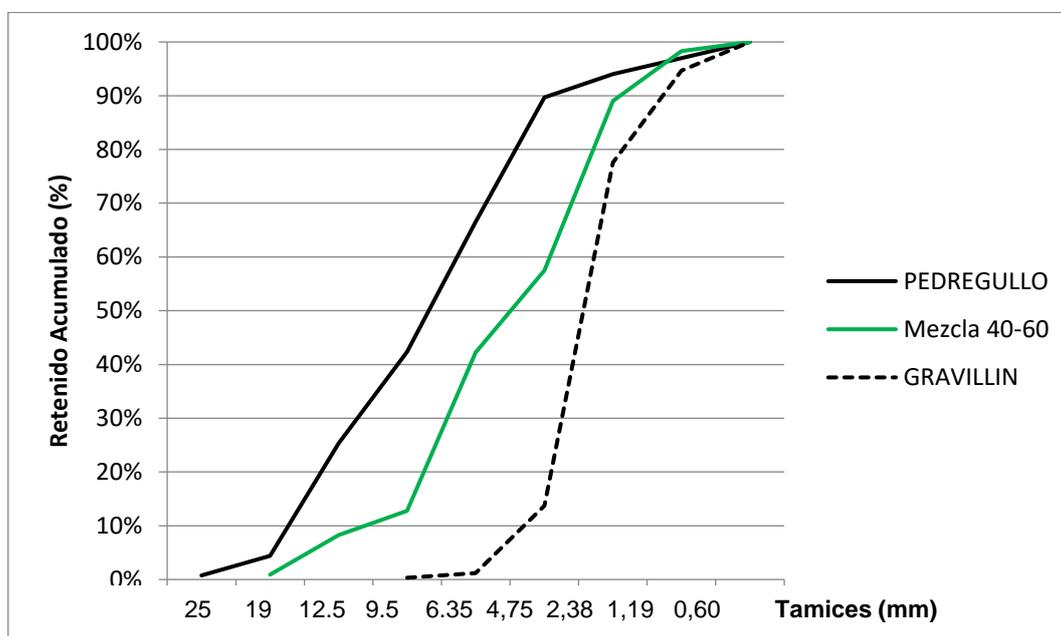


Figura 3.1 - Curva granulométrica de áridos gruesos

(Fuente: Rodríguez et al. 2015)

Por otra parte, se toma lo analizado por Rodríguez et al. (2015) para la determinación del Coeficiente de Forma del pedregullo según la norma UNIT 1029:1999, en dicho trabajo fue utilizando el calibre para el cálculo del volumen de la esfera circunscrita al grano, el valor así obtenido para el coeficiente de forma fue $\alpha=0.23$, cumpliendo con el mínimo establecido en la norma UNIT 1050:2005.

3.2.1.2- Agregado fino

Es una mezcla de arenas naturales, compuesta por una arena fina cuyo Módulo de Finura (MF) es 1.955 y una arena gruesa cuyo Módulo de Finura (MF) 3.563. En la Tabla 3.1 se indican la densidad, el peso específico y la absorción de los agregados utilizados. En la Figura 3.2 se observan las curvas granulométricas (UNIT-NM 248:2001) de ambas arenas usadas y de la combinación de arena fina/gruesa estudiada para cumplir con las exigencias de la norma UNIT 82:1951, la mezcla 20/80 fue la utilizada.

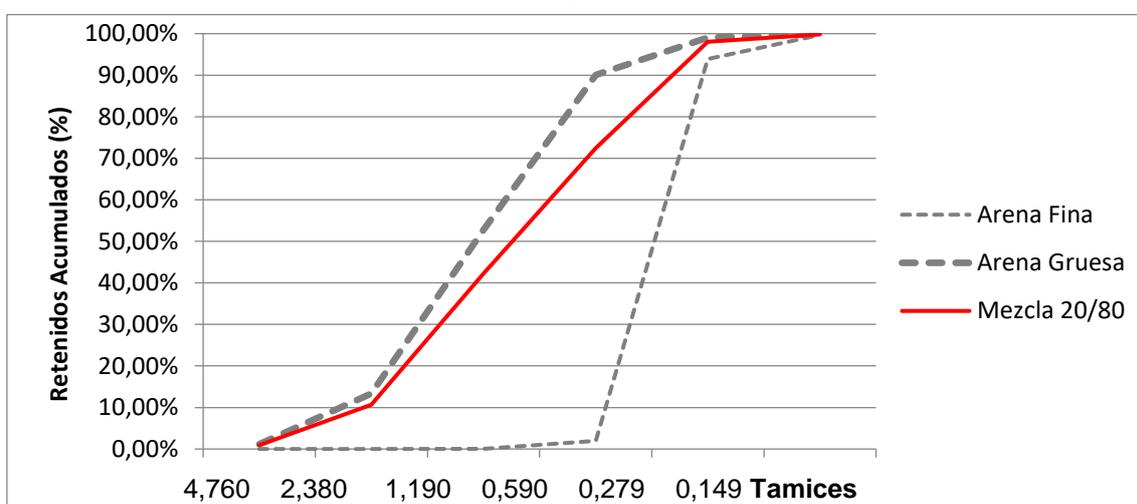
Tabla 3.1 - Densidad, Peso Específico y Absorción de los Agregados.

(Fuente: Rodríguez et al., 2015)

AGREGADO	DENSIDAD (Kg/m ³)	P.E. (g/cm ³)	ABSORCION (%)
Arena fina	1350	2,66	0,6
Arena gruesa	1340	2,66	0,6
Gravillín	1390	2,59	0,8
Pedregullo	1420	2,59	0,8

Figura 3.2 - Curva granulométrica de áridos finos.

(Fuente: Rodríguez et al. 2015)



3.2.1.3- Agregado tipo filler.

A los efectos de conseguir la autocompactabilidad en el HAC es necesario emplear agregado muy fino tipo filler, en esta tesis como filler se utilizó polvo de electrofiltro (PEF), el cual es un residuo de la industria cementera nacional. En esta tesis el PEF es residuo de la fábrica del cemento gris empleado.

En la tabla 3.2 se presentan los datos obtenidos en el Instituto de Ensayo de Materiales por Rodríguez et al. (2015) para el estudio de las siguientes **propiedades físicas** del PEF: Densidad (UNIT-NM 23:2004), Superficie Específica Blaine (UNIT-NM 76:98), Índice de Actividad Puzolánica (UNIT 1035:1998), mientras que el Tamaño Medio de Partículas fue determinado por la Facultad de Química a través de Difracción de luz láser (equipo Coulter LS 230).

Tabla 3.2 - Propiedades físicas del PEF

(Fuente: Rodríguez et al., 2015)

PROPIEDAD	VALOR
Densidad (g/cm ³)	2,75
Finura Blaine (cm ² /g)	6863
Tamaño Medio de Partículas (µm)	6,297
Índice de Actividad Puzolánica (%)	56,7

Tabla 3.3 - Composición química del filler empleado PEF.

(Fuente: Rodríguez et al., 2015)

Composición química (%)	EDXRF	Análisis Tradicional	Unidades
SiO ₂	-----	11 ± 1	%
Al ₂ O ₃	2,3 ± 0,5	-----	%
Fe ₂ O ₃	1,6 ± 0,1	-----	%
MnO	282 ± 20	-----	µg/g
MgO	-----	1,9 ± 0,2	%
CaO	40 ± 4	42 ± 4	%
Na ₂ O	No detectado	-----	%
K ₂ O	<2	-----	%
SO ₃	3736(*)	-----	µg/g
P ₂ O ₅	<0,2	-----	%
Cl	<0,2	-----	%
Ti	996 ± 90	-----	µg/g
Cu	20,4 ± 2,0	-----	µg/g
Zn	37,8 ± 3,5	-----	µg/g
Pb	15,3 ± 1,5	-----	µg/g
Perdida a 105°C	-----	<0,2	%
Materia volátil (a 500°C)	-----	0,5 ± 0,1	%
Pérdida por calcinación (a 1000°C)	-----	34 ± 1	%
Insolubles en ácido	-----	18,3 ± 0,5	%

(*) Valor informativo.

En la tabla 3.3 se presentan los resultados de la composición química del PEF, la que fue realizada en el MIEM mediante fluorescencia de rayos X dispersiva en energía (EDXRF) y análisis tradicional.

3.2.2- Aditivo Super-plastificante

El aditivo utilizado fue el VISCOCRETE 6 de SIKA, es un super fluidificante, es un aditivo de alta capacidad de reducción de agua con un contenido de sólidos de 35%, su densidad es de 1.08 kg/l de acuerdo a datos suministrados por el fabricante, y según resultados obtenidos en el Proyecto CSIC I+D 259 presenta el menor punto de saturación (1%) con el cemento CPN 40 (Rodríguez de Sensale et al., 2015) es decir que requiere de una menor dosis en relación a los otros aditivos,.

3.2.3- Cemento

Los datos que figuran a continuación fueron proporcionados por las fábricas correspondientes, fábrica de Cemento Portland Blanco CIMSA de Turquía y fábrica de Cemento Portland Gris, Cementos Artigas de Uruguay.

3.2.3.1- *Cemento Portland Gris.*

En cuanto al cemento utilizado fue un Cemento Portland Normal (CPN40) de la empresa Cementos Artigas, cuyas características se presentan en las Tablas 3.4, 3.5, 3.6 y 3.7, que se presentan a continuación.

Se toman los datos obtenidos en el Instituto de Ensayo de Materiales (IEM – Facultad de Ingeniería – UdelaR) relativos a las propiedades físicas del cemento gris: densidad (UNIT-NM 23:2004), superficie específica Blaine (UNIT-NM 76:98), agua requerida para consistencia normal (UNIT-NM 43:2004), tiempo de fraguado inicial y final (UNIT-NM 65:2004) correspondientes al cemento gris empleado en esta Tesis. En la Tabla 3.5 se presentan los resultados de las propiedades mecánicas obtenidas en el IEM para el cemento gris (UNIT-ISO 679:09). En la Tabla 3.6 se presenta su composición química que fue realizada en el MIEM mediante fluorescencia de rayos X dispersiva en energía (EDXRF) y análisis tradicional. En la Tabla 3.7 se observan los resultados obtenidos de su composición mineralógica, obtenida mediante la aplicación de las ecuaciones de Bogue.

3.2.3.2- Cemento Portland Blanco.

En cuanto al cemento blanco utilizado fue un Cemento Portland Blanco (CEM I 52,5R) de la empresa CIMSA, cuyas características se presentan en las Tablas 3.4, 3.5, 3.6 y 3.7, que se presentan a continuación a modo comparativo con los datos del CPN 40 gris. Los datos del cemento blanco que figuran en las tablas 3.4, 3.5 y 3.6 fueron suministrados por el fabricante.

Tabla 3.4 - Propiedades físicas del CPN40 y del CEM I 52,5R.

(Fuente: Cementos CIMSA y Cementos ARTIGAS)

TIPO DE CEMENTO	CPN40	CEM I 52,5R
Propiedad	Valor	Valor
Densidad (g/cm ³)	3,07	3,02
Finura Blaine (cm ² /g)	2490	4830
Agua para consistencia normal (%)	28,9	30,4
Tiempo de fraguado inicial (min)	245	110
Tiempo de fraguado final (min)	325	130

Tabla 3.5 - Propiedades mecánicas del CPN40 y del CEM I 52,5R.

(Fuente: Cementos CIMSA y Cementos ARTIGAS)

TIPO DE CEMENTO	CPN40		CEM I 52,5R
Edad:	Resistencia a Compresión (MPa)	Resistencia a Flexión (MPa)	Resistencia a Compresión (MPa)
2 días (MPa)	19,2	4,67	37
7 días (MPa)	32,7	5,58	-----
28 días (MPa)	40,8	7,72	60

Tabla 3.6 - Composición química del CPN40 y del CEM I 52,5 R.

(Fuente: Cementos CIMSA y Cementos ARTIGAS)

TIPO DE CEMENTO	CPN40			CEM I 52,5R			
	Composición química (%)	EDXRF	Análisis Tradicional	U.	XRF	Análisis Tradicional	U.
SiO ₂	19 ± 2	-----		%	21,36	-----	%
Al ₂ O ₃	< 2	-----		%	4,07	-----	%
Fe ₂ O ₃	1,9 ± 0,2	-----		%	0,3	-----	%
MnO	351 ± 35	-----		µg/g			
MgO	-----	3,1 ± 0,9		%	0,79	-----	%
CaO	55,2 ± 5,0	55,1 ± 2,8		%	65,38	-----	%
Na ₂ O	-----	0,22 ± 0,05		%	0,08	-----	%
K ₂ O	1,2 ± 0,1	1,24 ± 0,05		%	0,58	-----	%
SO ₃	2,5(*)	-----		%	3,42	-----	%
P ₂ O ₅	< 2	-----		%	-----	-----	-----
Cl	0,15	-----		%	-----	0,009	%
Ti	1077 ± 105	-----		µg/g	-----	-----	-----
Cu	7,2 ± 0,5	-----		µg/g	-----	-----	-----
Zn	46,5 ± 4,5	-----		µg/g	-----	-----	-----
Pb	17,2 ± 1,5	-----		µg/g	-----	-----	-----
Perdida a 105°C	-----	0,6 ± 0,1		%	-----	-----	-----
Materia volátil (a 500°C)	-----	0,7 ± 0,1		%	-----	-----	-----
Perdida por calcinación (a 1000°C)	-----	4,6 ± 0,4		%	-----	3,34	%

(*) Valor sin incertidumbre sólo a nivel informativo

Tabla 3.7 - Composición mineralógica del clinker para ambos cementos.
 (Fuente: elaboración propia en base a cálculos realizados con ecuaciones de BOGUE)

COMPUESTO	CPN40	CEM I 52,5R
	%	%
C ₃ S	57,04	66,31
C ₂ S	11,44	11,22
C ₃ A	2,09	10,28
C ₄ AF	5,78	0,91

*calculada en base a datos de tabla anterior mediante ecuaciones de BOGUE.

3.2.4- Pigmentos

Los pigmentos utilizados en esta tesis son pigmentos inorgánicos producidos para la elaboración de pinturas, cuyas características químicas se expresan en la tabla 3.8, y se presentan en envase metálico con tapa a presión, como las normalmente utilizadas en la industria de las pinturas, de ¼ litro de capacidad cada una, ya que se encuentran en solución acuosa.

La tabla 3.8 es comparativa de valores de componentes químicos principales de los diferentes pigmentos utilizados, obtenidos de informes suministrados por parte de la empresa INCA, anexados como documentación adicional en el ANEXO D.

Se destaca que el pigmento amarillo es denominado por INCA como Naranja, pero a los efectos del presente trabajo y de acuerdo a lo que se aprecia a simple vista es denominado amarillo.

Tabla 3.8 – Componentes de los diferentes pigmentos.

(Fuente: elaboración propia en base a Tablas proporcionadas por Inca, ver anexo).

PIGMENTO	AZUL	ROJO	NARANJA (AMARILLO)	CAS
NOMBRE DEL INGREDIENTE	%	%	%	Número CAS
ETILENGLICOL	10 - < 25	25 - < 50	10 - < 25	107-21-1
CAOLÍN	25 - < 50	10 - < 25		1332-58-7
Nonilfenol polietilenglicol éter	2,5 - < 10	2,5 - < 10	2,5 - < 10	127087-87-0
1-METIL-2-PIRROLIDONA	1 - < 2,5	-		872-50-4
2,2', 2''-(HEXAHIDRO-1, 3, 5-triil) trietanol	0 - < 1	0 - < 1	0 - < 1	4719-04-4
Talco sin contenido de fibras asbestiformes		2,5 - < 10		14807-96-6
2,4,7,9-tetrametildec-5-ino-4,7-diol		0 - < 1		126-86-3
Glicerina			1 - < 2,5	56-81-5
DIÓXIDO DE TITANIO (como Ti)			1 - < 2,5	13463-67-7
Baritina - Sulfato de bario			1 - < 2,5	7727-43-7

El número CAS es una identificación numérica única, un registro para compuestos químicos, polímeros, secuencias biológicas, preparados y aleaciones. La sigla CAS es una abreviatura de Chemical Abstracts Service, que es una división de la Sociedad Americana de Química, la que asigna identificadores a cada compuesto químico. Con estos números se puede saber directamente de que compuesto se está hablando.

Los números de registro CAS no son códigos que conlleven un sentido numérico en sí mismos por los cuales se puedan presumir ciertas características, sino que se asignan en orden secuencial e incremental cuando la sustancia se identifica por los científicos que trabajan en el CAS para su inclusión en la base de datos del registro CAS, por lo tanto, los números con menor cantidad de cifras corresponden a componentes listados, cronológicamente hablando, anteriormente a los que tienen mayor cantidad.

En síntesis, con el número CAS se puede determinar el compuesto al que corresponde.

Se aclara que se han utilizado este tipo de pigmentos ya que son más accesibles en el mercado nacional, el uso de este tipo de material es muy limitado por lo que hace poco atractivo a las empresas que comercializan este tipo de material el importarlo para su comercialización, incluso al momento de obtener los valores que se detallan a continuación, las empresas que lo comercializan solicitaban plazo especial para importar lo que se les solicitaba.

Tabla 3.9 – Precios de pigmento.

(Fuente: elaboración propia en base a datos de Bayferrox Uruguay, Punto Color Pinturas, Miguel y Carlos Russo respectivamente)

PRODUCTO	COLOR	PRECIO POR kg. En USD
Bayferrox®	Amarillos	2,19
	Rojos	2,60
	Verdes	12,78
	Negro	1,95
	Azul	no se importa a UY
Pigmentos INCA utilizados	Amarillo	1,39
	Rojo	2,09
	Azul	2,00
Pigmentos Miguel y Carlos Russo	Rojo	6,56
(rojo y amarillo AMAS China)	Amarillo	6,56
(azul FULL BLACK Argentina)	Azul	14,80
*Los precios corresponden al peso del producto listo para su uso.		

*los valores corresponden al año 2017.

3.3- Dosificación

Para la dosificación, se toma lo desarrollado por Rodríguez et al. (2015). Para los estudios con Cemento Blanco CIMSA de Turquía, se utiliza la misma dosificación en peso que la que figura para el cemento portland gris de Cementos Artigas calculada en la dosificación original.

Para el cálculo de la dosificación del pigmento, se lo calcula en base a un porcentaje del mismo en relación a la dosificación en peso de los materiales finos que se utilicen en la mezcla, que en nuestro caso son el cemento portland y el PEF (Polvo de Electrofiltro). El material que se estudia agrega la variable color, se entiende que a mayor cantidad de pigmento más intenso será el color resultante. Por ejemplo, el amarillo inicia en un color pálido y se intensifica hasta obtener un color mostaza, el rojo a bajos porcentajes se visualiza desde un color rosado hasta un terracota intenso a mayor porcentaje de concentración de pigmento.

En el caso de estudio que es motivo del presente trabajo, lo que se utiliza es una cantidad de pigmento uniforme para todos los colores que se estudian y en virtud de los porcentajes que recomiendan las empresas productoras de pigmentos para hormigones (por ejemplo, BAYFERROX) para sus productos se fijó un porcentaje de 3% de pigmento en relación a la suma de la dosificación de cemento más polvo de electrofiltro (o sea los finos del HAC).

En relación al esqueleto granular utilizado, ya fueron detalladas en el punto 3.3.1 las características de los agregados, a los efectos de la elaboración de los HAC y HACC utilizados, las proporciones de cada uno de estos agregados y la combinación final adoptada de agregados es de 40% Agregado Grueso y 60% Agregado Fino.

En relación a los porcentajes de A/F y la relación A/C utilizadas, el porcentaje de volumen de pasta es de 40%, la relación A/F utilizada fue de 0.40 y la relación A/C de 0.50.

En la tabla 3.10 se expresa la dosificación en peso de cada uno de los componentes, diferenciando los hormigones con y sin pigmento, donde se puede notar que la única diferencia entre las mencionadas mezclas radica en el peso de PEF y en el Pigmento.

Tabla 3.10 – Dosificación en kg/m³.

(Fuente: elaboración propia en base a dosificación utilizada)

MATERIAL	SIN PIGMENTO	CON PIGMENTO
AGUA	178,00	178,00
SIKA VISCOCRETE 6	9,743	9,743
CEMENTO (GRIS/BLANCO)	445,50	445,50
PEF	111,38	94,68
ARENA FINA	196,80	196,80
ARENA GRUESA	787,30	787,30
GRAVILLIN	253,40	253,40
PEDREGULLO	380,10	380,10
PIGMENTO	-	16,70

3.4- Métodos

3.4.1- Equipos Utilizados

Para el trabajo experimental se utilizaron los equipos y materiales disponibles en los laboratorios siguientes:

- Laboratorio del Instituto de la Construcción (IC) – Facultad de Arquitectura (UdelaR) – ensayo a tracción y compresión de probetas.
- Laboratorio del Instituto de Ensayo de Materiales (IEM) – Facultad de Ingeniería (UdelaR) – ensayo en cámara UV.
- Laboratorio de Punto Color Pinturas – Medición con Colorímetro.
- Laboratorio empresa constructora S.L.B. S.A. – ensayos en estado fresco.

3.4.1.1- Equipo de mezclado para hormigón.

El equipo utilizado para mezclado del hormigón es propiedad de la empresa SLB SA, marca COLLOMIX modelo Xo 55 DUO, cuenta con dos paletas para mezclado, tiene una potencia de 1.9 hp, su velocidad de rotación es variable y se ajusta de acuerdo a lo

que desee el operador del equipo y varía de 0 a 430 rpm, es capaz de mezclar un volumen máximo de material de 91 litros.

3.4.1.2- Balanza para materiales.

La balanza utilizada fue de marca UFESA modelo BC1500, con una precisión de +- 1 gramo, su fuente de alimentación es por pilas y la carga máxima es de 5000 gramos.

3.4.1.3- Prensa para ensayos de compresión y tracción.

Los ensayos de compresión de probetas cilíndricas y tracción de probetas prismáticas fueron realizados en el laboratorio del Instituto de la Construcción de la Facultad de Arquitectura de la UdelaR.

El equipo utilizado marca CONTROLS, se aprecia en figura 3.3, cuenta con dos bastidores, un bastidor para ensayos de compresión con una capacidad máxima de 2000 kN y otro bastidor para ensayos de flexión con una capacidad máxima de 100 kN. Los accesorios utilizados para el ensayo de pequeñas probetas son un dispositivo de prueba de flexión para prismas de mortero 40x40x160 mm, conforme a EN 196-1 y un dispositivo de compresión para probar porciones de prismas 40x40x160 rotos en flexión según EN 196-1.

Sus características principales son la ejecución automática de ensayos de tracción por compresión, flexión e indirecta, así como ciclos de prueba para determinar el Módulo Elástico. Posee un sistema de control dual a través de pantalla del PC y Software multilingüe con facilidad para introducir texto definido por el usuario.

Como grupo hidráulico posee una bomba de dos etapas, 700 bar máx. de presión, 2 salidas hidráulicas extensibles a 4 con los accesorios 50-C7022 / UP1 y / UP2, servo control para control de carga con válvula proporcional.

Como interfaz con el usuario, el sistema se controla a través del PC. Su software está diseñado para el control remoto de la máquina en toda la prueba conforme a las normas de referencia, permite la ejecución, utilizando el marco de ensayo y los accesorios adecuados, de las siguientes pruebas y normas pertinentes:

- Ensayo de compresión: EN 12390-3, EN 196, ASTM C39, ASTM C109, ASTM C349, AASHTO T22
- Ensayo de flexión: EN 1339, EN 1340, EN 12390-5, ASTM C78, ASTM C293, AASHTO T97
- Ensayo de tracción por fracturación: EN 1338, EN 12390-6, ASTM C496
- Módulo elástico de hormigón: ASTM C469, ISO 6784, DIN 1048, BS 1881: 121, UNI 6556, EN 12390-xx, EN 13412, EN 13286: 43



Figura 3.3 – Prensa Controls.

(Fuente: elaboración propia en base a imágenes capturadas)

3.4.1.4- Cámara UV.

El equipo utilizado para el ensayo UV, se aprecia en figura 3.4, es un equipo propiedad del laboratorio de ensayo de materiales de la Facultad de Ingeniería de la UdelaR, equipo para exposición de elementos a los rayos UV marca Dr. Hönle modelo SUN 2.

Se han aplicado las normas para estudios de exposición a radiación solar ISO 877-1, ISO 877-2 e ISO 877-3. Estas normas están diseñadas para plásticos

fundamentalmente, pero se tomaron los conceptos generales para hacerlas aplicables al estudio de exposición a radiación solar de las probetas de hormigón.



Figura 3.4 – Cámara UV.

(Fuente: elaboración propia en base a imágenes capturadas)

3.4.1.5- Espectrofotómetro.

Si bien existen normas para el análisis de la estabilidad del color en hormigones coloreados (EN12878), se plantea en esta investigación, el uso de espectrofotómetro para medir las diversas probetas de mortero antes y después de colocarlas en cámara de UV.

Con respecto al espectrofotómetro utilizado es X-RITE CAPSURE modelo RM200 (número de serie 0010045162), que se puede apreciar en la figura 3.5.

El mismo da una lectura de color en valores L^* a^* y b^* , pero también nos indica el color al que corresponde la medición de la carta de colores de INCA (que fue la marca de los pigmentos utilizados). En la Tabla 3.11 se pueden apreciar sus datos técnicos básicos.



Figura 3.5 – Espectrofotómetro X-RITE CAPSURE.
 (Fuente: elaboración propia en base a imágenes capturadas)

Tabla 3.11 – Datos básicos del espectrofotómetro X-RITE CAPSURE RM200.
 (Fuente: Elaboración propia obtenido del catálogo del producto, ver anexos)

Colores de iluminación:	25 LED (8 x visible wavelengths, 1 x UV)
Tamaño del área de iluminación:	9mm
Duración del ciclo de la medición:	1.8 Seconds
Zona de medición:	8mm
Tiempo de medición:	1.8 Seconds
Analizador de espectro:	Monochrome camera
Apertura:	9mm
Peso:	165 grams
Interfaz de comunicación:	USB or USB & Bluetooth
Pantalla del instrumento:	45mm Color TFT

3.4.2 – Elaboración de pastones, probetas y ensayos

3.4.2.1- Elaboración de pastones.

Fueron elaborados pastones con el siguiente orden de trabajo:

- a- Pesar el material.

- b- Colocarlo en la mezcladora, elaborados en un balde de 20 lts. de capacidad siendo mezclados con la mezcladora para hormigones y morteros COLLOMIX modelo Xo 55 DUO cuyas características se detallan en el punto 3.5.1.1, en laboratorio cerrado.

El orden de colocación de componentes en la mezcladora fue el siguiente:

- 1- Árido grueso pedregullo.
- 2- Árido grueso gravillín.
- 3- Árido fino arena gruesa.
- 4- Árido fino arena fina.
- 5- Cemento.
- 6- PEF.
- 7- Pigmento.
- 8- 80% del volumen total de agua con plastificante.
- 9- Resto del agua.

A medida que se incorporan los diferentes materiales se mezcla, luego de transcurrido el tiempo de mezclado (3 minutos), se realiza el ensayo correspondiente al escurrimiento con el cono de Abrams y el ensayo del anillo J; luego se procede al llenado de los diferentes moldes para los posteriores ensayos en estado endurecido, parte del procedimiento se puede apreciar en la figura 3.6.



Figura 3.6 – Moldes empleados para realización de probetas.
(Fuente: elaboración propia en base a imágenes capturadas)

3.4.2.2- Ensayos en estado fresco.

De acuerdo a lo expresado por Neville (2012) existen tres características principales a considerar para que el hormigón sea clasificado con una capacidad de auto-compactación, debe ser fluido, debe pasar por armaduras estrechamente espaciadas y debe tener resistencia a la segregación. Se han propuesto varios ensayos para cada una de las tres propiedades. En 2010, se publicaron cinco normas BS EN con la designación BS EN 12350:2010, en la parte 8, se analiza el ensayo de escurrimiento (slump flow), en la parte 9 la prueba de embudo en V, la parte 10 la prueba de caja L, prueba de segregación de tamiz en la parte 11 y en la parte 12, la prueba de anillo J (anillo japonés). En esta Tesis para evaluar al HACC en estado fresco se realizaron dos ensayos: el ensayo de escurrimiento, que permite evaluar la fluidez y segregación, y el anillo J que posibilita además visualizar el pasaje entre armaduras.

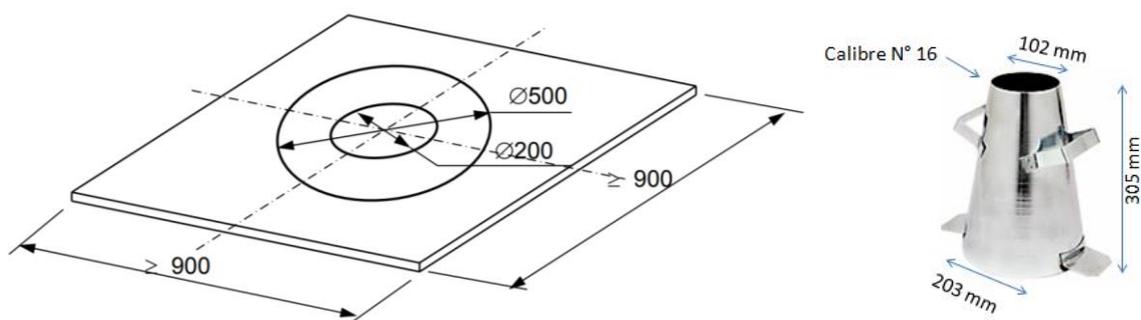
Como se expresa en puntos anteriores, se ejecutaron 8 mezclas diferentes de HAC y de HACC con la dosificación expresada en la tabla 3.9, realizándose los siguientes ensayos en estado fresco:

3.4.2.2.1 - ENSAYO DE ESCURRIMIENTO (norma BS EN12350-8:2010).

El procedimiento establecido por la norma de escurrimiento BS EN 12350-8:2010 indica una secuencia establecida de pasos a seguir muy específica que se describe a continuación.

Figura 3.7 – Placa de base y cono de Abrams.

(Fuente: elaboración propia en base a norma BS EN 12350-8:2010)



El procedimiento para realizar el ensayo es el siguiente, se prepara el cono de Abrams normalizado y la placa base como se describe en la figura 3.7 y se aprecia en la figura 3.8. Se coloca el cono coincidiendo con el círculo de 200 mm en la placa base y se mantiene en posición apoyándolo sobre las piezas del pie, asegurándose de que no se pueda filtrar el hormigón debajo del cono. Se llena el cono sin ninguna agitación y se retira el excedente de la tapa del cono, el cono lleno no debe permanecer durante más de 30s; durante este tiempo se retira cualquier resto de hormigón derramado en la placa de base y se asegura que la placa base esté húmeda por todas partes, pero sin ningún exceso de agua. Se levanta el cono verticalmente en un movimiento sin interferir con el flujo de hormigón. Para medir el tiempo T'_{50cm} , se arranca el cronómetro inmediatamente después de que el cono deje de estar en contacto con la placa de base y se registra el tiempo necesario para que el hormigón llegue al círculo de 50 cm en cualquier punto. Sin perturbar la placa de base o el hormigón, se mide el diámetro más grande de la extensión de flujo y se registra como diámetro medio a los 10 mm más cercanos. A continuación, se mide el diámetro del flujo de HAC distribuido en ángulos rectos como diámetro medio a los 10 mm más cercanos. Se comprueba la separación de hormigón para la segregación. La pasta / mortero de cemento puede separarse del agregado grueso para dar un anillo de pasta / mortero que se extiende varios milímetros más allá del agregado grueso. También se puede observar si hay agregado grueso

segregado en el área central, informando si la segregación ha ocurrido o no. Este ensayo además de revelar el comportamiento del material, revela la trabajabilidad y la cohesión del mismo, por lo que se puede observar si el material se segrega o no. Luego se calcula el promedio de los diámetros obtenidos y se registra el valor en la planilla de control.



Figura 3.8- Ensayo escurrimiento con cono de Abrams.
(Fuente: elaboración propia en base a imágenes capturadas)

3.4.2.2.2 - ANILLO J (o anillo japonés).

De acuerdo a la norma BS EN 12350-12:2010, este método de ensayo proporciona un procedimiento para determinar la capacidad de paso del hormigón autocompactante y el procedimiento detallado para efectuar el ensayo consiste en realizar la prueba en la placa descrita en el ensayo de escurrimiento, nivelada, con el cono de Abrams y el anillo J como se describe en la figura 3.9 y 3.10.

Figura 3.9 – Diseño del anillo J

(Fuente: elaboración propia en base a norma BS EN 12350-12:2010)

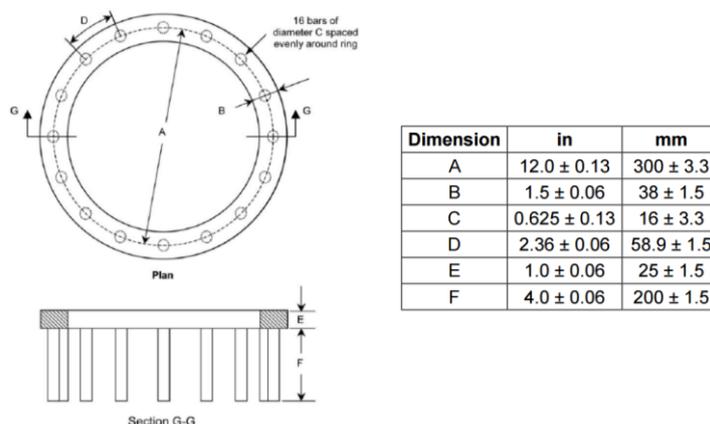


Figura 3.10 – Ensayo anillo J.

(Fuente: elaboración propia en base a imágenes capturadas)



Se coloca y calza la placa base de modo que quede totalmente apoyada y nivelada. Se pre-humedece la placa base con una toalla húmeda, trapo o esponja. Se coloca el anillo en J en el centro de la placa base, se humedece el cono de Abrams y se coloca en la placa base con la abertura más pequeña hacia abajo y concéntrica con el anillo J.

Se llena el molde con el HAC usando múltiples cucharadas o vertiendo de un cubo o un envase. Se monta el HAC por encima de la parte superior del molde y se ajusta con un movimiento de aserrado de la barra de separación para ajustar a la superficie. Se retira el hormigón sobrante de la zona que rodea el molde para evitar interferencias con el movimiento del hormigón que fluye. Se levanta el molde a una distancia de 9 ± 3 in (230 ± 75 mm) en 3 ± 1 s mediante una elevación vertical constante sin movimientos laterales o de torsión. Se debe completar todo el procedimiento desde el inicio del llenado hasta la eliminación del molde sin interrupción dentro de un tiempo transcurrido de $2\frac{1}{2}$ min.

Se espera a que el hormigón deje de fluir y luego se mide el diámetro más grande (d_1) del flujo circular resultante de hormigón y se mide el segundo diámetro (d_2) del flujo circular aproximadamente perpendicular al primer diámetro medido (d_1). Se determina el flujo del anillo J promediando los diámetros obtenidos $D_j = (d_1 + d_2) / 2$. Además, se mide la altura desde el anillo hasta la mezcla, midiendo al interior y al exterior del anillo.

Este ensayo se realiza junto a la prueba de escurrimiento sin el anillo en J de acuerdo con lo expresado en el punto anterior. Las pruebas con y sin el J-Ring deben completarse dentro de los 6 min., los valores de diámetro promedio de ambos ensayos se comparan para obtener conclusiones sobre la capacidad de paso entre armaduras por ejemplo (ver punto 4.1).

3.4.2.3- Ensayos en estado endurecido.

Para poder efectuar los ensayos que se consideraron como los más relevantes para el desarrollo de la presente tesis, se planificó la ejecución de probetas cilíndricas, prismáticas y cúbicas de acuerdo a medidas expresadas en la tabla 3.12.

Se ejecutaron los diferentes tipos de tamaños de probetas de acuerdo a los ensayos a efectuar, que se describen a continuación:

Tabla 3.12 – Dimensiones de probetas.

(Fuente: elaboración propia)

FORMA	DIMENSIONES (mm)			ENSAYO A REALIZAR
Cilíndrica		diámetro	alto	compresión
		100	200	
Prismática	largo	ancho	alto	tracción y compresión
	40	40	160	
Cúbica	50	50	50	estabilidad de color

Cabe observar que, para la realización de las probetas prismáticas y cúbicas, fue necesario retirar el agregado grueso de los pastones realizados.

Para mantener un orden de trabajo a las diferentes probetas se les designó un código de acuerdo a las características principales de la mezcla con la que se elaboró cada una de acuerdo a lo establecido en la tabla 3.13.

Tabla 3.13 – Código de las probetas.

(Fuente: elaboración propia)

N.º	CÓDIGO	TIPO DE MEZCLA		
		TIPO	PIGMENTO	CEMENTO
1	RHA	HACC	rojo	blanco
2	RCB	HACC	rojo	gris
3	AZA	HACC	azul	blanco
4	AZB	HACC	azul	gris
5	AHA	HACC	amarillo	blanco
6	AHB	HACC	amarillo	gris
7	HACB	HAC	----	blanco
8	HAC	HAC	----	gris

3.4.2.3.1 - Moldeo y curado de las probetas

Para el moldeo y curado de las diferentes probetas se aplicó la norma UNIT 1081:2002 que describe los procedimientos, la preparación y el curado de las mismas. Entre los aspectos más importantes la norma prescribe el procedimiento para la preparación y el curado de las probetas de hormigón. Además, se utilizó la norma UNIT ISO 679:2009 que establece que los moldes prismáticos de 40x40x160mm deben conservarse en molde por 24 hs. y luego del desmoldeo se sumergen en agua hasta el momento del ensayo.

De acuerdo a la norma, las probetas se mantuvieron en agua hasta una hora antes de la edad de ensayo de las mismas.

Para el proceso de ejecución de hormigones se coordinaron los hormigonados en el laboratorio de la empresa constructora SLB S.A. donde fueron llevados todos los materiales previamente caracterizados por el laboratorio del Instituto de Ensayo de Materiales de la Facultad de Ingeniería. Es de destacar que previo a la ejecución de estos hormigones se ejecutó un hormigonado de prueba con cemento portland blanco sin aditivos en el laboratorio del Instituto de la Construcción de la Facultad de Arquitectura bajo la supervisión de la tutora de la presente tesis, la Arq. Gemma

Rodríguez, donde se verificó que la dosificación no presentaría problemas, ya que los ensayos fueron acordes a los valores de referencia para hormigones autocompactantes de este tipo. En la figura 3.11 se aprecian los moldes empleados para las probetas a ser utilizadas en los ensayos en estado endurecido con los diferentes hormigones con pigmentos.

Figura 3.11 – Moldes empleados para los ensayos en estado endurecido.
(Fuente: elaboración propia en base a imágenes capturadas)



3.4.2.3.2 – Ensayo a compresión y tracción.

Los ensayos de resistencia a compresión y flexión se realizaron en todas las probetas en el laboratorio de la Facultad de Arquitectura de la UdelaR con el equipo descrito en el punto 3.5.1.3. El equipo en el que fueron efectuados los ensayos (ver 3.5.1.3) cuenta con 2 canales, en el canal 1 se conecta la prensa de mayor capacidad, en la que se efectuaron los ensayos a compresión de las probetas cilíndricas y de las mitades de las probetas prismáticas, y en el canal 2 se efectuaron los ensayos a flexión de las probetas prismáticas.

De acuerdo a lo planificado se ensayaron las probetas cilíndricas a compresión, para este ensayo se aplicó la norma UNIT NM 101:98 la que regula el ensayo a compresión

de probetas cilíndricas, además de la norma UNIT 1090:2004 que establece el método para el uso de encabezado de placas de elastómeros en la determinación de la resistencia a la compresión de probetas cilíndricas de hormigón endurecido. Se efectuaron los ensayos a compresión, de acuerdo a las normas descriptas, de las probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro por 20 cm de alto, las que fueron encabezadas con elastómeros cumpliendo con la norma UNIT 1090:2004 ya que los ensayos nunca tuvieron valores inferiores a los 10 MPa ni superiores a los 85 MPa, y los mismos no superaban los 50 usos, que es lo que define la norma en su Tabla 1. En la figura 3.12 se aprecia el resultado de una rotura de probeta cilíndrica de HACC con pigmento rojo.

Figura 3.12 – Rotura de probeta cilíndrica HACC rojo
(Fuente: elaboración propia en base a imágenes capturadas)



El canal utilizado fue el 1 y las características establecidas en la prensa fueron de acuerdo a la norma UNIT NM 101:98 donde se estableció una velocidad de ensayo de 2400 ± 200 N/s con pico de sensibilidad en 5KN.

Por otra parte, fueron ensayadas las probetas prismáticas, a flexión primero en el canal 1, de acuerdo a figura 3.13, y las mitades obtenidas a compresión en el canal 2 como se aprecia en la figura 3.14, todo de acuerdo a la norma UNIT ISO 679:2009 para determinación de resistencias mecánicas a compresión y opcionalmente a flexión de probetas prismáticas de 40x40x160mm. Para estos ensayos se establecieron los

parámetros de velocidad de ensayo de 50N/s con pico de sensibilidad de 0.5KN de acuerdo a norma.

Figura 3.13 – Ensayo a flexión de probeta prismática.
(Fuente: elaboración propia en base a imágenes capturadas)



Figura 3.14 – Ensayo a compresión de mitad de probeta prismática
(Fuente: elaboración propia en base a imágenes capturadas)



3.4.3- Medición del color.

3.4.3.1- Introducción.

Luego de efectuados los correspondientes ensayos a las diferentes muestras a tracción y compresión, fueron aplicados ensayos relativos a la estabilidad del color, para lo que se utilizó una cámara de ensayo UV perteneciente al laboratorio del Instituto de Ensayo de Materiales de la Facultad de Ingeniería de la UdelaR, descrita en el punto 3.5.1.4.

Para el procedimiento de ensayo en cámara UV, fueron realizadas muestras cubicas de los diferentes hormigones (todas ellas con el mismo material que las demás probetas al que se le retiró el agregado más grueso) efectuadas de tamaño 50x50x50 mm.

El procedimiento consistió en colocar las probetas cúbicas en la cámara de ensayo UV, preferentemente los días lunes, siendo retiradas los días viernes de la semana en cuestión, efectuando la medición con el colorímetro al retirar las mismas de la máquina, sumando así un total de 1363 horas en cámara, por lo que las mediciones eran tomadas cada 100 horas en cámara aproximadamente. Se optó por analizar esta cantidad de horas, ya que es la misma cantidad de horas que lo analizado por Positieri (2005).

Como esta cámara implica exponer a las muestras a los rayos UV lo que se pretende analizar es el desgaste del HACC frente a la exposición prolongada a este tipo de rayos presentes en el medio ambiente donde suelen estar expuestos este tipo de materiales, y analizar el progresivo desgaste del color a la que normalmente se expone.

3.4.3.2- Procedimiento del ensayo.

Normalmente, en el equipo utilizado, se ensayan materiales plásticos, las normas de referencia utilizadas son para el análisis de este tipo de materiales, pero igualmente se tomaron como referencia.

Las normas aplicadas fueron la ISO 877-1, la ISO 877-2 y la norma ISO 877-3.

Como procedimiento se rociaban las muestras con agua, luego se colocaban en la máquina como se aprecia en la figura 3.15, luego de transcurrido el tiempo promedio de

90 a 100 horas se retiraban, se trasladaban a la pinturería donde se efectuaba la medición de las mismas con el colorímetro (este se calibraba antes de la toma de las medidas cerrando su tapa posterior y presionando el botón de captura) y luego se rociaban con agua de nuevo para retornarlas a la cámara UV y comenzar nuevamente el proceso hasta la obtención de las 1363 horas finales.

Figura 3.15 – Ensayo en cámara UV.

(Fuente: elaboración propia en base a imágenes capturadas)



3.4.3.3 - Detalles de la medición de color.

Obviamente que el color de coordenadas CIE L^* a^* y b^* obtenido, es una lectura exacta del color en un centímetro cuadrado aproximado de la muestra tomada, el colorímetro primeramente toma una medida promedio calculada en la superficie de captura de aproximadamente 1cm^2 que sería lo más próximo a lo registrado por el ojo humano, la validación que hace el colorímetro es indicando un color de la carta de colores de INCA, dicho color se busca en la carta convencional y es comparado con la muestra para validar la misma.

Todas las características técnicas del equipo fueron descritas en el punto 3.5.1.5.

Si se observa a simple vista la muestra de la cual se toma la captura para determinar el color, CIE L*a*b* (2000), se puede verificar que posee muchas variaciones del color, ya que por ser el HACC, un hormigón arquitectónico conformado por diferentes materiales, se tienen diferentes colores a nivel de píxeles considerando la superficie aproximada de captura de 1cm². Lo que en definitiva mide el equipo es el color que puede apreciar el ojo humano a nivel global de la pieza donde los diferentes colores a nivel de píxel, se equiparan a un color global que se obtiene con la medición y cálculo para su representación en una carta de colores. Ver figura 3.16, medición del color.

Si bien el presente trabajo se interesa en la imagen final de una pieza arquitectónica elaborada con HACC, y por lo tanto de su variación de color a nivel global que es lo que determina el estudio realizado, también se incluye en el presente trabajo, la evolución de la modificación del color a lo largo de las 1363 horas en períodos de aproximadamente 100 horas de promedio. Las tablas de toma de datos que se adjuntan en anexos expresan la evolución del color a lo largo de las 1363 horas en los períodos indicados en las mismas.

En definitiva, lo que más interesa a los efectos del presente trabajo es la variación de color a nivel del ojo humano a lo largo de las 1363 horas analizadas, es decir desde el punto de partida que es a los 28 días de edad del hormigón en la pieza que se elabora hasta transcurridas las 1363 horas en cámara UV.

Figura 3.16 – Medición del color.

(Fuente: elaboración propia en base a imágenes capturadas)



4- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de los experimentos enumerados en el capítulo 3, se discuten los mismos y se comparan los resultados obtenidos entre las diferentes muestras analizadas, que permiten establecer una discusión en relación a ellas.

4.1- Ensayos en estado fresco

Los resultados obtenidos directamente de los ensayos en estado fresco son expresados en tablas detalladas en ANEXO A, como resumen de datos obtenidos se puede observar la tabla 4.1 que expresa T'50cm y diámetro promedio para el ensayo de escurrimiento, el diámetro promedio obtenido del ensayo anillo J, como también el cumplimiento de capacidad de paso para el ensayo anillo J. Por lo tanto, se presenta la tabla 4.1 con el resumen de resultados obtenidos directamente de los ensayos y luego de la misma se presentan las diferentes gráficas (figura 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4) que resumen los datos que figuran en la misma y sobre las que se elaboran los diferentes comentarios al respecto.

4.1.1- Ensayo de escurrimiento.

Con el cono de Abrams se puede evaluar el escurrimiento y el T'50cm, es un ensayo que permite evaluar la fluidez en ausencia de obstrucciones lo cual es una indicación de la capacidad de llenado del HAC, siendo el T'50cm también una medida de la velocidad de flujo y por tanto de la viscosidad del HAC.

En el ensayo de escurrimiento realizado con el cono de Abrams, se observa tanto en las figuras 4.1 como en la 4.2 y en la tabla 4.2, que las mezclas analizadas poseen buena trabajabilidad, cohesión y fundamentalmente, asentamiento acorde a lo detallado para un HAC según la norma BS EN 12350:2010, lo cual se presenta en la tabla 4.2.

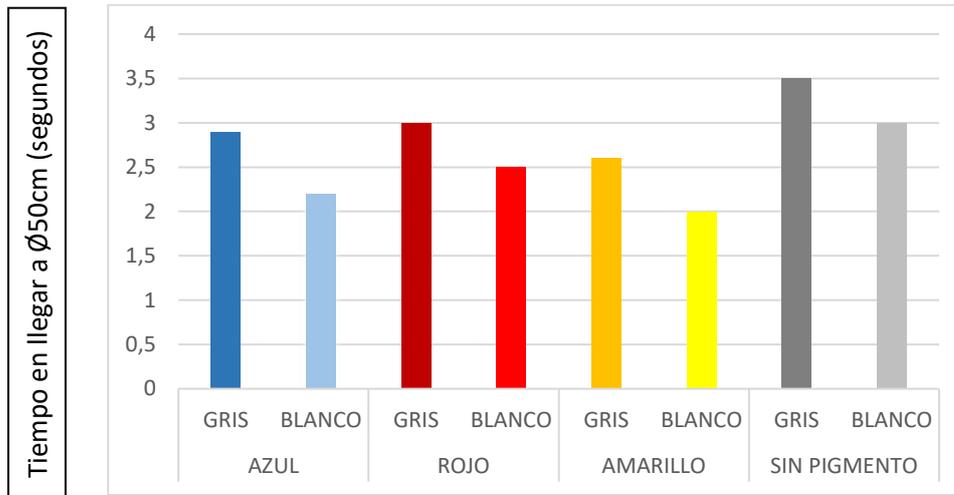
Tabla 4.1 – Resultados generales de ensayos en estado fresco.

(Fuente: elaboración propia en base a resultados obtenidos)

ENSAYOS EN ESTADO FRESCO												
PIGMENTO	AZUL		ROJO		AMARILLO		SIN PIGMENTO					
	GRIS	BLANCO	GRIS	BLANCO	GRIS	BLANCO	GRIS	BLANCO	GRIS	BLANCO		
ENSAYO DE ESCURRIMIENTO												
T' 50 (s.)	2,9	2,2	3	2,5	2,6	2	3,5	3				
Diámetro promedio (cm)	70,5	82	70,25	80,5	67,5	85	68,5	76,5				
ANILLO J												
Diámetro J promedio	68,5	81	67,25	76	65,25	81	64,5	72,5				
Cumplimiento $D_j \geq D-50mm$	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI				
FOTOS												

Figura 4.1 – T'50cm obtenido en ensayo de escurrimiento.

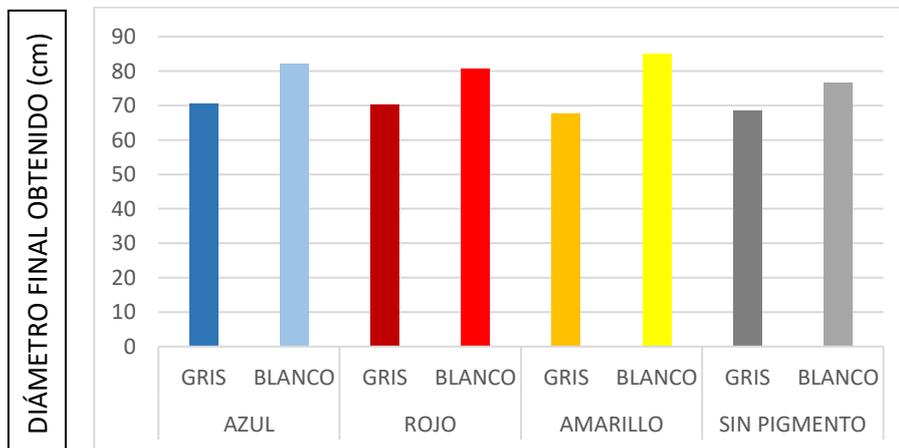
(Fuente: elaboración propia en base a resultados obtenidos)



En todos los casos los HAC y HACC con cemento gris mantuvieron menor diámetro final de asentamiento que en los casos con cemento blanco, en promedio el diámetro máximo alcanzado fue de unos 11,80 cm más para las mezclas con cemento blanco, estos resultados se expresan en la figura 4.2, mostrando coherencia entre los resultados obtenidos en el ensayo (T' 50 y diámetro de escurrimiento).

Figura 4.2 – Diámetro final obtenido en ensayo de escurrimiento (en cm).

(Fuente: elaboración propia en base a resultados obtenidos)



En términos generales, las mezclas con pigmento siempre mantuvieron mayor escurrimiento que las de referencia sin pigmentar (figura 4.2), siendo las que contenían pigmento amarillo, las de aspecto más fluido, pero siempre manteniendo la cohesión,

como se observa en la tabla 4.1 donde se muestra el aspecto de los diferentes pastones luego del ensayo de escurrimiento.

El tiempo en llegar a los 50 cm de diámetro (T'50cm) fue menor para los HAC y HACC con cemento blanco, en promedio los HAC y HACC con cemento gris tuvieron un T'50cm medio segundo mayor que los HAC y HACC con cemento blanco, esto se puede visualizar en la figura 4.1.

Si se hace referencia a la clasificación definida por la norma EN 206-1:2000, cuyos valores se expresan en la tabla 4.2, los resultados categorizan la mezcla con una fluidez SF3 y una clasificación de viscosidad VS2.

Tabla 4.2 – Clasificación de HAC en estado fresco
(Fuente: elaboración propia en base a norma EN 206-1:2000)

CLASE	ASENTAMIENTO EN mm	T' 50cm en segundos
SF1	550 a 650	
SF2	660 a 750	
SF3	760 a 850	
VS1		≤ 2
VS2		> 2

Con respecto a estos resultados cabe destacar que si los comparamos con los ensayos efectuados por Positieri (2005), estos muestran totalmente lo contrario, la autora expresa que los pastones con pigmento mostraron mayor cohesión, y expresa que esto se debe a que los pigmentos utilizados requieren variar la relación agua/cemento, en el caso de la presente tesis, esto no fue necesario ya que los pigmentos utilizados se comercializan en solución y por ende no absorben agua de la mezcla.

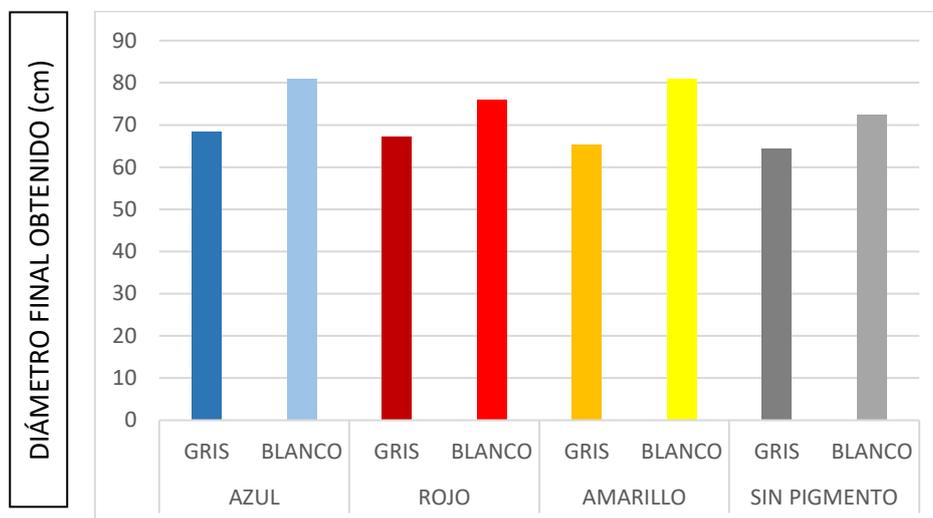
4.1.2- Ensayo Anillo J.

En el caso del ensayo anillo J los diámetros finales obtenidos se expresan en la figura 4.3 y mantienen el mismo comportamiento que en el caso del ensayo de escurrimiento

con el cono de Abrams, los HAC y HACC con cemento gris mantuvieron menor diámetro final de asentamiento que en los casos con cemento blanco.

Figura 4.3 – Diámetro final obtenido en ensayo anillo J (en cm).

(Fuente: elaboración propia en base a resultados obtenidos)



Con respecto a la capacidad de paso entre armaduras, en todos los casos se ha comprobado que los pastones presentan un buen comportamiento al respecto cumpliendo con la función $D_j \geq D-50\text{mm}$, de acuerdo con esto se puede establecer que, en promedio, los diámetros finales obtenidos con anillo J de todas las mezclas de HAC y de HACC, fueron medio centímetro menores por lo que todas poseen buena capacidad de paso entre armaduras (ASTM C 1621). Esto último puede clasificarse como no bloqueo al paso visible definido en la tabla 4.3 cuya fuente es la norma ASTM C 1621.

Tabla 4.3 – Identificación de la evaluación de bloqueo

(Fuente: elaboración propia en base a norma ASTM C 1621)

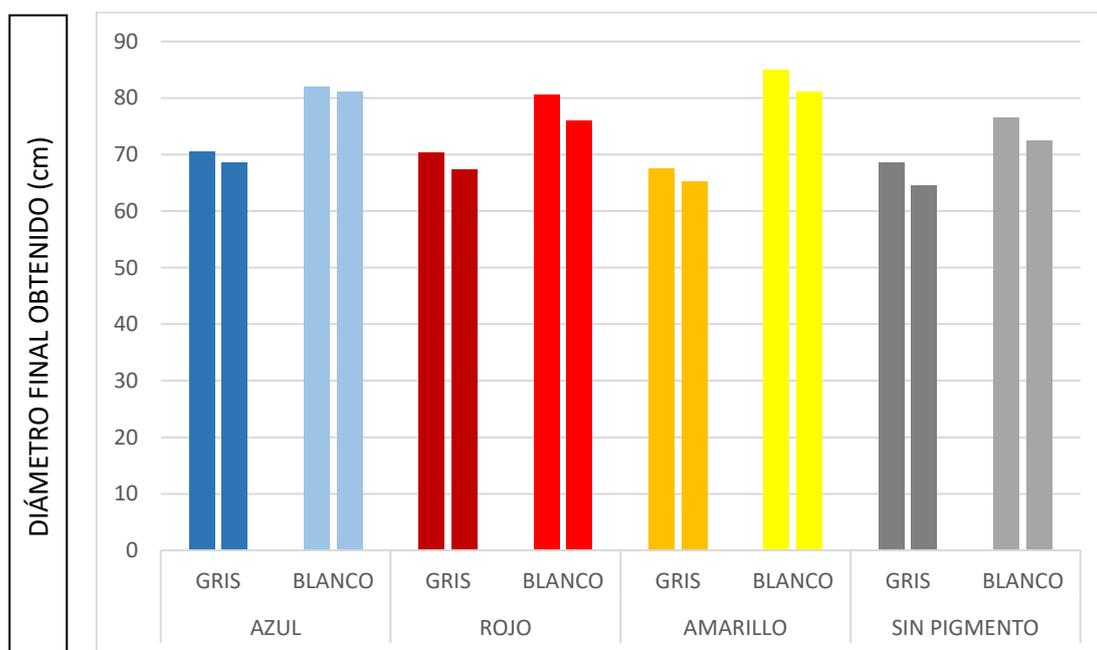
DIFERENCIA DE DIÁMETROS PROMEDIO ENTRE ENSAYO DE ESCURRIMIENTO Y ANILLO J	EVALUACIÓN DE BLOQUEO
0 a 1 pulgada (0 a 25 mm)	sin bloqueo visible
de 1 a 2 pulgadas (25 a 50 mm)	bloqueo mínimo a notable
más de 2 pulgadas (más de 50mm)	bloqueo notable a extremo

4.1.3- Comparación de datos de ambos ensayos.

En la figura 4.4 se presentan los resultados de los asentamientos medidos comparando los del ensayo de escurrimiento con los del anillo J, notándose la influencia del contenido de pigmento que produce un mayor asentamiento en todos los casos debiéndose destacar que la relación agua/cemento fue la misma en todos los casos, siendo la única variable el uso del pigmento. Con respecto a la demanda de agua, la norma ASTM C-979 establece recomendaciones respecto a la demanda de agua al añadir pigmento, esto en referencia a mantener la trabajabilidad de la mezcla.

Según Gani (1997) la adición de pigmento en porcentajes menores del 6 % es lo usual; en relación a esto también hace referencia a que al disminuir la relación agua/cemento los colores se intensifican, ya que los pigmentos tienden a absorber más agua y por lo tanto se debe incrementar la misma, por ello es conveniente mantener bajos los porcentajes de adición de los mismos. Además, establece que los efectos de los pigmentos pueden ser el de aumentar o disminuir la resistencia del hormigón, siendo la reducción de la resistencia mayor con la adición de negro de humo. También se ha informado que el negro de humo acelera el fraguado del hormigón.

Figura 4.4 – Diámetros obtenidos en ensayo de escurrimiento y Anillo J (en cm).
(Fuente: elaboración propia en base a resultados obtenidos)



4.2- Ensayos en estado endurecido.

A modo introductorio, en el capítulo 3 se explicó lo relativo al moldeo, curado y ensayo de probetas (3.5.2.3.1 y 3.5.2.3.2).

Una de las cuestiones principales del estudio de la presente tesis es conocer como se alteran ciertas propiedades de los HAC al añadir pigmento, según ACI 212 (1982) se expresa que la adición de pigmentos no debe ser superior al 10% del peso de cemento y que las cantidades inferiores al 6% casi siempre tienen poco o ningún efecto sobre las propiedades físicas del hormigón fresco o endurecido.

Según Ivanauskas y Grigonis (2009) en el estudio de pigmento de óxido de hierro en la mezcla de HACC, en adición del 3 al 6% en peso del cemento, obtuvieron pérdida de resistencia de hasta un 20%. Sus experimentos con HACC solidificado han demostrado que el óxido de hierro disminuye la absorción de agua hasta un 6% y disminuye la porosidad del concreto lo que hace que el hormigón sea más resistente a la congelación. Pero es uno de los pocos trabajos donde se observa una disminución tan considerable de la resistencia a la compresión.

En los siguientes ítems se presentan los resultados obtenidos de resistencia a compresión y resistencia a tracción por flexión.

Cabe destacar que la tabla con la totalidad de los datos recabados durante el procedimiento de ensayo en estado sólido, se encuentra disponible en ANEXO B.

4.2.1- Resistencia a compresión de los hormigones.

En la Tabla 4.4 se presentan los resultados obtenidos del análisis estadístico básico de los ensayos de compresión realizados a las probetas cilíndricas de 10cm de diámetro y 20cm de altura de los diferentes hormigones realizados.

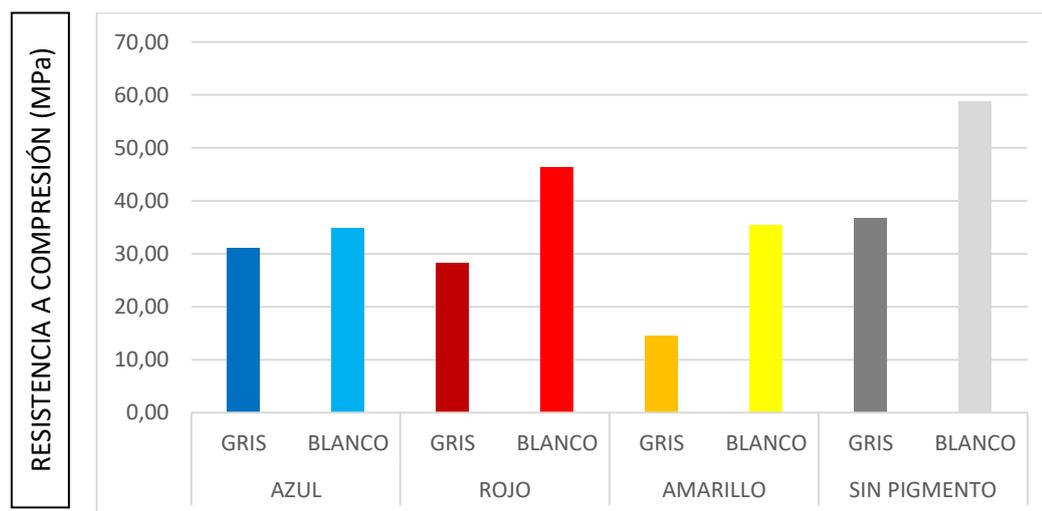
Tabla 4.4 – Resultados de ensayo a compresión de probetas cilíndricas.
(Fuente: elaboración propia en base a resultados obtenidos)

ENSAYOS EN ESTADO ENDURECIDO												
Resultados obtenidos en probetas cilíndricas de 10 x 20 cm a los 28 días												
PIGMENTO	AZUL		ROJO		AMARILLO		SIN PIGMENTO					
	GRIS	BLANCO	GRIS	BLANCO	GRIS	BLANCO	GRIS	BLANCO	GRIS	BLANCO		
DENSIDAD PROMEDIO (kg/m³)	2164	2259	2090	2252	1806	2080	2225	2286				
Desviación estandar	27,24	50,02	5,91	8,99	23,26	56,61	31,50	26,76				
Coefficiente de variación (%)	1,26%	2,21%	0,28%	0,40%	1,29%	2,72%	1,42%	1,17%				
Resistencia a compresión promedio (Mpa)	31,08	34,96	28,35	46,45	14,51	35,47	36,66	58,86				
Desviación estandar	1,10	0,74	0,78	1,76	0,40	2,84	1,00	1,37				
Coefficiente de variación (%)	4%	2%	3%	4%	3%	8%	3%	2%				
FOTOS												

Como se visualiza en la tabla 4.4 y en la figura 4.5, los hormigones con mayor resistencia a compresión fueron los de referencia sin pigmentar, el HACC con cemento blanco y pigmento rojo fue el de mayor resistencia entre los hormigones pigmentados, y el HACC con cemento gris y pigmento amarillo fue el de menor resistencia a compresión.

Figura 4.5 – Resistencia a compresión de probetas cilíndricas de los diferentes hormigones realizados.

(Fuente: elaboración propia en base a resultados obtenidos)



Los resultados muestran diferencias con lo analizado por Positieri (2005), ya que los resultados obtenidos por la autora muestran un incremento en la resistencia a la compresión con el uso del pigmento amarillo, incluso sobre los hormigones de referencia sin pigmentar.

Si se analiza la referencia bibliográfica, la temática de la resistencia a la compresión es una de las principales variables analizadas, en todos los casos se hace referencia a la disminución de la relación agua/cemento para obtener mayores resistencias, cuando se agrega pigmento este pasa a ser parte de los finos del esqueleto estructural del material generando mayor demanda de agua lo que reduce la relación agua/cemento y por lo tanto aumentan las resistencias, en el caso de la presente tesis los pigmentos utilizados son para la elaboración de pinturas, por lo tanto vienen en solución y no generan demanda de agua de la mezcla.

La edad de análisis de los hormigones fue de 28 días, en este punto el análisis de Positieri (2005) muestra resultados similares con el pigmento rojo, pero bien diferentes con el pigmento amarillo el que se mostró más resistente que el hormigón de referencia.

En la tabla 4.4 se pueden apreciar las imágenes de los ensayos donde se puede apreciar que los hormigones con pigmento rojo y azul obtuvieron mejores formas de rotura además de mostrar mayor resistencia entre los hormigones pigmentados tanto en la versión HACC con cemento gris y HACC con cemento blanco.

Los hormigones con cemento blanco obtuvieron mayor resistencia a la compresión que los que contenían cemento gris en todos los casos. Como dato adicional a los resultados relevados se presenta la Figura 4.6 con los valores de densidad de las probetas cilíndricas.

Figura 4.6 – Densidades y volúmenes de probetas cilíndricas.

(Fuente: elaboración propia en base a resultados obtenidos)

TIPO	CEMENTO	CODIGO	VOLUMEN (m ³) (en estado sólido)	MASA (Kg.)	DENSIDAD (kg/m ³)	DENSIDAD (kg/m ³) PROMEDIO
HACC amarillo	gris	AHB1	0,00160	2,858	1783,60	1806,05
	gris	AHB2	0,00158	2,889	1830,04	
	gris	AHB3	0,00155	2,792	1804,50	
HACC amarillo	blanco	AHA1	0,00129	2,600	2018,55	2079,94
	blanco	AHA2	0,00151	3,220	2130,07	
	blanco	AHA3	0,00126	2,640	2091,22	
HACC azul	gris	AZB1	0,00157	3,350	2132,67	2164,11
	gris	AZB2	0,00163	3,555	2180,75	
	gris	AZB3	0,00163	3,552	2178,91	
HACC azul	blanco	AZA1	0,00147	3,364	2295,13	2258,60
	blanco	AZA2	0,00150	3,430	2279,07	
	blanco	AZA3	0,00149	3,270	2201,59	
HACC rojo	gris	RCB1	0,00155	3,224	2083,71	2090,35
	gris	RCB2	0,00167	3,500	2095,02	
	gris	RCB3	0,00165	3,453	2092,32	
HACC rojo	blanco	RHA1	0,00163	3,698	2262,80	2252,48
	blanco	RHA2	0,00154	3,470	2248,30	
	blanco	RHA3	0,00154	3,467	2246,35	
HAC	gris	HAC1	0,00158	3,523	2231,65	2225,06
	gris	HAC2	0,00164	3,700	2252,76	
	gris	HAC3	0,00156	3,424	2190,79	
HAC	blanco	HACB1	0,00157	3,533	2254,92	2285,57
	blanco	HACB2	0,00158	3,636	2297,51	
	blanco	HACB3	0,00152	3,511	2304,29	

Se puede observar que hay una correspondencia entre los resultados de compresión y las densidades promedio, las probetas que obtuvieron valores menores de resistencia a la compresión son las de menor densidad promedio, y las de mayor densidad promedio corresponden a las de mayor valor de resistencia a la compresión.

También se puede observar que los HAC con cemento blanco obtuvieron mayores valores de resistencia a la compresión en todos los casos que los que se ejecutaron con cemento gris, en correspondencia a los valores de densidad promedio en los que se obtuvieron valores más altos con los HAC con cemento blanco, en relación a los HAC con cemento gris.

4.2.2- Resistencia de probetas prismáticas de 40 x 40 x 160 mm.

Resumiendo lo expresado en el capítulo 3, fueron elaboradas un total de 24 probetas prismáticas (ejecutando 3 por cada una de las 8 mezclas analizadas de HAC y HACC) donde, el porcentaje de pigmento en relación a la suma de la dosificación de cemento más polvo de electrofiltro fue del 3% para todos los casos. Las diferentes barras de 40x40x160mm fueron sometidas a flexión y sus mitades, de aproximadamente 40x80x40mm, a compresión nuevamente para obtener así una correlación con los resultados ya presentados de compresión de probetas cilíndricas.

A continuación, se presenta la tabla 4.5 donde se presentan los resultados obtenidos del análisis estadístico básico de los ensayos de probetas prismáticas de los diferentes hormigones realizados, en ANEXO B se encuentran las tablas de resultados obtenidos del ensayo directamente. Los ensayos fueron efectuados a 3 probetas a flexión de cada una de las mezclas realizadas, y las 6 mitades obtenidas de éstas, fueron ensayadas a compresión (con y sin pigmentos).

Se aclara que a las muestras prismáticas se les retiró el agregado grueso antes del moldeo de las mismas.

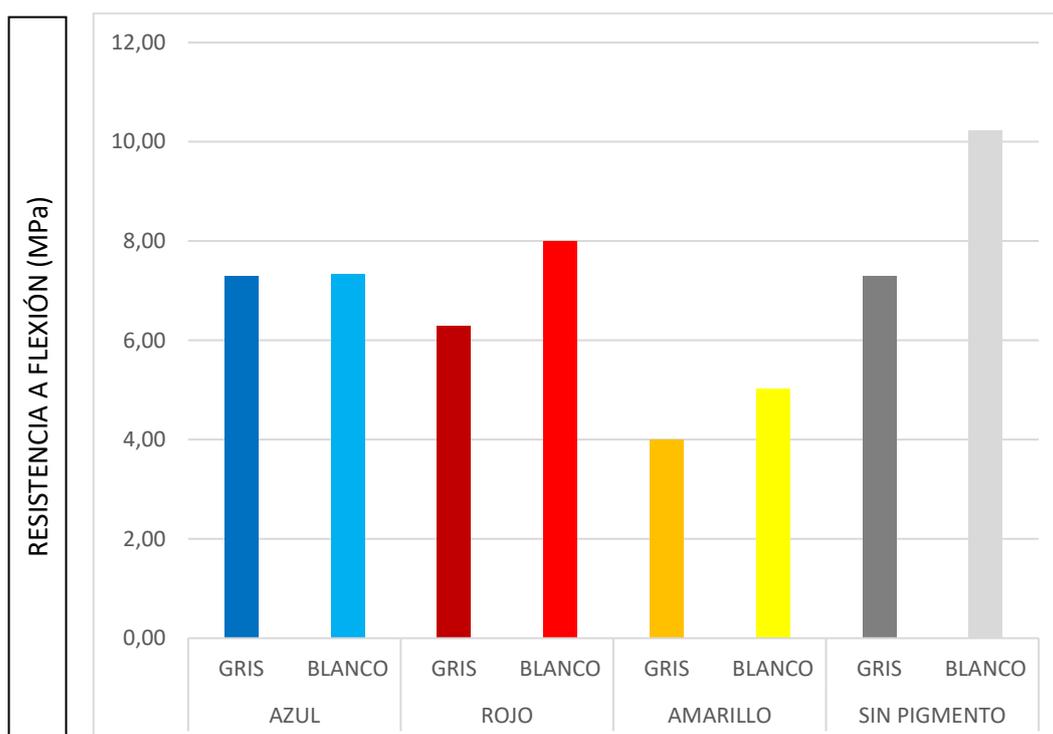
Tabla 4.5 – Tabla de resultados de ensayos a flexión y compresión de probetas prismáticas.
(Fuente: elaboración propia en base a resultados obtenidos)

ENSAYOS EN ESTADO ENDURECIDO											
Resultados obtenidos en probetas rectangulares de 40 x 40 x 160 mm a los 28 días											
PIGMENTO	AZUL		ROJO		AMARILLO		SIN PIGMENTO				
	GRIS	BLANCO	GRIS	BLANCO	GRIS	BLANCO	GRIS	BLANCO	GRIS	BLANCO	
CEMENTO											
ENSAYO A TRACCIÓN valor promedio (Mpa)	7,30	7,33	6,30	8,00	4,00	5,03	7,30	10,23			
Desviación estandar	0,53	0,51	0,10	0,17	0,17	0,23	0,10	0,75			
Coefficiente de variación (%)	7,25%	7,00%	1,59%	2,17%	4,33%	4,59%	1,37%	7,33%			
Resistencia a compresión promedio de mitades (Mpa)	36,10	50,46	30,05	58,93	13,40	35,00	44,90	73,24			
Desviación estandar	0,89	5,09	0,97	1,76	0,62	1,52	0,71	1,54			
Coefficiente de variación (%)	2%	10%	3%	3%	5%	4%	2%	2%			
FOTOS											

Como se visualiza en la figura 4.7 y tabla 4.5, se presentan resultados más uniformes entre las diferentes mezclas analizadas, salvo por las mezclas que contienen pigmento amarillo y la de referencia con cemento blanco.

Figura 4.7 – Resultados de ensayo a flexión de probetas prismáticas.

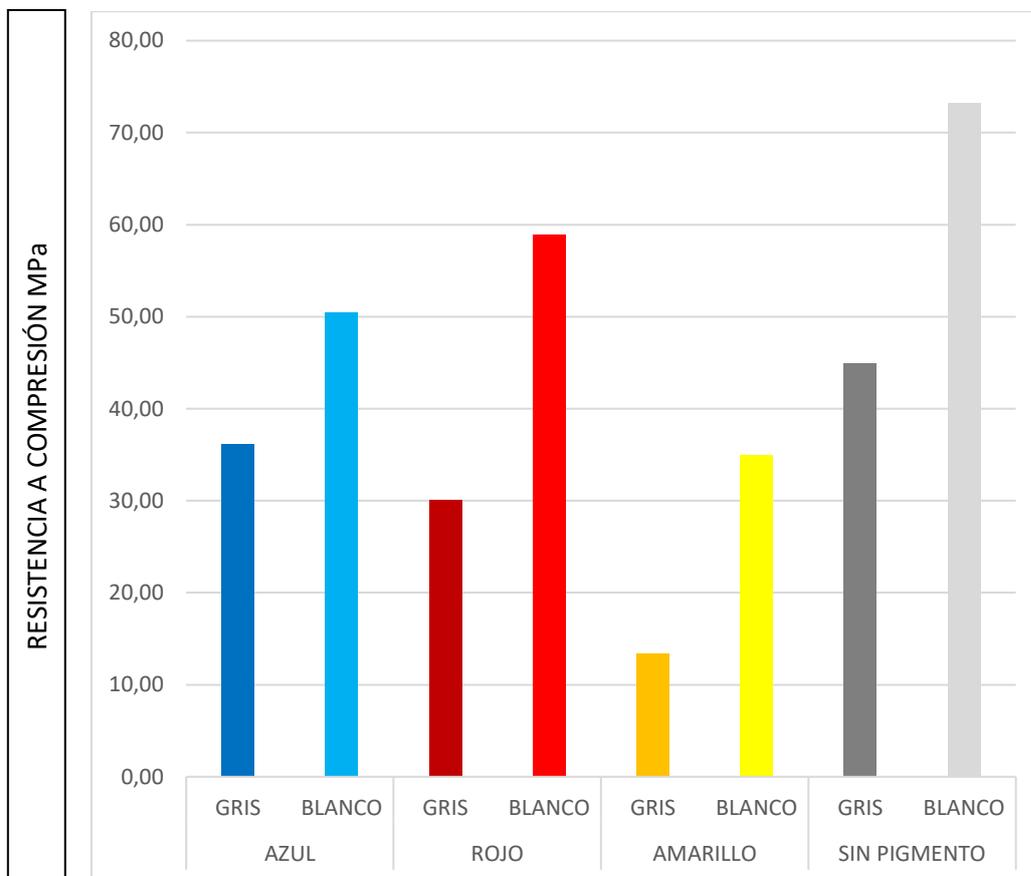
(Fuente: elaboración propia en base a resultados obtenidos)



En el caso de comparar por grupos de cemento, ya sea gris o blanco, se evidencia que frente a este tipo de ensayo el tipo de cemento no altera el resultado en el caso del uso del pigmento azul, lo altera en 1.7 MPa para el caso del pigmento rojo y 1.03 MPa para el pigmento amarillo, siendo la mayor variación entre las muestras con cemento gris y blanco la que es de 2.93 MPa.

Para el caso de los ensayos a compresión efectuados sobre las mitades de las probetas prismáticas obtenidas luego del ensayo a flexión, los resultados se muestran en la tabla 4.5 y se grafican en la Figura 4.8, donde se puede observar que la dispersión de resultados entre muestras es mayor, entre grupos de cementos se mantiene la tendencia de mayor resistencia mecánica de los hormigones con cemento blanco.

Figura 4.8 – Resultados de ensayo a compresión de mitades de probeta prismática.
(Fuente: elaboración propia en base a resultados obtenidos)

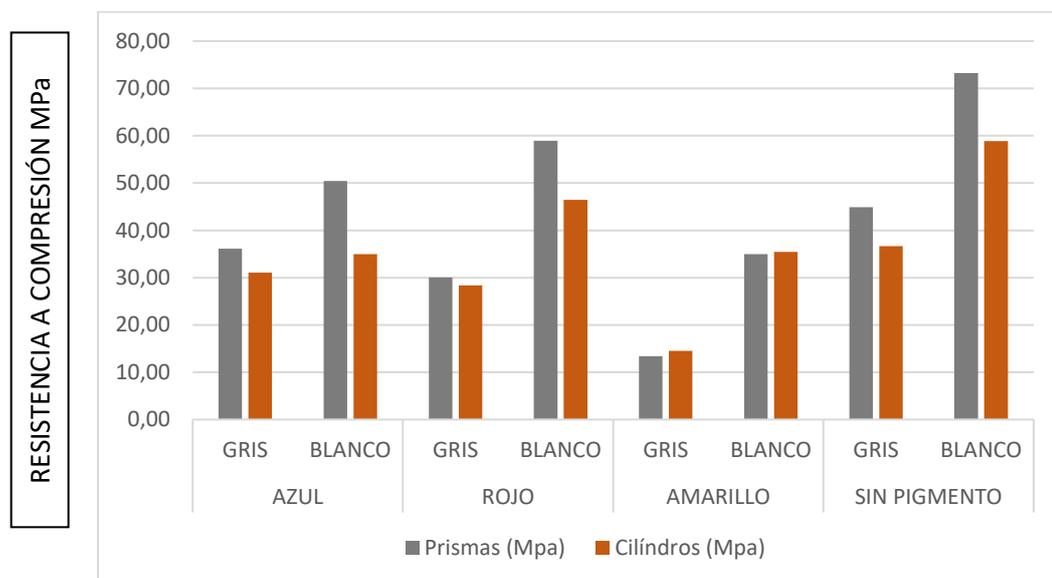


4.2.3- Análisis comparativo de los resultados de puntos 4.2.1 y 4.2.2.

En la figura 4.9 se puede observar que comparando los resultados de las probetas prismáticas con las cilíndricas, debido al factor escala, ya que la forma y tamaño de las probetas son diferentes a lo que se añade que en las probetas cilíndricas había agregado grueso mientras que en las probetas prismáticas y cúbicas fue retirado el mismo, los resultados son diferentes pero las tendencias se mantienen, teniendo mayor resistencia las probetas realizadas con cemento blanco en lugar de gris; además con las probetas prismáticas se obtienen resistencias mayores que en el caso de las cilíndricas, excepto cuando se emplea pigmento amarillo en que los valores no difieren significativamente, debido a que al haberse retirado el agregado grueso, la zona de transición se reduce (Neville, 2012) aumentando por ello la resistencia a la compresión.

Figura 4.9 – Resultados de ensayo a compresión de prismas y cilindros.

(Fuente: elaboración propia en base a resultados obtenidos)



4.3- Ensayos en cámara UV y análisis con espectrofotómetro.

Tal como fue descripto en el punto 3.5.3, para la realización del ensayo en cámara UV se llevaron las probetas cúbicas ejecutadas, en su formato de 50x50x50mm, al Laboratorio del Instituto de Ensayo de Materiales de la Facultad de Ingeniería de la UdelaR, las que fueron colocadas en la cámara de ensayos UV (punto 3.5.1.4), prosiguiendo con la medición cada 100 horas aproximadas con el espectrofotómetro (punto 3.5.1.5) del Laboratorio de Punto Color Pinturas, logrando un total de 1363 horas de exposición en cámara UV.

En las tablas 4.8 a 4.11, se presentan las diferentes tablas de valores de L^* , a^* y b^* , por tipo de mezcla, donde se puede observar en términos generales, que los colores pierden su intensidad inicial a muy pocas horas de exposición y hacia el final de los diferentes ensayos, se comienzan a estabilizar mostrando una permanencia incambiada.

A partir de estos valores se efectúa un promedio entre las muestras del mismo color analizadas y en base a estos se calculan los valores de ΔL^* (diferencia de luminosidad), Δa^* (diferencia eje rojo-verde), Δb^* (diferencia eje amarillo-azul), C^* (saturación), ΔC^* (diferencia de saturación), E^* (color total) y ΔE^* (diferencia total de color).

Tabla 4.8 - Hormigón con pigmento rojo.

(Fuente: elaboración propia en base a resultados obtenidos)

n°	MUESTRA			COORDENADA PROMEDIO	HORAS																									
	CEMENTO	COLOR	CODIGO		0	C	98	C	201	C	302	C	402	C	499	C	599	C	869	C	967	C	1059	C	1152	C	1363	C		
1	BLANCO	ROJO	RHA1	L*	68,5		75,1		77,5		79,1		80,2		80,8		80,9		82,5		83,1		83,5		83,7		83,9			
				a*	20,1		13,9		13,3		12,8		14,4		13,8		14,2		13,8		13,5		13,2		13,2		12,9		12,8	
				b*	10		4,2		5,2		5,5		4,2		4,6		4,9		4,2		4,4		4,5		4,5		4,8		5	
2	BLANCO	ROJO	RHA2	L*	74,2		75,1		76,2		77,1		77,9		78,2		78,8		80,6		80,8		81,1		81,4		81,5			
				a*	12,1		13,5		12,5		11,8		11,2		11,5		11,7		11,9		11,8		11,6		11,6		11,2		11,5	
				b*	-1,1		0,8		1,2		2,2		1,8		2		1,9		2,1		1,8		2		2		1,9		2,1	
3	BLANCO	ROJO	RHA3	L*	70,1	TESTIGO																								
				a*	14,1	TESTIGO																								
				b*	2,2	TESTIGO																								
1	GRIS	ROJO	RCB1	L*	63,2		64,1		64,6		64,9		65,5		65,8		65,9		66,4		66,8		66,6		66,4		66,2			
				a*	10,1		9,8		12,2		11,8		10,2		11,6		12,1		11,8		11,6		11,2		10,8		10,2			
				b*	0,8		1,7		2		2,3		1,2		1,8		2		1,9		1,8		2		2,2		2,2		2,6	
2	GRIS	ROJO	RCB2	L*	62		62,2		62,6		62,7		62,9		63,2		63,4		63,7		63,9		63,8		63,5		63,2			
				a*	11,2		13,1		10,1		11,4		11		10,8		11,2		10,6		10,9		10,5		10,4		10,1			
				b*	-1,1		-1		2		2,3		2		1,8		1,9		1,5		1,6		1,9		2		2		2,2	
3	GRIS	ROJO	RCB3	L*	64,1	TESTIGO																								
				a*	12,5	TESTIGO																								
				b*	3,4	TESTIGO																								

Tabla 4.9 - Hormigón con pigmento azul.

(Fuente: elaboración propia en base a resultados obtenidos)

n°	MUESTRA			COORDENADA PROMEDIO	HORAS																									
	CEMENTO	COLOR	CODIGO		0	C	98	C	201	C	302	C	402	C	499	C	599	C	869	C	967	C	1059	C	1152	C	1363	C		
1	BLANCO	AZUL	AZA1	L*	72,2		72,8		73,4		73,6		74,5		74,6		75,5		76,8		77,1		77,2		77,4		77,6			
				a*	1,1		0,2		-0,5		0,2		0,5		0,8		0,6		0,9		0,8		0,7		0,8		0,8		0,9	
				b*	-13,2		-12,5		-12,1		-12,7		-13,1		-12,8		-13,1		-12,8		-12,8		-12,9		-12,8		-12,7		-12,8	
2	BLANCO	AZUL	AZA2	L*	73		73,4		73,6		74,1		74,5		74,6		75,1		76		76,2		76,2		76,4		76,5			
				a*	1,2		0,8		0,1		0,3		0,5		0,3		0,8		0,9		0,9		0,8		0,7		0,8			
				b*	-12		-13,5		-13,2		-13,1		-12,8		-13		-12,9		-12,9		-12,5		-12,6		-12,5		-12,9		-12,7	
3	BLANCO	AZUL	AZA3	L*	75,2	TESTIGO																								
				a*	0,2	TESTIGO																								
				b*	-14,8	TESTIGO																								
1	GRIS	AZUL	AZB1	L*	70,1		70,2		70,2		70,6		71,5		72,5		73,1		74,2		74,4		74,6		74,8		74,8			
				a*	0,2		0,8		0,5		0,2		-0,8		-0,1		0,5		0,6		0,5		0,4		0,3		0,2			
				b*	-9,2		-10,1		-10,5		-11		-10,5		-9,5		-9,1		-8,8		-8,9		-8,8		-8,8		-8,9		-9	
2	GRIS	AZUL	AZB2	L*	69,4		69,8		69,8		70,1		70,2		71,4		71,9		72,8		73,1		72,9		72,8		72,9			
				a*	1,1		1		0,8		0,3		0,5		0,1		0,4		0,8		0,7		0,6		0,7		0,8			
				b*	-9,2		-10,5		-11,1		-11,5		-10,5		-9,8		-9,5		-9,5		-10,1		-10		-10,2		-10,3		-10,2	
3	GRIS	AZUL	AZB3	L*	70,5	TESTIGO																								
				a*	1	TESTIGO																								
				b*	-10,2	TESTIGO																								

Tabla 4.10 - Hormigón con pigmento amarillo.

(Fuente: elaboración propia en base a resultados obtenidos)

n°	MUESTRA			COORDENADA PROMEDIO	HORAS																									
	CEMENTO	COLOR	CODIGO		0	C	98	C	201	C	302	C	402	C	499	C	599	C	869	C	967	C	1059	C	1152	C	1363	C		
1	BLANCO	AMARILLO	AHA1	L*	84,1		84,5		84,9		85,1		85,9		86,4		86,8		86,9		87,2		87,2		87,4		87,6			
				a*	2,8		3,1		3		3,2		3,5		3,2		3		3,9		3,6		3,7		3,6		3,6		3,5	
				b*	21,2		15		11,5		10,3		9,5		9,1		9,2		8		8,4		8,2		8,4		8,4		8,6	
2	BLANCO	AMARILLO	AHA2	L*	82		83,1		84,3		84,6		85,1		86,1		86,4		86,8		87,1		87,1		87,3		87,5			
				a*	1,9		2,1		2,5		2,8		3,9		3,5		3,2		3		3,2		3		3,1		3,2		3,2	
				b*	24,1		18,5		15,2		14		13,1		9		9,2		8,9		8,8		9		9,1		9,1		9,2	
3	BLANCO	AMARILLO	AHA3	L*	84,1	TESTIGO																								
				a*	0,9	TESTIGO																								
				b*	24,9	TESTIGO																								
1	GRIS	AMARILLO	AHB1	L*	75		75,8		76,4		76,8		76,9		77,4		77,6		78,2		78,6		78,5		78,7		78,7			
				a*	4,1		3,2		2,2		1,8		1		0,6		0,3		0		0,2		0,3		0,2		0,2		0,2	
				b*	9,8		10,5		10,6		10,1		9,9		10,2		10,5		10,1		10,3		9,9		10		9,8		9,8	
2	GRIS	AMARILLO	AHB2	L*	72		73,6		74,4		74,5		75,1		75,6		76,1		76,5		76,8		76,9		76,9		77			
				a*	4,1		3,5		2,1		1,6		1,4		1,6		1,2		1		1,1		1		1,2		1,1		1,1	
				b*	8,6		8,8		9		9,5		9,2		9,8		10,2		10		9,9		10,1		10,2		10		10	
3	GRIS	AMARILLO	AHB3	L*	70,9	TESTIGO																								
				a*	4	TESTIGO																								
				b*	7,9	TESTIGO																								

Tabla 4.11 - Hormigón de referencia.

(Fuente: elaboración propia en base a resultados obtenidos)

n°	MUESTRA			COORDENADA PROMEDIO	HORAS																									
	CEMENTO	COLOR	CODIGO		0	C	98	C	201	C	302	C	402	C	499	C	599	C	869	C	967	C	1059	C	1152	C	1363	C		
1	BLANCO	-	HACB1	L*	79		79,8		80,2		80,8		81		81,2		81,5		81,6		81,7		81,8		81,9		81,9			
				a*	-0,7		-0,6		-0,7		-0,4		-0,5		-0,6		-1		-1,2		-1,1		-1,2		-1,1		-1,2		-1,2	
				b*	2,3		2,6		2,4		2,8		2,5		3		2,8		2,6		2,7		2,5		2,7		2,6		2,6	
2	BLANCO	-	HACB2	L*	82		82,4		82,5		82,8		83		83,2		83,2		83,6		83,8		83,6		83,5		83,6			
				a*	-1,4		-1,6		-1,3		-1		-1,1		-1,2		-0,9		-1		-1,1		-1,1		-1		-1,1		-1,1	
				b*	4,1		4,4		4,6		4,7		4		4,5		4,2		4,6		4,5		4,4		4,4		4,5		4,6	
3	BLANCO	-	HACB3	L*	84	TESTIGO																								
				a*	-1	TESTIGO																								
				b*	5,5	TESTIGO																								
1	GRIS	-	HAC1	L*	68,2		68,6		68,4		68,7		68,8		69		69,1		69,2		69,4		69,3		69,4		69,5			
				a*	-1,1		-1,3		-1,5		-1,3		-2		-1,5		-1,6		-1		-1,2		-1,1		-1,2		-1,1		-1,1	
				b*	4,2		4,8		5		5,5		5,2		5,6		5,8		6		5,9		6		5,8		5,9		5,9	
2	GRIS	-	HAC2	L*	66,4		66,4		66,8		66,9		67,1		67,3		67,3		67,6		67,8		67,7		67,8		67,9			
				a*	-0,3		-0,6		-1		-0,8		-1,2		-1,4		-1,6		-1,4		-1,5		-1,4		-1,5		-1,6		-1,6	
				b*	4,8		5,5		5,4		5,8		5,6		4,5		4,8		4,9		4,8		4,8		4,8		4,7		4,8	
3	GRIS	-	HAC3	L*	71,9	TESTIGO																								
				a*	-0,8	TESTIGO																								
				b*	5,5	TESTIGO																								

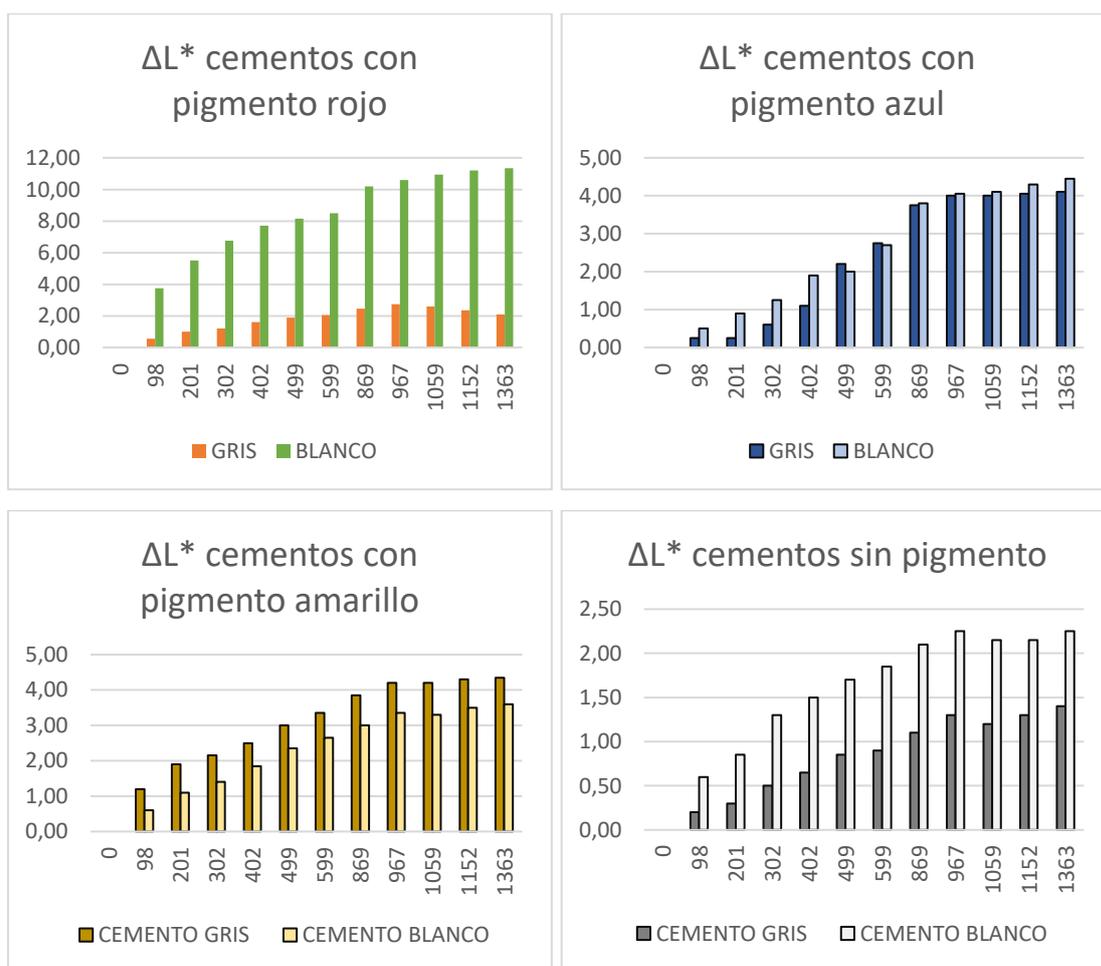
En base a las tablas que preceden se elaboraron los gráficos para los valores de ΔL^* (diferencia de luminosidad), C^* (saturación), y ΔE^* (diferencia total de color), que se presentan en los ítems siguientes.

4.3.1 - Diferencia de luminosidad.

Para poder comprender los valores que siguen, cabe observar que la luminosidad abarca un espacio de negro a blanco donde $L^*=0$ indica negro y $L^*=100$ indica blanco, por lo que los ΔL^* positivos son valores más luminosos que la muestra original y los ΔL^* negativos son menos luminosos que la muestra de referencia, en los gráficos se puede observar que todos los valores medidos a lo largo del tiempo de exposición en cámara UV son más luminosos que la medición al inicio del ensayo, ya que todos los valores de ΔL^* son positivos. Esto se aprecia en tabla 4.12.

Tabla 4.12 – Graficas de ΔL^*

(Fuente: elaboración propia en base a resultados obtenidos)



Se puede observar que la diferencia de luminosidad es cada vez mayor en las primeras semanas de ensayo hasta un punto donde comienza a estabilizarse la misma, esto se da en torno a las 1000 horas de exposición en todos los casos, por lo que se debe tener en cuenta esta particularidad al momento de proyectar un color específico en una fachada o un pavimento, una posible forma es elaborar las piezas de HACC con menor luminosidad a la deseada en la pieza finalizada.

Con respecto a la comparación entre colores y tipos de cemento, se puede observar que todas las muestras analizadas mantienen el mismo comportamiento desde el punto de vista de su diferencia de luminosidad, pero se observa que el HACC con cemento blanco y pigmento rojo es el más afectado con un valor de 11,35 con 1363 horas de exposición en cámara UV, en contrapartida el HAC con cemento gris es el menos afectado con apenas 1,40 en 1363 horas de exposición.

En relación al tipo de cemento utilizado se observa que se mantiene el mismo comportamiento, frente a la diferencia de luminosidad, en hormigones con cemento gris o cemento blanco, un aumento de la misma hasta las 1000 horas en promedio para luego estabilizarse y mantener un valor constante dentro de los parámetros de tiempo analizados.

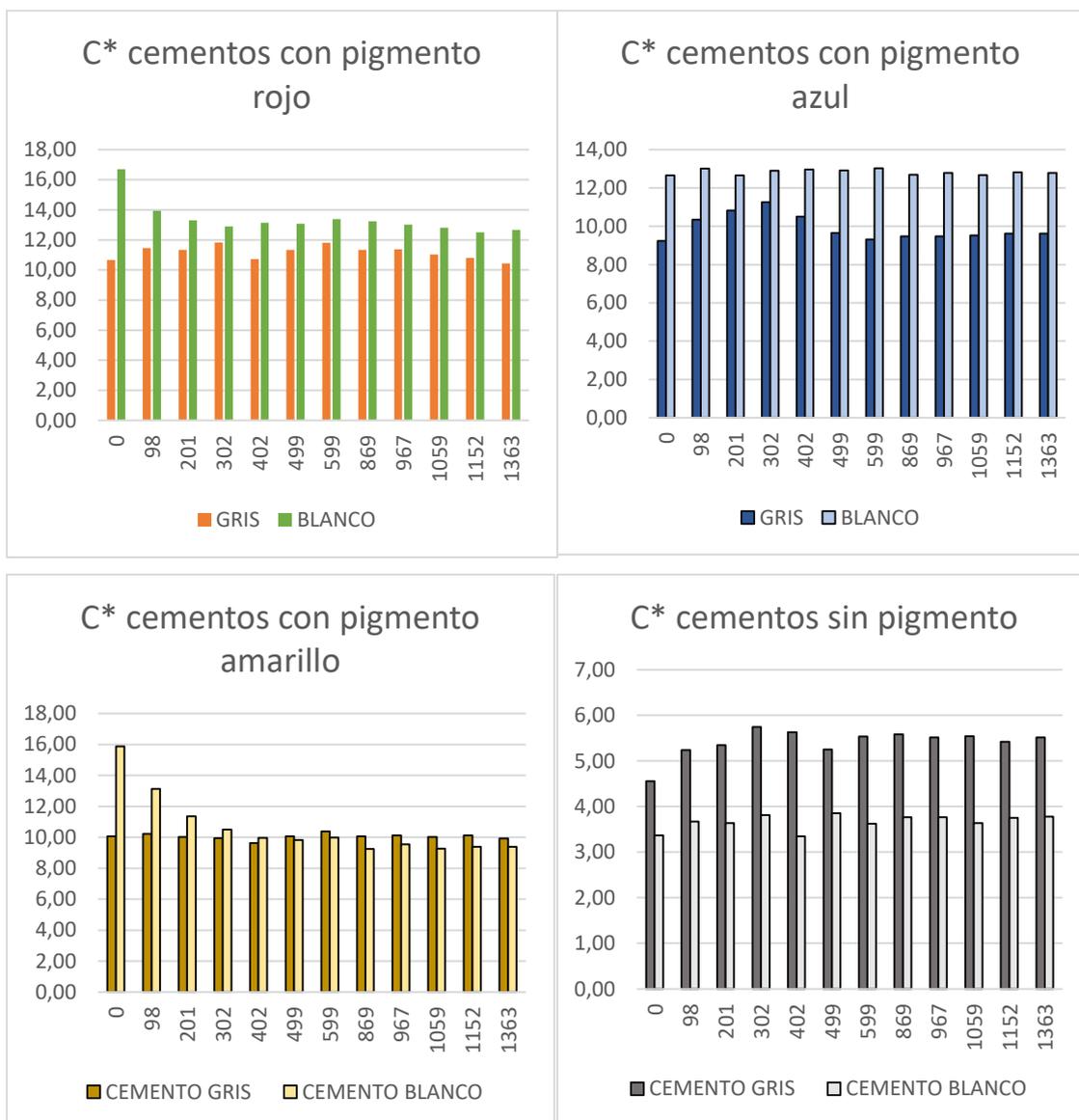
4.3.2- Saturación.

Para poder comprender los valores que siguen se expresa que la saturación C^* es el resultado de la fórmula $C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2}$. Para entender los resultados se debe tener en cuenta que si la saturación aumenta significa que el color se intensifica con respecto al valor de origen y si la saturación disminuye, el color pierde “fuerza”, o sea que a simple vista parece más agrisado lo que significa que tiene cada vez más componente de negro respecto al color saturado.

En la tabla 4.13, se presentan las gráficas comparativas de saturación (C^*) de todas las muestras de HAC y HACC a lo largo del ensayo de exposición a rayos UV de 1363 horas de exposición.

Tabla 4.13 – Graficas de C*

(Fuente: elaboración propia en base a resultados obtenidos)



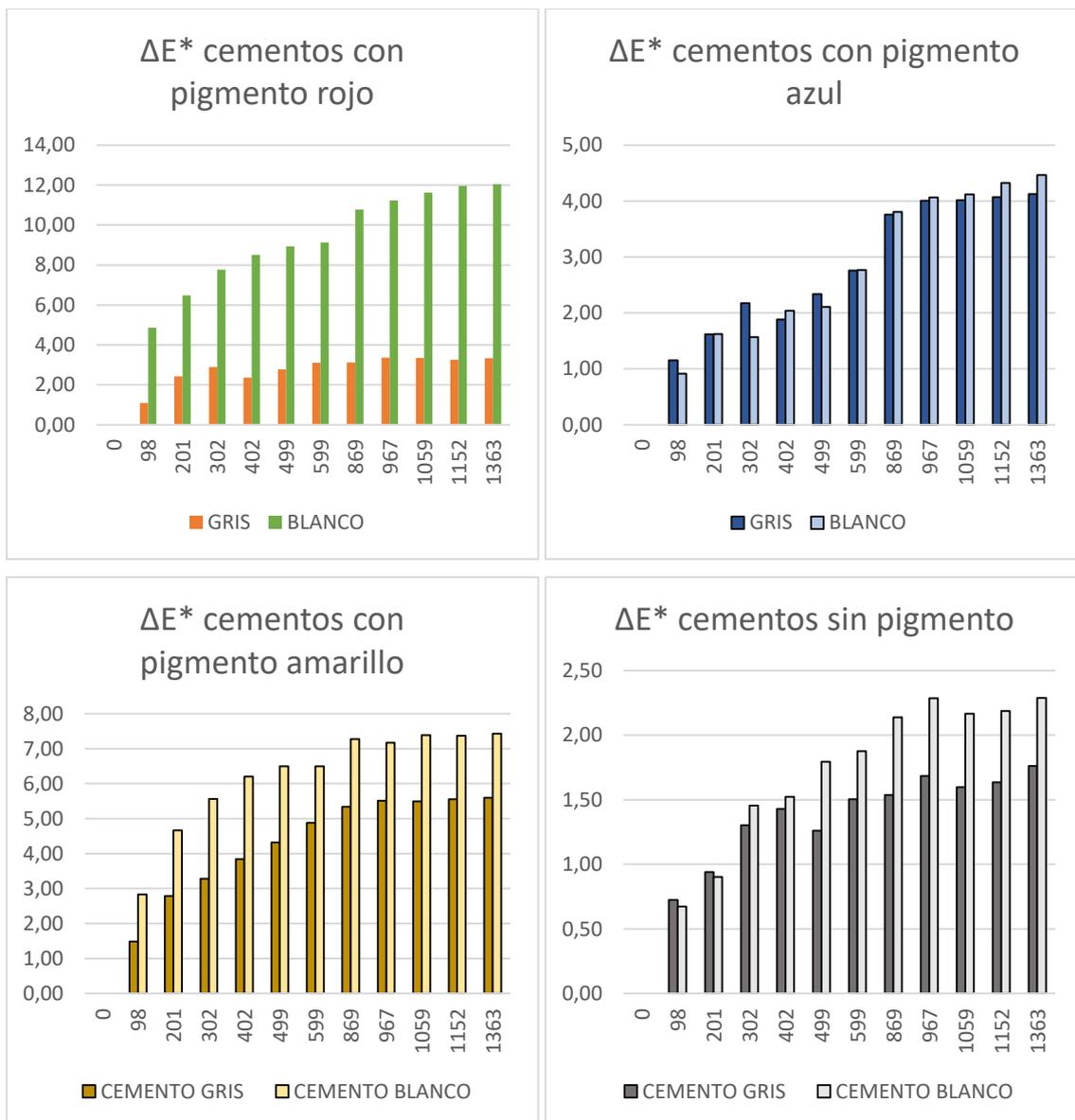
Se puede observar en las diferentes gráficas que la saturación presenta un comportamiento bastante inalterado pero con alguna dispersión de resultados al inicio del ensayo principalmente en los colores rojo y amarillo, luego del período inicial de 100 horas de exposición estos hormigones se estabilizan respecto a la saturación mostrando poca alteración de valores, según Positieri (2005) esto se debe a la presencia de eflorescencias que mantienen el valor de la saturación con poco aumento, además expresa que luego de la limpieza de la superficie de la muestra, el color se intensifica aumentando el valor considerablemente ya que se tienen colores más intensos.

4.3.3- Diferencia de color total.

Para poder comprender los valores que se aprecian en la tabla 4.14, se expresa que la diferencia total de color ΔE^* es el resultado de la fórmula $\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$, donde intervienen todos los factores del espacio CIE L*a*b* y se aplica la tabla 2.6 del capítulo 2, donde con un valor de ΔE^* mayor a 5 la diferencia de color es apreciable a simple vista.

Tabla 4.14 – Graficas de ΔE^*

(Fuente: elaboración propia en base a resultados obtenidos)



Se debe tener en cuenta que valores de diferencia de color total inferiores a 1,5 son imperceptibles al ojo humano y difíciles de medir con instrumentos. Entonces se puede apreciar que los HAC con cemento gris y blanco no presentan grandes variaciones de color total, que sus variaciones son casi imperceptibles al ojo humano y que los HACC con cemento blanco y pigmento rojo son los que más varían con diferencias visibles a simple vista, por lo tanto, son estos los pigmentos con los que se debe tener más cuidado al momento de lograr un tono de color deseado.

Con respecto a los HACC se puede observar que todos presentaron diferencias de color apreciables a simple vista, que los que más varían son el rojo y el amarillo, siendo el azul uno de los colores más estables con respecto a su variación total. Esto es un resultado comparable con lo desarrollado por Positieri (2005) donde los resultados que se obtuvieron por parte de la autora fueron muy similares, por lo que siempre que se trabaje con hormigones coloreados se debe tener en cuenta que determinados colores varían más que otros en presencia de exposición al ambiente.

En el caso particular del estudio efectuado se puede visualizar en gráficas que en comparación entre HACC con cemento gris y HACC con cemento blanco los hormigones con menor variación de color total en todos los casos son los que contienen cemento gris, incluso en colores como el rojo y el amarillo que son los de mayor variación, donde se puede observar la gran diferencia que hay entre la diferencia de color total a las 1363 horas de exposición entre una muestra de HACC con cemento gris y blanco con el mismo pigmento.

5- CONCLUSIONES.

Las conclusiones se efectúan en base a los diferentes estados y ensayos enumerados en el presente trabajo, por lo tanto, se efectúan conclusiones sobre el HAC y el HACC con los pigmentos analizados, primero en estado fresco, luego en estado endurecido donde se presentan las conclusiones de los ensayos de resistencia mecánica y los derivados en cámara UV y espectrofotómetro; finalmente se presentan sugerencias para futuras investigaciones en la temática.

5.1- Conclusiones de los ensayos en estado fresco.

De los ensayos efectuados a las diferentes mezclas de HAC y HACC se puede concluir que las mezclas analizadas poseen buena trabajabilidad, cohesión y fundamentalmente, escurrimiento acorde a lo detallado para un HAC según la norma BS EN 12350:2010.

Las mezclas con pigmento tienen mayor escurrimiento que las de referencia sin pigmentar, siendo las que contenían pigmento amarillo las de aspecto más fluido, pero siempre manteniendo la cohesión.

El tiempo en llegar a los 50 cm de diámetro (T'50cm) fue menor para los hormigones con cemento blanco, pero en todos los casos los hormigones con cemento gris mantuvieron menor diámetro final en el ensayo de escurrimiento.

Si se hace referencia a la clasificación definida por la norma EN 206-1: 2000, los resultados categorizan la mezcla con una fluidez SF3 y una clasificación de viscosidad VS2, lo que demuestra que los hormigones obtenidos son autocompactantes dentro de los límites establecidos por la norma, pero muy fluidos.

En el ensayo anillo J los diámetros finales obtenidos mantienen el mismo comportamiento que en el caso del ensayo de escurrimiento, los hormigones con cemento gris presentaron menor diámetro final en el ensayo que los realizados con cemento blanco, esto es consistente con lo visualizado en el previo ensayo de escurrimiento.

5.2- Conclusiones de los ensayos en estado endurecido.

Siempre se debe tener en cuenta que los pigmentos utilizados no fueron fabricados como pigmentos para mortero, son pigmentos para elaborar pinturas. Como conclusión general, se puede establecer que los hormigones de referencia, sin pigmento, presentaron mayores valores de resistencia que los hormigones a los que se le incorporaron pigmentos variando los resultados según el pigmento empleado.

Con respecto a los ensayos sobre probetas cilíndricas a compresión el HACC con cemento blanco y pigmento rojo fue el de mayor resistencia entre los hormigones pigmentados, mientras que el HACC con cemento gris y pigmento amarillo fue el de menor resistencia, esto último tiene además una relación directa con los valores de densidad promedio de las diferentes probetas observándose una densidad promedio muy baja en el caso del HACC con cemento gris y pigmento amarillo. Con respecto a los HACC con pigmento amarillo, la pérdida de densidad puede provenir de la gran cantidad de burbujas que se aprecia a simple vista, producto de una posible reacción química con el cemento o alguno de los aditivos o adiciones utilizadas. Con respecto a los restantes pigmentos analizados no se aprecia a simple vista la particularidad de burbujas de aire, pero si se observa una pérdida de densidad que pudo ser la causa de la menor resistencia que tuvieron respecto a los hormigones de referencia sin pigmentar.

Como resultado de los ensayos sobre probetas prismáticas (a flexión y luego a compresión de mitades resultantes), se presentan resultados más uniformes entre las diferentes mezclas analizadas, debido a que se les restó el agregado grueso. En ellas las mezclas con pigmento amarillo fueron las que presentaron menor resistencia y las de referencia con cemento blanco las que tuvieron mayores valores de resistencia en todos los casos.

En el caso del ensayo a flexión de probetas prismáticas, dependiendo del pigmento empleado el tipo de cemento en los HACC no altera considerablemente el resultado, por ejemplo, si se analiza el resultado de las probetas con pigmento rojo, el menor resultado se da con cemento gris con 6.30 MPa y el mayor con cemento blanco 8.00 MPa, variando un 27%; mientras que en el caso del uso de pigmento azul la diferencia es menor, 7.30 MPa con cemento gris y 7.33 MPa con cemento blanco la variación es del 0,41%.

Para el caso de los ensayos a compresión efectuados sobre las mitades de las probetas prismáticas obtenidas luego del ensayo a flexión, se puede observar que la dispersión de resultados entre muestras es mayor, entre grupos de cementos se mantiene la tendencia de mayor resistencia mecánica de los hormigones con cemento blanco (cemento blanco y pigmento rojo 58.93 MPa), siendo los de menor resistencia los que contienen pigmento amarillo (cemento gris y pigmento amarillo 13.40 MPa).

Con respecto al ensayo de análisis en cámara UV, que es un análisis que determina el desempeño del material en lo referente a su estabilidad de color, se puede concluir que los hormigones de referencia sin pigmentar no muestran cambios significativos en el tiempo, mientras que cuando se emplean pigmentos los resultados dependiendo del color de pigmento los cambios pueden ser muy significativos.

Con respecto a las variables analizadas, ΔL^* (diferencia de luminosidad), C^* (saturación), y ΔE^* (diferencia total de color), los hormigones pigmentados presentan una diferencia de luminosidad cada vez mayor en las primeras semanas de ensayo, hasta un punto donde comienza a estabilizarse la misma. Con respecto a la saturación, todas las muestras de HAC y HACC mostraron permanecer muy estables al o largo del análisis de 1363 horas. La diferencia de color total en general es apreciable a simple vista para todos los HACC, pero son los de pigmento azul uno de los HACC más estables.

En general, todos los cúbos de HACC presentaron diferencias de color apreciables a simple vista. Las muestras de HACC que más varían son el rojo y el amarillo, siendo el azul uno de los colores más estables con respecto a su variación total.

Siempre que se trabaje con hormigones coloreados se debe tener en cuenta que determinados colores varían más con el transcurso del tiempo que otros en presencia de exposición al ambiente. Se debe tener en cuenta esta particularidad al momento de proyectar un color específico en una fachada o un pavimento; una posible forma de obtener un color deseado, es elaborar las piezas de HACC con menor luminosidad a la deseada en la pieza final.

Como aporte a estudios anteriores, se puede concluir que comparando los diferentes HACC analizados con cemento gris y HACC con cemento blanco, los hormigones con

menor variación de color total en todos los casos fueron realizados con cemento gris, incluso en colores como el rojo y el amarillo que son los de mayor variación.

En definitiva, se puede expresar como conclusión principal, que la incorporación de pigmentos para la elaboración de pinturas al HAC, incorporados en una dosis de 3% de pigmento en relación a la suma de la dosificación de cemento más polvo de electrofiltro, mejora la fluidez del hormigón, no altera la capacidad de ser autocompactante, no alterando en gran medida las propiedades estudiadas en estado fresco; disminuye la resistencia a compresión y a flexión dependiendo del color de pigmento empleado; y se alteran las propiedades vinculadas a la estabilidad del color con algunos pigmentos.

5.3- Sugerencias para investigaciones futuras.

De los resultados obtenidos se desprende la necesidad de seguir investigando en la temática de los hormigones autocompactantes coloreados debido al gran uso que este material está teniendo a nivel internacional, no siendo reflejado esto en la cantidad de investigaciones relacionadas al mismo.

Es importante seguir avanzando en la temática del hormigón coloreado con pigmentos para la elaboración de pinturas ya que son accesibles para cualquier usuario final, más precisamente hacer ensayos sobre poder de cubrición y costos comparando estos pigmentos con los elaborados específicamente para su uso en hormigón.

En otras líneas de investigación relacionadas sería interesante avanzar sobre otros ensayos en estado fresco como análisis de tiempos de fraguado y problemas de retracción con el uso de pigmentos para la elaboración de pinturas considerando lo ocurrido en el presente trabajo con el empleo del pigmento amarillo.

También es de relevancia avanzar en el análisis de algunas patologías comunes al HACC, como la aparición de eflorescencias en donde se puede trabajar en como disminuir su aparición, lo que conlleva a cambios de color de superficies; analizar aspectos relativos a la porosidad, que puede ser producto de algunas reacciones que se producen con el uso de pigmentos derivados de la producción de pinturas, y también la temática de la carbonatación estudiando la influencia de los pigmentos en el avance de la carbonatación al interior de la masa del material.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Ainchil, J.; García, F. y Álvarez, A. (2008). "Hormigones autocompactantes coloreados. El caso de la Ciudad de la justicia". In: Barragán BE, Álvarez AP, Serna Ros P, editors. Proceedings 1st Spanish congress on self-compacting concrete. Barcelona: Construction Press; p. 681–9.
2. American Concrete Institute, ACI 212 (1982). "Admixtures for concrete and guide for use of admixtures in concrete". Traducido por Ermilo Molina, revisión técnica, Ing. Roberto Cervantes, Editorial Limusa S.A., primera edición 1990, impreso en México; p. 87 y 88.
3. American Concrete Institute, ACI 303R-91 (1991). "Guide to Cast-In-Place Architectural Concrete Practice"; pp. 30.
4. American Society of Testing Materials (1980). ASTM Research Report. "Pigments for Integrally Colored Concrete", Journal of Cement, Concrete and Aggregates; p. 74-77.
5. American Society for Testing and Materials; ASTM D 1208 (1996) "Standard Test Method for Common Properties of Certain Pigments"; pp. 3.
6. 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"; pp. 5.
7. American Society for Testing and Materials; ASTM C 979 (1999) "Standard Specification for Pigments for Integrally Colored Concrete"; pp. 5.
8. American Society for Testing and Materials; ASTM D 280 (2012). "Test Methods for Hygroscopic Moisture (and Other Matter Volatile Under the Test Conditions) in Pigments"; pp. 2.
9. Bastie, J. (2013). "One Hundred Years of CIE and Evolution of Lighting". Light and Engineering, vol. 21, nº4; p. 11-20.
10. Bennett, D. (2005) "The art of precast concrete, colour texture expression", Birkhäuser – Publishers for Architecture, Basel – Berlin – Boston; pp. 161.
11. Bertolini, L. y Lollini, F. (2011). "Effects of weathering on colour of concrete paving blocks". European Journal of Environmental and Civil Engineering. Volume 15. Issue 6; p. 939-957.
12. British Standards Institution; BS 1014 (1975). "Specification for pigments for Portland cement and Portland cement products"; pp. 16.
13. British Standards Institution; Comité Europeo de Normalización; BS EN 12350:2010 (2010). "Testing Fresh Concrete"; pp. 14.
14. Comité Europeo de Normalización; EN 12878 (1999). "Pigments for the colouring of building materials based on cement and/or lime"; pp. 18.

15. Comité Europeo de Normalización; EN ISO 1248:2008 (2008). "Iron Oxide Pigments". Specifications And Methods Of Test; pp. 28.
16. Comité Europeo de Normalización; International Organization for Standardization; EN ISO 11664-4:2011 (2011). "Colorimetry". Part 4: Cie 1976 L*A*B* Colour Space; pp. 16.
17. Comité Europeo de Normalización; EN 12878:2014 (2014). "Pigments For The Colouring Of Building Materials Based On Cement And/Or Lime". Specifications And Methods Of Test; pp. 24.
18. Chinchón, S.; García, J.; López-Atalaya, M.; Linares, A.; Vera, R. (2004) "Cement paste colouring in concretes". Cement and concrete research, 34(11):1987-1991. Localizable on line en www.sciencedirect.com
19. Corinaldesi, V.; Monosi, S.; Ruello, M. (2012). "Influence of inorganic pigments addition on the performance of coloured SCC". Construction and Building Materials, 30: 289-293.
20. Craeye, B.; Tielemans, T.; Lauwereijssens, G. y Stoop, J. (2013). "Effect of super absorbing polymers on the freeze–thaw resistance of coloured concrete roads". Road Materials and Pavement Design, 14(1):90-106, <http://dx.doi.org/10.1080/14680629.2012.743670>
21. Comisión permanente del Hormigón EHE-08 (2011). "Instrucción de hormigón estructural". 5ª edición. https://www.fomento.gob.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/ORGANOS_COLEGIADOS/MASORGANOS/CPH/instrucciones/EHE_es/
22. Gani, M. (1997). "Cement and Concrete", 1:190-191, Published by Chapman & Hall.
23. Giraldo, C., Mendoza, O.; Tobón, J.; Restrepo, O.; Restrepo, J. (2010). "Durabilidad del cemento portland blanco adicionado con pigmento azul ultramar". Dyna 164:45-51.
24. Hatami, L. y Jamshidi, M. (2016). "Application of SBR-included pre-milled colored paste as a new approach for coloring self-consolidating mortars". Cement and Concrete Composites, 65:110-117.
25. Herbst, W. y Hunger, K. (2004). "Industrial Organic Pigments" Third Edition, Wiley-Vch Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, pp. 59.
26. Instituto Uruguayo de Normas Técnicas; UNIT NM 101:98 (1998). "Hormigón. Ensayo de compresión de probetas cilíndricas", pp. 7.
27. Instituto Uruguayo de Normas Técnicas; UNIT 1081:2002 (2002). "Hormigón. Procedimiento para la preparación y curado de probetas", pp. 10.
28. Instituto Uruguayo de Normas Técnicas; UNIT 1090:2004 (2004). "Hormigón. Método para el uso de encabezado con placas de elastómero en la

- determinación de la resistencia a la compresión de probetas cilíndricas de hormigón”, pp. 12.
29. Instituto Uruguayo de Normas Técnicas; UNIT ISO 679:2009 (2009). “Métodos de ensayo de cementos. Determinación de resistencias mecánicas”, pp. 38.
 30. International Organization for Standardization; ISO 877-1, part 1: General Guidance (2009). “Métodos de exposición a la radiación solar”, pp. 13.
 31. International Organization for Standardization; ISO 877-2, part 2: Direct weathering and exposure behind window glass (2009). “Métodos de exposición a la radiación solar”, pp. 6.
 32. International Organization for Standardization; ISO 877-3, part 3: Intensified weathering using concentrated solar radiation (2009). “Métodos de exposición a la radiación solar”, pp. 11.
 33. Ivanauskas, E. y Grigonis, D. (2009). “Pigmentu itakos savaimė sutank_jancio betono savyb_ms tyrimai”. Revista Ciencia – Futuro de Lituania, “Kauno technologijos universitetas”, 5(1):10-14.
 34. Jang, H. S.; Kang, H. S. y So, S. Y. (2013). “Color Expression Characteristics and Physical Properties of Colored Mortar using Ground Granulated Blast Furnace Slag and White Portland Cement”. KSCE Journal of Civil Engineering 18: 1125-1132.
 35. Kaufman, R. (1924). “Surfacing and coloring concrete”. Patente US1515121A. Patente de Estados Unidos, pp. 1.
 36. Kosmatka, S.; Kerkhoff, B. y Panarese, W. (2008). “Design and Control of Concrete Mixtures”. Portland Cement Association 14: 115-116.
 37. Kořátková, J. y Reiterman, P. (2014) “Coloured Concrete with Focus on the Properties of Pigments”. Advanced Materials Research 1054: 248-253.
 38. Lee, H. S.; Lee J. Y.; Yu, M. Y. (2005). “Influence of inorganic pigments on the fluidity of cement mortars”. Cement and Concrete Research 35(4):703-710.
 39. López, A.; Guzmán, G.; Di Sarli, A. (2016). “Color stability in mortars and concretes. Part 1: Study on architectural mortars”. Construction and Building Materials 120: 617-622.
 40. López, A.; Guzmán, G.; Di Sarli, A. (2016). “Color stability in mortars and concretes. Part 2: Study on architectural concretes”. Construction and Building Materials 123: 248-253.
 41. López, A.; Tobes, J.; Positieri, M. y Zerbino, R. (2007). “Medición del color en materiales a base de cemento portland”. Revista Ciencia y Tecnología del Hormigón 14: 25-36.
 42. López, A.; Tobes, J.; Giaccio, G. y Zerbino, R. (2009). “Advantages of mortar-based design for coloured self-compacting concrete”. Cement & Concrete Composites 31: 754-761.

43. López, A. (2013). "Patrimonio moderno: evaluación de los aspectos estéticos que modifican la apariencia del hormigón". 3º Congreso Iberoamericano y XI Jornada Técnicas de Restauración y Conservación del Patrimonio 39(4): 1-13.
44. Neville, A. (2012). "Properties of concrete". 5ª edición. Pearson Education Limited, pp. 238.
45. Oner, A. y Akyuz, S. (2007). "An experimental study on optimum usage of GGBS for the compressive strength of concrete". Cement and Concrete Composites 29: 505-514.
46. Perry, C.; Dulaney, D. y Moore, J. (2004). "Organic pigment dispersion for coloring building materials". Patente US6786965 B2. Patente de Estados Unidos, pp. 4.
47. Positieri, M. (2005). "Propiedades fisicomecánicas 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, pp. 239.
48. Rodríguez, G.; Rodríguez, I.; Rolfi, R. (2015). "Desarrollo de Hormigones Autocompactantes (HAC) económicos con resistencias características a compresión medias". Informe Final PROYECTO CSIC I+D 259, CSIC, UdelaR, pp. 56.
49. Rodríguez de Sensale, G.; Rodríguez Viacava, V.; Rolfi Netto, R. (2015). "Método para la dosificación de HAC con resistencias características medias y de bajo costo, apropiado a los materiales disponibles en nuestro medio". Informe Final Proyecto CSIC I+D 259, UdelaR, pp. 44.
50. Scripture, E. (1934). "Coloring concrete". Patente US1982541A. Patente de Estados Unidos, pp. 3.
51. Stratton, S.; Arnold, P; Crawford, J.; Dhaliwai, P. (2012). "High SRI cementitious systems for colored concrete". Patente US 8157910 B2. Patente de Estados Unidos, pp. 8.
52. Szadkowski, G. (1980). "The effect of pigments on the quality of concrete blocks". Proc. 1st Int. Conf. On CBP, p. 155-156, ubicación del archivo https://www.icpi.org/sites/default/files/resources/technical-papers/91_0.pdf
53. Tajne, K.; Thakare, N. (2009). "Architectural & Decorative Construction Using Coloured Concrete Sample", Second International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology. ICETET 09: 444-446.

ANEXOS

ANEXO A – RESULTADOS DE ENSAYOS EN ESTADO FRESCO.

HORMIGÓN TIPO:	Hormigón autocompactante con cemento blanco y pigmento rojo				
DATOS EN ESTADO FRESCO					
CONO DE ABRAMS					
	T 50 s	D 1 (cm)	D 2 (cm)	Promedio (cm)	
	2,5	81	80	80,5	
CONO DE ABRAMS + ANILLO J					
Dj1 (cm)	Dj2 (cm)	H1 (cm)	H2 (cm)	Escurrimiento (D1+D2)/2	
77	75	20,4	20	76	
Escurrimiento Dj		D (cm)		Dj ≥ D-50mm	
76		80,5		76 ≥ 75.5 cm Verifica	
Observaciones: Ver Foto 1, 2 y 3 - Escurrimiento normal en ambos ensayos.					

HORMIGÓN TIPO:	Hormigón autocompactante con cemento blanco y pigmento amarillo				
DATOS EN ESTADO FRESCO					
CONO DE ABRAMS					
	T 50 s	D 1 (cm)	D 2 (cm)	Promedio (cm)	
	2	86	84	85	
CONO DE ABRAMS + ANILLO J					
Dj1 (cm)	Dj2 (cm)	H1 (cm)	H2 (cm)	Escurrimiento (D1+D2)/2	
82	80	20,5	20,3	81	
Dj1-Dj2		H1-H2		Dj ≥ D-50mm	
2		0,2		SI	
Observaciones: Ver Foto 4 - Escurrimiento con acumulación de agregados en el centro. Luego de 30 min se observa gran retracción en moldes cilíndricos					

HORMIGÓN TIPO:	Hormigón autocompactante con cemento blanco y pigmento azul
-----------------------	---

DATOS EN ESTADO FRESCO					
CONO DE ABRAMS					
	T 50 s	D 1 (cm)	D 2 (cm)	Promedio (cm)	
	2,2	83	81	82	
CONO DE ABRAMS + ANILLO J					
Dj1 (cm)	Dj2 (cm)	H1 (cm)	H2 (cm)	Escurrimiento (D1+D2)/2	
82	80	20,5	20,2	81	
Dj1-Dj2		H1-H2		Dj ≥ D-50mm	
2		0,3		SI	
Observaciones: Ver Foto 5 - Escurrimiento con acumulación de agregados en el centro. Luego de 30 min se observa retracción en moldes cilíndricos					

HORMIGÓN TIPO:	Hormigón autocompactante con cemento gris y pigmento rojo
-----------------------	---

DATOS EN ESTADO FRESCO					
CONO DE ABRAMS					
	T 50 s	D 1 (cm)	D 2 (cm)	Promedio (cm)	
	3	70,5	70	70,25	
CONO DE ABRAMS + ANILLO J					
Dj1 (cm)	Dj2 (cm)	H1 (cm)	H2 (cm)	Escurrimiento (D1+D2)/2	
67,5	67	20,5	20	67,25	
Dj1-Dj2		H1-H2		Dj ≥ D-50mm	
0,5		0,5		SI	
Observaciones: Ver Foto 6, 7 y 8 - Escurrimiento normal en ambos ensayos.					

HORMIGÓN TIPO:	Hormigón autocompactante con cemento gris y pigmento azul
-----------------------	---

DATOS EN ESTADO FRESCO					
CONO DE ABRAMS					
	T 50 s	D 1 (cm)	D 2 (cm)	Promedio (cm)	
	2,9	71	70	70,5	
CONO DE ABRAMS + ANILLO J					
Dj1 (cm)	Dj2 (cm)	H1 (cm)	H2 (cm)	Escurecimiento (D1+D2)/2	
69	68	20,4	20	68,5	
Dj1-Dj2		H1-H2		Dj ≥ D-50mm	
1		0,4		SI	
Observaciones: Ver Foto 9, 10 y 11 - Escurecimiento normal en ambos ensayos.					

HORMIGÓN TIPO:	Hormigón autocompactante con cemento gris y pigmento amarillo
-----------------------	---

DATOS EN ESTADO FRESCO					
CONO DE ABRAMS					
	T 50 s	D 1 (cm)	D 2 (cm)	Promedio (cm)	
	2,6	69	66	67,5	
CONO DE ABRAMS + ANILLO J					
Dj1 (cm)	Dj2 (cm)	H1 (cm)	H2 (cm)	Escurecimiento (D1+D2)/2	
65,5	65	20,5	20	65,25	
Dj1-Dj2		H1-H2		Dj ≥ D-50mm	
0,5		0,5		SI	
Observaciones: Ver Foto 12, 13 y 14 - Escurecimiento normal en ambos ensayos.					

HORMIGÓN TIPO:	Hormigón autocompactante con cemento blanco sin pigmento
-----------------------	--

DATOS EN ESTADO FRESCO					
CONO DE ABRAMS					
	T 50 s	D 1 (cm)	D 2 (cm)	Promedio (cm)	
	3	78	75	76,5	
CONO DE ABRAMS + ANILLO J					
Dj1 (cm)	Dj2 (cm)	H1 (cm)	H2 (cm)	Escurrimiento (D1+D2)/2	
73	72	20,8	20,5	72,5	
Dj1-Dj2		H1-H2		Dj ≥ D-50mm	
1		0,3		SI	
Observaciones: Ver Foto 15 y 16 - Escurrimiento normal en ambos ensayos.					

HORMIGÓN TIPO:	Hormigón autocompactante con cemento gris sin pigmento
-----------------------	--

DATOS EN ESTADO FRESCO					
CONO DE ABRAMS					
	T 50 s	D 1 (cm)	D 2 (cm)	Promedio (cm)	
	3,5	69	68	68,5	
CONO DE ABRAMS + ANILLO J					
Dj1 (cm)	Dj2 (cm)	H1 (cm)	H2 (cm)	Escurrimiento (D1+D2)/2	
65	64	20,6	20	64,5	
Dj1-Dj2		H1-H2		Dj ≥ D-50mm	
1		0,6		SI	
Observaciones: Ver Foto 16 y 17 - Escurrimiento normal en ambos ensayos.					

ANEXO B - RESULTADOS DE ENSAYOS EN ESTADO ENDURECIDO.

HORMIGÓN TIPO:	Hormigón autocompactante con cemento blanco y pigmento rojo
-----------------------	---

DATOS DE LA PROBETA CILÍNDRICA					
Número	Código	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Masa (kg)	Edad al momento de la rotura (días)
1	RHA1	102	200	3,698	33
2	RHA2	99	200,5	3,47	33
3	RHA3	99	200,5	3,467	33
ENSAYO A COMPRESIÓN DE PROBETA					
Número	Código	Resistencia a compresión (MPa)	Media (MPa)	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación
1	RHA1	47,62			
2	RHA2	47,30	46,45	1,756672992	4%
3	RHA3	44,43			

DATOS DE LA PROBETA PRISMÁTICA					
Número	Código	Largo (mm)	Altura (mm)	Ancho (mm)	Masa (kg)
1	RHA1	40	40	160	0,588
2	RHA2	40	40	160	0,587
3	RHA3	40	40	160	0,596
ENSAYO A TRACCIÓN DE PROBETA					
Número	Código	Resistencia a tracción (MPa)	Media (MPa)	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación
1	RHA1	8,20			
2	RHA2	7,90	8	0,173205081	2%
3	RHA3	7,90			
ENSAYO A COMPRESIÓN DE MITADES DE PROBETA (luego de ensayo anterior)					
Número	Código	Resistencia a compresión	Media (MPa)	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación
1	RHA1,1	56,05			
2	RHA1,2	59,68	58,93	1,759349312	3%
3	RHA2,1	59,80			
4	RHA2,2	60,30			
5	RHA3,1	57,45			
6	RHA3,2	60,27			

Resultado distinto a las probetas cilíndricas.

HORMIGÓN TIPO:	Hormigón autocompactante con cemento blanco y pigmento amarillo
-----------------------	---

DATOS DE LA PROBETA CILÍNDRICA					
Número	Código	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Masa (kg)	Edad al momento de la rotura (días)
1	AHA1	100	164	2,6	33
2	AHA2	102	185	3,22	33
3	AHA3	99	164	2,64	33
ENSAYO A COMPRESIÓN DE PROBETA					
Número	Código	Resistencia a compresión (MPa)	Media (MPa)	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación
1	AHA1	37,47			
2	AHA2	23,01	35,47	2,835498193	8%
3	AHA3	33,46	media, desv. y coeficiente sin considerar valor de AHA2		

DATOS DE LA PROBETA PRISMÁTICA					
Número	Código	Largo (mm)	Altura (mm)	Ancho (mm)	Masa (kg)
1	AHA1	40	40	160	0,549
2	AHA2	40	40	160	0,571
3	AHA3	40	40	160	0,556
ENSAYO A TRACCIÓN DE PROBETA					
Número	Código	Resistencia a tracción (MPa)	Media (MPa)	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación
1	AHA1	4,90			
2	AHA2	5,30	5,03	0,230940108	5%
3	AHA3	4,90			
ENSAYO A COMPRESIÓN DE MITADES DE PROBETA (luego de ensayo anterior)					
Número	Código	Resistencia a compresión	Media (MPa)	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación
1	AHA1,1	27,50			
2	AHA1,2	28,80	35,00	1,518771433	4%
3	AHA2,1	33,10	Sin considerar para media, desviación y coeficiente de variación los valores de AHA1,1 AHA1,2 Resultado muy parecido a las probetas cilíndricas		
4	AHA2,2	34,50			
5	AHA3,1	35,90			
6	AHA3,2	36,50			

HORMIGÓN TIPO:	Hormigón autocompactante con cemento blanco y pigmento azul
-----------------------	---

DATOS DE LA PROBETA CILÍNDRICA					
Número	Código	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Masa (kg)	Edad al momento de la rotura (días)
1	AZA1	99,5	188,5	3,364	33
2	AZA2	101,5	186	3,43	33
3	AZA3	102,5	180	3,27	33
ENSAYO A COMPRESIÓN DE PROBETA					
Número	Código	Resistencia a compresión (MPa)	Media (MPa)	Desviación Estándar	Coficiente de Variación
1	AZA1	34,44			
2	AZA2	35,48	34,96	0,735391052	2%
3	AZA3	41,61	media, desv. y coeficiente sin considerar valor de AZA3		

DATOS DE LA PROBETA PRISMÁTICA					
Número	Código	Largo (mm)	Altura (mm)	Ancho (mm)	Masa (kg)
1	AZA1	40	40	160	0,578
2	AZA2	40	40	160	0,589
3	AZA3	40	40	160	0,587
ENSAYO A TRACCIÓN DE PROBETA					
Número	Código	Resistencia a tracción (MPa)	Media (MPa)	Desviación Estándar	Coficiente de Variación
1	AZA1	6,90			
2	AZA2	7,90	7,33	0,513160144	7%
3	AZA3	7,20			
ENSAYO A COMPRESIÓN DE MITADES DE PROBETA (luego de ensayo anterior)					
Número	Código	Resistencia a compresión	Media (MPa)	Desviación Estándar	Coficiente de Variación
1	AZA1,1	57,20			
2	AZA1,2	54,62	50,46	5,087376534	10%
3	AZA2,1	42,95	Sin considerar para media, desviación y coeficiente de variación el valor de AZA2,1 Resultado muy distinto a las probetas cilíndricas.		
4	AZA2,2	46,62			
5	AZA3,1	47,68			
6	AZA3,2	46,18			

HORMIGÓN TIPO:	Hormigón autocompactante con cemento gris y pigmento rojo
-----------------------	---

DATOS DE LA PROBETA CILÍNDRICA

Número	Código	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Masa (kg)	Edad al momento de la rotura (días)
1	RCB1	99	201	3,224	33
2	RCB2	103	200,5	3,5	33
3	RCB3	102,5	200	3,453	33

ENSAYO A COMPRESIÓN DE PROBETA

Número	Código	Resistencia a compresión (MPa)	Media (MPa)	Desviación Estándar	Coficiente de Variación
1	RCB1	28,11			
2	RCB2	27,72	28,35	0,778267306	3%
3	RCB3	29,22			

DATOS DE LA PROBETA PRISMÁTICA

Número	Código	Largo (mm)	Altura (mm)	Ancho (mm)	Masa (kg)
1	RCB1	40	40	160	0,529
2	RCB2	40	40	160	0,54
3	RCB3	40	40	160	0,517

ENSAYO A TRACCIÓN DE PROBETA

Número	Código	Resistencia a tracción (MPa)	Media (MPa)	Desviación Estándar	Coficiente de Variación
1	RCB1	6,20			
2	RCB2	6,30	6,30	0,1	2%
3	RCB3	6,40			

ENSAYO A COMPRESIÓN DE MITADES DE PROBETA (luego de ensayo anterior)

Número	Código	Resistencia a compresión	Media (MPa)	Desviación Estándar	Coficiente de Variación
1	RCB1,1	31,30			
2	RCB1,2	30,20	30,05	0,967815409	3%
3	RCB2,1	21,70			
4	RCB2,2	25,60			
5	RCB3,1	29,00			
6	RCB3,2	29,70			

Sin considerar para media, desviación y coeficiente de variación los valores de RCB2,1 y RCB2,2
Resultado parecido a las probetas cilíndricas

HORMIGÓN TIPO:	Hormigón autocompactante con cemento gris y pigmento azul
-----------------------	---

DATOS DE LA PROBETA CILÍNDRICA					
--------------------------------	--	--	--	--	--

Número	Código	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Masa (kg)	Edad al momento de la rotura (días)
1	AZB1	100	200	3,35	33
2	AZB2	102	199,5	3,555	33
3	AZB3	102	199,5	3,552	33

ENSAYO A COMPRESIÓN DE PROBETA					
--------------------------------	--	--	--	--	--

Número	Código	Resistencia a compresión (MPa)	Media (MPa)	Desviación Estándar	Coficiente de Variación
1	AZB1	30,13			
2	AZB2	32,29	31,08	1,103222552	4%
3	AZB3	30,82			

DATOS DE LA PROBETA PRISMÁTICA					
--------------------------------	--	--	--	--	--

Número	Código	Largo (mm)	Altura (mm)	Ancho (mm)	Masa (kg)
1	AZB1	40	40	160	0,59
2	AZB2	40	40	160	0,565
3	AZB3	40	40	160	0,561

ENSAYO A TRACCIÓN DE PROBETA					
------------------------------	--	--	--	--	--

Número	Código	Resistencia a tracción (MPa)	Media (MPa)	Desviación Estándar	Coficiente de Variación
1	AZB1	7,70			
2	AZB2	7,50	7,30	0,529150262	7%
3	AZB3	6,70			

ENSAYO A COMPRESIÓN DE MITADES DE PROBETA (luego de ensayo anterior)					
--	--	--	--	--	--

Número	Código	Resistencia a compresión	Media (MPa)	Desviación Estándar	Coficiente de Variación
1	AZB1,1	36,40			
2	AZB1,2	36,70	36,10	0,889943818	2%
3	AZB2,1	37,40			
4	AZB2,2	35,60			
5	AZB3,1	35,50			
6	AZB3,2	35,00			

Resultado parecido a las probetas cilíndricas

HORMIGÓN TIPO:	Hormigón autocompactante con cemento gris y pigmento amarillo
-----------------------	---

DATOS DE LA PROBETA CILÍNDRICA					
Número	Código	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Masa (kg)	Edad al momento de la rotura (días)
1	AHB1	101	200	2,858	33
2	AHB2	100	201	2,889	33
3	AHB3	99	201	2,792	33
ENSAYO A COMPRESIÓN DE PROBETA					
Número	Código	Resistencia a compresión (MPa)	Media (MPa)	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación
1	AHB1	14,07			
2	AHB2	14,61	14,51	0,403773864	3%
3	AHB3	14,86			

DATOS DE LA PROBETA PRISMÁTICA					
Número	Código	Largo (mm)	Altura (mm)	Ancho (mm)	Masa (kg)
1	AHB1	40	40	160	0,471
2	AHB2	40	40	160	0,477
3	AHB3	40	40	160	0,462
ENSAYO A TRACCIÓN DE PROBETA					
Número	Código	Resistencia a tracción (MPa)	Media (MPa)	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación
1	AHB1	4,10			
2	AHB2	4,10	4,00	0,173205081	4%
3	AHB3	3,80			
ENSAYO A COMPRESIÓN DE MITADES DE PROBETA (luego de ensayo anterior)					
Número	Código	Resistencia a compresión	Media (MPa)	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación
1	AHB1,1	13,90			
2	AHB1,2	12,70	13,40	0,6164414	5%
3	AHB2,1	12,90			
4	AHB2,2	13,10			
5	AHB3,1	14,30			
6	AHB3,2	13,50			

Resultado parecido a las probetas cilíndricas

HORMIGÓN TIPO:	Hormigón autocompactante con cemento blanco sin pigmento
-----------------------	--

DATOS DE LA PROBETA CILÍNDRICA					
Número	Código	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Masa (kg)	Edad al momento de la rotura (días)
1	HACB1	99,5	201,5	3,533	33
2	HACB2	100	201,5	3,636	33
3	HACB3	98	202	3,511	33

ENSAYO A COMPRESIÓN DE PROBETA					
Número	Código	Resistencia a compresión (MPa)	Media (MPa)	Desviación Estándar	Coficiente de Variación
1	HACB1	57,34			
2	HACB2	59,23	58,86	1,368734208	2%
3	HACB3	60,00			

DATOS DE LA PROBETA PRISMÁTICA					
Número	Código	Largo (mm)	Altura (mm)	Ancho (mm)	Masa (kg)
1	HACB1	40	40	160	0,602
2	HACB2	40	40	160	0,610
3	HACB3	40	40	160	0,617

ENSAYO A TRACCIÓN DE PROBETA					
Número	Código	Resistencia a tracción (MPa)	Media (MPa)	Desviación Estándar	Coficiente de Variación
1	HACB1	11,00			
2	HACB2	10,20	10,23	0,75055535	7%
3	HACB3	9,50			

ENSAYO A COMPRESIÓN DE MITADES DE PROBETA (luego de ensayo anterior)					
Número	Código	Resistencia a compresión	Media (MPa)	Desviación Estándar	Coficiente de Variación
1	HACB1,1	72,50			
2	HACB1,2	73,40	73,24	1,535187285	2%
3	HACB2,1	73,50			
4	HACB2,2	73,14			
5	HACB3,1	71,10			
6	HACB3,2	75,80			

Resultado muy distinto a las probetas cilíndricas.

HORMIGÓN TIPO:	Hormigón autocompactante con cemento gris sin pigmento
-----------------------	--

DATOS DE LA PROBETA CILÍNDRICA

Número	Código	Diámetro promedio (mm)	Altura promedio (mm)	Masa (kg)	Edad al momento de la rotura (días)
1	HAC1	100	201	3,523	33
2	HAC2	102	201	3,700	33
3	HAC3	99,5	201	3,424	33

ENSAYO A COMPRESIÓN DE PROBETA

Número	Código	Resistencia a compresión (MPa)	Media (MPa)	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación
1	HAC1	36,92			
2	HAC2	37,50	36,66	0,995791143	3%
3	HAC3	35,56			

DATOS DE LA PROBETA PRISMÁTICA

Número	Código	Largo (mm)	Altura (mm)	Ancho (mm)	Masa (kg)
1	HAC1	40	40	160	0,585
2	HAC2	40	40	160	0,587
3	HAC3	40	40	160	0,593

ENSAYO A TRACCIÓN DE PROBETA

Número	Código	Resistencia a tracción (MPa)	Media (MPa)	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación
1	HAC1	7,40			
2	HAC2	7,20	7,30	0,1	1%
3	HAC3	7,30			

ENSAYO A COMPRESIÓN DE MITADES DE PROBETA (luego de ensayo anterior)

Número	Código	Resistencia a compresión	Media (MPa)	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación
1	HAC1,1	44,00			
2	HAC1,2	45,40	44,90	0,707106781	2%
3	HAC2,1	44,90			
4	HAC2,2	45,70			
5	HAC3,1	44,10			
6	HAC3,2	45,30			

Resultado distinto a las probetas cilíndricas.

ANEXO C - TABLAS DE CÁLCULO DE VALORES CIE L* a* b*.

n°	MUESTRA		COORDENADA PROMEDIO	HORAS											
	CEMENTO	COLOR		0	98	201	302	402	499	599	869	967	1059	1152	1363
1	BLANCO	ROJO	L*	71,35	75,10	76,85	78,10	79,05	79,50	79,85	81,55	81,95	82,30	82,55	82,70
			a*	16,10	13,70	12,90	12,30	12,80	12,65	12,95	12,85	12,65	12,40	12,05	12,15
			b*	4,45	2,50	3,20	3,85	3,00	3,30	3,40	3,15	3,10	3,25	3,35	3,55
			ΔL*	0,00	3,75	5,50	6,75	7,70	8,15	8,50	10,20	10,60	10,95	11,20	11,35
			Δa*	0,00	-2,40	-3,20	-3,80	-3,30	-3,45	-3,15	-3,25	-3,45	-3,70	-4,05	-3,95
			Δb*	0,00	-1,95	-1,25	-0,60	-1,45	-1,15	-1,05	-1,30	-1,35	-1,20	-1,10	-0,90
			C*	16,70	13,93	13,29	12,89	13,15	13,07	13,39	13,23	13,02	12,82	12,51	12,66
			ΔC*	0,00	3,09	3,44	3,85	3,60	3,64	3,32	3,50	3,70	3,89	4,20	4,05
			E*	73,28	76,38	77,99	79,16	80,14	80,57	80,96	82,62	82,98	83,29	83,49	83,66
ΔE*	0,00	4,86	6,48	7,77	8,50	8,92	9,13	10,78	11,23	11,62	11,96	12,05			

2	GRIS	ROJO	L*	62,60	63,15	63,60	63,80	64,20	64,50	64,65	65,05	65,35	65,20	64,95	64,70
			a*	10,65	11,45	11,15	11,60	10,60	11,20	11,65	11,20	11,25	10,85	10,60	10,15
			b*	-0,15	0,35	2,00	2,30	1,60	1,80	1,95	1,70	1,70	1,95	2,10	2,40
			ΔL*	0,00	0,55	1,00	1,20	1,60	1,90	2,05	2,45	2,75	2,60	2,35	2,10
			Δa*	0,00	0,80	0,50	0,95	-0,05	0,55	1,00	0,55	0,60	0,20	-0,05	-0,50
			Δb*	0,00	0,50	2,15	2,45	1,75	1,95	2,10	1,85	1,85	2,10	2,25	2,55
			C*	10,65	11,46	11,33	11,83	10,72	11,34	11,81	11,33	11,38	11,02	10,81	10,43
			ΔC*	0,00	0,94	2,21	2,63	1,75	2,03	2,33	1,93	1,94	2,11	2,25	2,60
			E*	63,50	64,18	64,60	64,89	65,09	65,49	65,72	66,03	66,33	66,13	65,84	65,54
ΔE*	0,00	1,09	2,42	2,89	2,37	2,78	3,10	3,12	3,37	3,35	3,25	3,34			

n°	MUESTRA		COORDENADA PROMEDIO	HORAS											
	CEMENTO	COLOR		0	98	201	302	402	499	599	869	967	1059	1152	1363
1	BLANCO	AZUL	L*	72,60	73,10	73,50	73,85	74,50	74,60	75,30	76,40	76,65	76,70	76,90	77,05
			a*	1,15	0,50	-0,20	0,25	0,50	0,55	0,70	0,90	0,85	0,75	0,75	0,85
			b*	-12,60	-13,00	-12,65	-12,90	-12,95	-12,9	-13,00	-12,65	-12,75	-12,65	-12,80	-12,75
			ΔL*	0,00	0,50	0,90	1,25	1,90	2,00	2,70	3,80	4,05	4,10	4,30	4,45
			Δa*	0,00	-0,65	-1,35	-0,90	-0,65	-0,60	-0,45	-0,25	-0,30	-0,40	-0,40	-0,30
			Δb*	0,00	-0,40	-0,05	-0,30	-0,35	-0,30	-0,40	-0,05	-0,15	-0,05	-0,20	-0,15
			C*	12,65	13,01	12,65	12,90	12,96	12,91	13,02	12,68	12,78	12,67	12,82	12,78
			ΔC*	0,00	0,76	1,35	0,95	0,74	0,67	0,60	0,25	0,34	0,40	0,45	0,34
			E*	73,69	74,25	74,58	74,97	75,62	75,71	76,42	77,45	77,71	77,74	77,96	78,10
ΔE*	0,00	0,91	1,62	1,57	2,04	2,11	2,77	3,81	4,06	4,12	4,32	4,46			

2	GRIS	AZUL	L*	69,75	70,00	70,00	70,35	70,85	71,95	72,50	73,50	73,75	73,75	73,80	73,85
			a*	0,65	0,90	0,65	0,25	-0,15	0,00	0,45	0,70	0,60	0,50	0,50	0,50
			b*	-9,20	-10,30	-10,80	-11,25	-10,50	-9,65	-9,30	-9,45	-9,45	-9,50	-9,60	-9,60
			ΔL*	0,00	0,25	0,25	0,60	1,10	2,20	2,75	3,75	4,00	4,00	4,05	4,10
			Δa*	0,00	0,25	0,00	-0,40	-0,80	-0,65	-0,20	0,05	-0,05	-0,15	-0,15	-0,15
			Δb*	0,00	-1,10	-1,60	-2,05	-1,30	-0,45	-0,10	-0,25	-0,25	-0,30	-0,40	-0,40
			C*	9,22	10,34	10,82	11,25	10,50	9,65	9,31	9,48	9,47	9,51	9,61	9,61
			ΔC*	0,00	1,13	1,60	2,09	1,53	0,79	0,22	0,25	0,25	0,34	0,43	0,43
			E*	70,36	70,76	70,83	71,24	71,62	72,59	73,10	74,11	74,36	74,36	74,42	74,47
ΔE*	0,00	1,16	1,62	2,17	1,88	2,34	2,76	3,76	4,01	4,01	4,07	4,12			

n°	MUESTRA		COORDENADA PROMEDIO	HORAS											
	CEMENTO	COLOR		0	98	201	302	402	499	599	869	967	1059	1152	1363
1	BLANCO	AMARILLO	L*	79,55	80,15	80,65	80,95	81,40	81,90	82,20	82,55	82,90	82,85	83,05	83,15
			a*	3,45	3,15	2,60	2,50	2,25	1,90	1,65	1,95	1,90	2,00	1,90	1,85
			b*	15,50	12,75	11,05	10,20	9,70	9,65	9,85	9,05	9,35	9,05	9,20	9,20
			ΔL^*	0,00	0,60	1,10	1,40	1,85	2,35	2,65	3,00	3,35	3,30	3,50	3,60
			Δa^*	0,00	-0,30	-0,85	-0,95	-1,20	-1,55	-1,80	-1,50	-1,55	-1,45	-1,55	-1,60
			Δb^*	0,00	-2,75	-4,45	-5,30	-5,80	-5,85	-5,65	-6,45	-6,15	-6,45	-6,30	-6,30
			C*	15,88	13,13	11,35	10,50	9,96	9,84	9,99	9,26	9,54	9,27	9,39	9,38
			ΔC^*	0,00	2,77	4,53	5,38	5,92	6,05	5,93	6,62	6,34	6,61	6,49	6,50
			E*	81,12	81,22	81,44	81,63	82,01	82,49	82,80	83,07	83,45	83,37	83,58	83,68
ΔE^*	0,00	2,83	4,66	5,56	6,21	6,49	6,49	7,27	7,17	7,39	7,37	7,43			

2	GRIS	AMARILLO	L*	73,50	74,70	75,40	75,65	76,00	76,50	76,85	77,35	77,70	77,70	77,80	77,85
			a*	4,10	3,35	2,15	1,70	1,20	1,10	0,75	0,50	0,65	0,65	0,70	0,65
			b*	9,20	9,65	9,80	9,80	9,55	10,00	10,35	10,05	10,10	10,00	10,10	9,90
			ΔL^*	0,00	1,20	1,90	2,15	2,50	3,00	3,35	3,85	4,20	4,20	4,30	4,35
			Δa^*	0,00	-0,75	-1,95	-2,40	-2,90	-3,00	-3,35	-3,60	-3,45	-3,45	-3,40	-3,45
			Δb^*	0,00	0,45	0,60	0,60	0,35	0,80	1,15	0,85	0,90	0,80	0,90	0,70
			C*	10,07	10,21	10,03	9,95	9,63	10,06	10,38	10,06	10,12	10,02	10,12	9,92
			ΔC^*	0,00	0,87	2,04	2,47	2,92	3,10	3,54	3,70	3,57	3,54	3,52	3,52
			E*	74,19	75,40	76,06	76,30	76,61	77,16	77,55	78,00	78,36	78,34	78,46	78,48
ΔE^*	0,00	1,48	2,79	3,28	3,84	4,32	4,88	5,34	5,51	5,49	5,56	5,60			

n°	MUESTRA		COORDENADA PROMEDIO	HORAS											
	CEMENTO	COLOR		0	98	201	302	402	499	599	869	967	1059	1152	1363
1	BLANCO		L*	80,50	81,10	81,35	81,80	82,00	82,20	82,35	82,60	82,75	82,65	82,65	82,75
			a*	-1,05	-1,10	-1,00	-0,70	-0,80	-0,90	-0,95	-1,10	-1,10	-1,15	-1,05	-1,15
			b*	3,20	3,50	3,50	3,75	3,25	3,75	3,50	3,60	3,60	3,45	3,60	3,60
			ΔL^*	0,00	0,60	0,85	1,30	1,50	1,70	1,85	2,10	2,25	2,15	2,15	2,25
			Δa^*	0,00	-0,05	0,05	0,35	0,25	0,15	0,10	-0,05	-0,05	-0,10	0,00	-0,10
			Δb^*	0,00	0,30	0,30	0,55	0,05	0,55	0,30	0,40	0,40	0,25	0,40	0,40
			C*	3,37	3,67	3,64	3,81	3,35	3,86	3,63	3,76	3,76	3,64	3,75	3,78
			ΔC^*	0,00	0,30	0,30	0,65	0,25	0,57	0,32	0,40	0,40	0,27	0,40	0,41
			E*	80,57	81,18	81,43	81,89	82,07	82,29	82,43	82,69	82,84	82,73	82,74	82,84
ΔE^*	0,00	0,67	0,90	1,45	1,52	1,79	1,88	2,14	2,29	2,17	2,19	2,29			

2	GRIS		L*	67,30	67,50	67,60	67,80	67,95	68,15	68,20	68,40	68,60	68,50	68,60	68,70
			a*	-0,70	-0,95	-1,25	-1,05	-1,60	-1,45	-1,60	-1,20	-1,35	-1,25	-1,35	-1,35
			b*	4,50	5,15	5,20	5,65	5,40	5,05	5,30	5,45	5,35	5,40	5,25	5,35
			ΔL^*	0,00	0,20	0,30	0,50	0,65	0,85	0,90	1,10	1,30	1,20	1,30	1,40
			Δa^*	0,00	-0,25	-0,55	-0,35	-0,90	-0,75	-0,90	-0,50	-0,65	-0,55	-0,65	-0,65
			Δb^*	0,00	0,65	0,70	1,15	0,90	0,55	0,80	0,95	0,85	0,90	0,75	0,85
			C*	4,55	5,24	5,35	5,75	5,63	5,25	5,54	5,58	5,52	5,54	5,42	5,52
			ΔC^*	0,00	0,70	0,89	1,20	1,27	0,93	1,20	1,07	1,07	1,05	0,99	1,07
			E*	67,45	67,70	67,81	68,04	68,18	68,35	68,42	68,63	68,82	68,72	68,81	68,92
ΔE^*	0,00	0,72	0,94	1,30	1,43	1,26	1,50	1,54	1,68	1,60	1,64	1,76			

ANEXO D – FICHAS TÉCNICAS DE PIGMENTOS UTILIZADOS.

Anexo D-1: PIGMENTO ROJO.



AkzoNobel

FICHA DE DATOS CONCENTRADO ROJO

1. Identificación del producto y la compañía

Identificador SGA del producto: CONCENTRADO ROJO

Tipo del producto: Líquido.

Usos recomendados del producto y restricciones de uso: No aplicable.

Uso del producto: Colorante base agua.

Datos del Proveedor:

Pinturas INCA SA

Carlos A. López 7897, Montevideo Uruguay CP 12400

www.inca.com.uy

Dirección de e-mail: inca@akzonobel.com

Teléfono de emergencia: +598 2320 08 91 (24 horas)

CIAC: 0800 1401 (local)

CIAT: 1722 (local)

Fecha de la edición anterior: 24-6-2014.

Clasificación de la sustancia o mezcla:

TOXICIDAD AGUDA (oral) Categoría 4

CORROSIÓN/IRRITACIÓN CUTÁNEAS - Categoría 3

LESIONES OCULARES GRAVES/IRRITACIÓN OCULAR - Categoría 1

SENSIBILIZACIÓN CUTÁNEA - Categoría 1

TOXICIDAD PARA LA REPRODUCCIÓN (Feto) - Categoría 1B PELIGRO

PARA EL MEDIO AMBIENTE ACUÁTICO - Categoría 3

Ingredientes de toxicidad desconocida: 0%

Elementos de las etiquetas del SGA Pictogramas de peligro:



Palabra de advertencia: Peligro

Indicaciones de peligro:

Javier Eduardo Borgno Martín

Maestría en Construcción de Obras de Arquitectura – UdelaR

H302 - Nocivo en caso de ingestión.
H318 - Provoca lesiones oculares graves.
H316 - Provoca una leve irritación cutánea.
H317 - Puede provocar una reacción cutánea alérgica.
H360 - Puede dañar al feto.
H412 - Nocivo para los organismos acuáticos, con efectos nocivos duraderos.

Consejos de prudencia:

General:

P102 - Mantener fuera del alcance de los niños.
P101 - Si se necesita consultar a un médico, tener a mano el recipiente o la etiqueta del producto.

Prevención:

P201 - Procurarse las instrucciones antes del uso.
P202 - No manipular antes de haber leído y comprendido todas las precauciones de seguridad.
P280 - Usar guantes de protección. Usar protección para los ojos o la cara. Usar ropa protectora.
P273 - No dispersar en el medio ambiente.
P270 - No comer, beber o fumar mientras se manipula este producto.
P264 - Lavarse cuidadosamente las manos después de la manipulación.

Intervención:

P308 + P313 – En caso de exposición demostrada o supuesta: Buscar atención médica.
P301 + P312 + P330 – En caso de ingestión:
Llamar a un CENTRO DE CONTROL DE ENVENENAMIENTO o a un médico si la persona se siente mal. Enjuagarse la boca.
P332 + P313 - En caso de irritación cutánea: Buscar atención médica.
P305 + P351 + P338 + P310 – EN CASO DE CONTACTO CON LOS OJOS:
Enjuagar con agua cuidadosamente durante varios minutos. Quitar las lentes de contacto, cuando estén presentes y pueda hacerse con facilidad. Proseguir con el lavado. Llamar inmediatamente a un CENTRO DE CONTROL DE ENVENENAMIENTO o a un médico.

Almacenamiento:

P405 - Guardar bajo llave.

Eliminación:

P501 - Eliminar el contenido y el recipiente en conformidad con las reglamentaciones locales, regionales, nacionales e internacional.

Otros peligros que no conducen a una clasificación: No se conoce ninguno.

2. Composición e información sobre los ingredientes

Sustancia/preparado: Mezcla

Otros medios de identificación: No disponible

Número CAS/otros identificadores

Número CAS : No aplicable.

Número CE : Mezcla.
Código del producto : 99058

Nombre de ingrediente	%	Número CAS
ETILENGLICOL	25 - < 50	107-21-1
Caolín	10 - < 25	1332-58-7
Nonilfenol polietilenglicol éter	2.5 - < 10	127087-87-0
Talco, sin contenido de fibras asbestiformes	2.5 - < 10	14807-96-6
2,4,7,9 tetrametildec-5-ino-4,7-diol	0 - < 1	126-86-3
2,2',2''-(hexahidro-1,3,5-triazina-1,3,5-triil) trietanol	0 - < 1	4719-04-4

No hay ningún componente adicional presente que, bajo el conocimiento actual del proveedor y en las concentraciones aplicables, sea clasificado como de riesgo para la salud o el medio ambiente, como PBT o mPmB, o tenga asignado un límite máximo de exposición laboral y por lo tanto deban ser reportados en esta sección.

3. Propiedades físicas y químicas

Estado físico: Líquido.

Punto de ebullición inicial y rango de ebullición: 100°C

Densidad relativa: 1,314

Fácilmente soluble en los siguientes materiales: agua fría

Cinemática (temperatura ambiente): 9,13 cm²/s (913 cSt)

4. Datos sobre la estabilidad y la reactividad

Reactividad: No existen resultados específicos de ensayos respecto a la reactividad de este producto o sus componentes.

Estabilidad química: El producto es estable.

Posibilidad de reacciones peligrosas: En condiciones normales de almacenamiento y uso, no ocurre reacción peligrosa.

Materiales incompatibles: Ningún dato específico.

Productos de descomposición peligrosos: En condiciones normales de almacenamiento y uso, no debe producir productos de descomposición peligrosos.

5. Datos complementarios

Fecha de impresión: 12-10-2014.

Fecha de emisión/Fecha de revisión: 12-10-2014.

Fecha de la edición anterior: 24-6-2014.

Versión: 3.01



AkzoNobel

FICHA DE DATOS CONCENTRADO AZUL

2. Identificación del producto y la compañía

Identificador SGA del producto: CONCENTRADO AZUL

Tipo del producto: Líquido.

Usos recomendados del producto y restricciones de uso: No aplicable.

Uso del producto: Colorante base agua.

Datos del Proveedor:

Pinturas INCA SA
Carlos A. López 7897, Montevideo Uruguay CP 12400
www.inca.com.uy

Dirección de e-mail: inca@akzonobel.com

Teléfono de emergencia: +598 2320 08 91 (24 horas)
CIAC: 0800 1401 (local)
CIAT: 1722 (local)

Fecha de la edición anterior: 24-6-2014.

Clasificación de la sustancia o mezcla:

TOXICIDAD AGUDA (oral) Categoría 4

CORROSIÓN/IRRITACIÓN CUTÁNEAS - Categoría 3

LESIONES OCULARES GRAVES/IRRITACIÓN OCULAR - Categoría 1

SENSIBILIZACIÓN CUTÁNEA - Categoría 1

TOXICIDAD PARA LA REPRODUCCIÓN (Feto) - Categoría 1B PELIGRO

PARA EL MEDIO AMBIENTE ACUÁTICO - Categoría 3

Ingredientes de toxicidad desconocida: 0%

Elementos de las etiquetas del SGA Pictogramas de peligro:



Palabra de advertencia: Peligro

Indicaciones de peligro:

H302 - Nocivo en caso de ingestión.

H318 - Provoca lesiones oculares graves.

H316 - Provoca una leve irritación cutánea.
H317 - Puede provocar una reacción cutánea alérgica.
H360 - Puede dañar al feto.
H412 - Nocivo para los organismos acuáticos, con efectos nocivos duraderos.

Consejos de prudencia:

General:

P102 - Mantener fuera del alcance de los niños.
P101 - Si se necesita consultar a un médico, tener a mano el recipiente o la etiqueta del producto.

Prevención:

P201 - Procurarse las instrucciones antes del uso.
P202 - No manipular antes de haber leído y comprendido todas las precauciones de seguridad.
P280 - Usar guantes de protección. Usar protección para los ojos o la cara. Usar ropa protectora.
P273 - No dispersar en el medio ambiente.
P270 - No comer, beber o fumar mientras se manipula este producto.
P264 - Lavarse cuidadosamente las manos después de la manipulación.

Intervención:

P308 + P313 – En caso de exposición demostrada o supuesta: Buscar atención médica.
P301 + P312 + P330 – En caso de ingestión:
Llamar a un CENTRO DE CONTROL DE ENVENENAMIENTO o a un médico si la persona se siente mal. Enjuagarse la boca.
P332 + P313 - En caso de irritación cutánea: Buscar atención médica.
P305 + P351 + P338 + P310 – EN CASO DE CONTACTO CON LOS OJOS:
Enjuagar con agua cuidadosamente durante varios minutos. Quitar las lentes de contacto, cuando estén presentes y pueda hacerse con facilidad. Proseguir con el lavado. Llamar inmediatamente a un CENTRO DE CONTROL DE ENVENENAMIENTO o a un médico.

Almacenamiento:

P405 - Guardar bajo llave.

Eliminación:

P501 - Eliminar el contenido y el recipiente en conformidad con las reglamentaciones locales, regionales, nacionales e internacional.
Otros peligros que no conducen a una clasificación: No se conoce ninguno.

2. Composición e información sobre los ingredientes

Sustancia/preparado: Mezcla
Otros medios de identificación: No disponible

Número CAS/otros identificadores
Número CAS : No aplicable.
Número CE : Mezcla.
Código del producto : 99063

Nombre de ingrediente	%	Número CAS
Caolín	25 - < 50	1332-58-7
ETILENGLICOL	10 - < 25	107-21-1
Nonilfenol polietilenglicol éter	2.5 - < 10	127087-87-0
1-metil-2-pirrolidona	1 - < 2.5	872-50-4
2,2',2''-(hexahidro-1,3,5-triazina-1,3,5-triil) trietanol	0 - < 1	4719-04-4

No hay ningún componente adicional presente que, bajo el conocimiento actual del proveedor y en las concentraciones aplicables, sea clasificado como de riesgo para la salud o el medio ambiente, como PBT o mPmB, o tenga asignado un límite máximo de exposición laboral y por lo tanto deban ser reportados en esta sección.

3. Propiedades físicas y químicas

Estado físico: Líquido.

Punto de ebullición inicial y rango de ebullición: 100°C

Densidad relativa: 1,394

Fácilmente soluble en los siguientes materiales: agua fría

Cinemática (temperatura ambiente): 6,46 cm²/s (646 cSt)

4. Datos sobre la estabilidad y la reactividad

Reactividad: No existen resultados específicos de ensayos respecto a la reactividad de este producto o sus componentes.

Estabilidad química: El producto es estable.

Posibilidad de reacciones peligrosas: En condiciones normales de almacenamiento y uso, no ocurre reacción peligrosa.

Materiales incompatibles: Ningún dato específico.

Productos de descomposición peligrosos: En condiciones normales de almacenamiento y uso, no debe producir productos de descomposición peligrosos.

5. Datos complementarios

Fecha de impresión: 12-10-2014.

Fecha de emisión/Fecha de revisión: 12-10-2014.

Fecha de la edición anterior: 24-6-2014.

Versión: 2.01



AkzoNobel

FICHA DE DATOS CONCENTRADO NARANJA (Produce amarillo).

3. Identificación del producto y la compañía

Identificador SGA del producto: CONCENTRADO NARANJA

Tipo del producto: Líquido.

Usos recomendados del producto y restricciones de uso: No aplicable.

Uso del producto: Colorante base agua.

Datos del Proveedor:

Pinturas INCA SA

Carlos A. López 7897, Montevideo Uruguay CP 12400

www.inca.com.uy

Dirección de e-mail: inca@akzonobel.com

Teléfono de emergencia: +598 2320 08 91 (24 horas)

CIAC: 0800 1401 (local)

CIAT: 1722 (local)

Fecha de la edición anterior: 24-6-2014.

Clasificación de la sustancia o mezcla:

TOXICIDAD AGUDA (oral) Categoría 4

CORROSIÓN/IRRITACIÓN CUTÁNEAS - Categoría 3

LESIONES OCULARES GRAVES/IRRITACIÓN OCULAR - Categoría 1

SENSIBILIZACIÓN CUTÁNEA - Categoría 1

TOXICIDAD PARA LA REPRODUCCIÓN (Feto) - Categoría 1B PELIGRO

PARA EL MEDIO AMBIENTE ACUÁTICO - Categoría 3

Ingredientes de toxicidad desconocida: 0%

Elementos de las etiquetas del SGA Pictogramas de peligro:



Palabra de advertencia: Peligro

Indicaciones de peligro:

H302 - Nocivo en caso de ingestión.

H318 - Provoca lesiones oculares graves.

H316 - Provoca una leve irritación cutánea.

H317 - Puede provocar una reacción cutánea alérgica.

H360 - Puede dañar al feto.

H412 - Nocivo para los organismos acuáticos, con efectos nocivos duraderos.

Consejos de prudencia:

General:

P102 - Mantener fuera del alcance de los niños.

P101 - Si se necesita consultar a un médico, tener a mano el recipiente o la etiqueta del producto.

Prevención:

P201 - Procurarse las instrucciones antes del uso.

P202 - No manipular antes de haber leído y comprendido todas las precauciones de seguridad.

P280 - Usar guantes de protección. Usar protección para los ojos o la cara. Usar ropa protectora.

P273 - No dispersar en el medio ambiente.

P270 - No comer, beber o fumar mientras se manipula este producto.

P264 - Lavarse cuidadosamente las manos después de la manipulación.

Intervención:

P308 + P313 – En caso de exposición demostrada o supuesta: Buscar atención médica.

P301 + P312 + P330 – En caso de ingestión:

Llamar a un CENTRO DE CONTROL DE ENVENENAMIENTO o a un médico si la persona se siente mal. Enjuagarse la boca.

P332 + P313 - En caso de irritación cutánea: Buscar atención médica.

P305 + P351 + P338 + P310 – EN CASO DE CONTACTO CON LOS OJOS:

Enjuagar con agua cuidadosamente durante varios minutos. Quitar las lentes de contacto, cuando estén presentes y pueda hacerse con facilidad. Proseguir con el lavado. Llamar inmediatamente a un CENTRO DE CONTROL DE ENVENENAMIENTO o a un médico.

Almacenamiento:

P405 - Guardar bajo llave.

Eliminación:

P501 - Eliminar el contenido y el recipiente en conformidad con las reglamentaciones locales, regionales, nacionales e internacional.

Otros peligros que no conducen a una clasificación: No se conoce ninguno.

2. Composición e información sobre los ingredientes

Sustancia/preparado: Mezcla

Otros medios de identificación: No disponible

Número CAS/otros identificadores

Número CAS : No aplicable.

Número CE : Mezcla.

Código del producto : 99066

Nombre de ingrediente	%	Número CAS
ETILENGLICOL	10 - < 25	107-21-1
Nonilfenol polietilenglicol éter	2.5 - < 10	127087-87-0
Glicerina	1 - < 2.5	56-81-5
DIOXIDO DE TITANIO (como Ti)	1 - < 2.5	13463-67-7
Baritina – Sulfato de Bario	1 - < 2.5	7727-43-7
2,2',2''-(hexahidro-1,3,5-triazina-1,3,5-triil) trietanol	0 - < 1	4719-04-4

No hay ningún componente adicional presente que, bajo el conocimiento actual del proveedor y en las concentraciones aplicables, sea clasificado como de riesgo para la salud o el medio ambiente, como PBT o mPmB, o tenga asignado un límite máximo de exposición laboral y por lo tanto deban ser reportados en esta sección.

3. Propiedades físicas y químicas

Estado físico: Líquido.

Punto de ebullición inicial y rango de ebullición: 100°C

Densidad relativa: 1,209

Fácilmente soluble en los siguientes materiales: agua fría

Cinemática (temperatura ambiente): 3,72 cm²/s (372 cSt)

4. Datos sobre la estabilidad y la reactividad

Reactividad: No existen resultados específicos de ensayos respecto a la reactividad de este producto o sus componentes.

Estabilidad química: El producto es estable.

Posibilidad de reacciones peligrosas: En condiciones normales de almacenamiento y uso, no ocurre reacción peligrosa.

Materiales incompatibles: Ningún dato específico.

Productos de descomposición peligrosos: En condiciones normales de almacenamiento y uso, no debe producir productos de descomposición peligrosos.

5. Datos complementarios

Fecha de impresión: 12-10-2014.

Fecha de emisión/Fecha de revisión: 12-10-2014.

Fecha de la edición anterior: 24-6-2014.

Versión: 2.01

ANEXO E - DATOS TÉCNICOS DE ESPECTROFOTÓMETRO X-RITE.

Datos Técnicos adicionales del espectrofotómetro utilizado.

Especificaciones:

Repetitividad de corto plazo: blanco	Typical 0.2 DE94
Repetitividad de corto plazo: azul	NA
Geometría de medición:	45°/0° Image Capture
Acuerdo entre instrumentos:	NA
Colores de iluminación:	25 LED (8 x visible wavelengths, 1 x UV)
Tamaño del área de iluminación:	9mm
Vida útil de la lámpara:	>10 million flashes
Duración del ciclo de la medición:	1.8 Seconds
Zona de medición:	8mm
Tiempo de medición:	1.8 Seconds
Analizador de espectro:	Monochrome camera
Apertura:	9mm
Aperturas de reflectividad:	9mm
Humedad:	Non-condensing
Rango de temperatura de operación:	0C to 40C
Rango de temperatura de almacenamiento:	-20C to 60C
Dimensiones (largo, ancho, alto):	144x52x40mm
Peso:	165 grams
Dimensiones del paquete (largo, ancho, alto):	180x184x60.5mm
Peso despachado:	415 grams
Interfaz de comunicación:	USB or USB & Bluetooth
Pantalla del instrumento:	45mm Color TFT
Kit de desarrollo de software:	Bluetooth iOS, Android and Windows
Batería:	Lithium ion
Vida útil de la batería:	100h standby.
Voltaje:	3.7V
Calibración:	Integrated white calibration slider