



ESTRUTURAS DE HORMIGÓN COLOREADO

Autor: CARVALHO, F. ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Engenheiro civil. Professor do Curso de Tecnologia da Construção Civil da Universidade Estadual Vale do Acaraú. Doutor em engenharia pela *E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos*, da Universidade Politécnica de Madri (Espanha). E-mail: paco@sobral.org

ÍNDICE

1.	Introducción.....	4
2.	Desarrollo histórico y realizaciones.....	5
3.	Definición e importancia del Hormigón Coloreado.....	7
4.	Materiales constituyentes del Hormigón Coloreado.....	8
	4.1 Pigmentos.....	8
	4.2 Cementos.....	12
	4.3 Árido.....	13
	4.4 Agua.....	14
	4.5 Aditivo.....	16
5.	Efectos de los pigmentos en las propiedades del Hormigón fresco.....	16
	5.1 Trabajabilidad.....	17
	5.2 Tiempo de fraguado.....	17
	5.3 Contenido de aire.....	17
	5.4 Exudación y asentamiento.....	18
6.	Efectos de los pigmentos en las propiedades del hormigón endurecido.....	18
	6.1 Resistencia a compresión y flexotracción.....	18
	6.2 Retracción.....	18
7.	Efectos de los pigmentos en relación con la durabilidad del hormigón.....	19
	7.1 Resistencia al Hielo-Deshielo.....	19
	7.2 Permeabilidad.....	20
8.	Factores que influyen en la coloración, a largo plazo, del Hormigón Coloreado.....	20
	8.1 Influencia de los materiales y de la relación A/C.....	21
	8.2 Estabilidad colorimétrica del hormigón.....	23
	8.3 Influencia del amasado y del curado.....	28
	8.4 Influencia del grado de compactación.....	30
	8.5 Eflorescencias.....	30
9.	Colorimetría.....	32
	9.1 Coordenadas cromáticas.....	35

9.1.1	Carta de Color Munsell.....	35
9.1.2	Valoración numérica del color.....	35
9.2	Diferencias cromáticas.....	39
10.	Espectrofotómetro.....	40

1. Introducción

El hormigón es un material que presenta grandes virtudes desde el punto de vista del concepto estructural, debido a sus características físicas, principalmente la resistencia a compresión. Además, su plasticidad le confiere la propiedad para adoptar la forma de la superficie con la que tiene contacto en estado fresco, hasta lograr su estado físico definitivo, una vez endurecido.

A estas virtudes debe añadirse la estética, como resultado del buen manejo de la forma, proporción, textura, color, etc. Así, el hormigón, inventado hace más de un siglo como pura necesidad estructural tiene su aceptación como elemento arquitectónico aumentado a través de la incorporación de pigmentos que le confiere un extraordinario valor estético.

Está suficientemente comprobado que los distintos colores provocan en las personas diversas reacciones: así por ejemplo, mientras el rojo parece excitante, el verde y el azul favorecen sensaciones de tranquilidad, etc.; también influyen en los juicios estéticos, haciéndonos parecer, según el color, que unos objetos nos agraden más que otros.

En los últimos años una nueva concepción urbanística se está imponiendo con gran fuerza. Para la total integración de un edificio en un determinado entorno, es fundamental la correcta elección de los materiales, las texturas de las superficies y, particularmente, de los colores, ya que estos tienen un papel esencial en su efecto estético final. Así, a través de la utilización de colores en el mobiliario urbano, en los pavimentos y en los edificios se consigue un entorno más agradable y humano, de acuerdo con las exigencias estéticas de la sociedad.

El hormigón, en sus diferentes formas, está directamente afectado por este deseo de humanización de las estructuras como componentes

urbanos indispensables. Añadir color a las estructuras grises de hormigón es una manera de quitarles monotonía, darles calor y alegría. Ésto se puede conseguir pintando la superficie endurecida, incorporando agentes colorantes en la mezcla, mientras éstas sean plásticas, o empleando áridos que les confiera su color propio. Sin embargo, es el uso de pigmentos añadidos al hormigón lo que produce un efecto más eficaz, ya que el color se integra en la mezcla y, teóricamente, no requiere mantenimiento para que el mismo perdure.

A través de un diseño adecuado, utilización de productos cuya calidad esté convenientemente comprobada, y mano de obra con la debida experiencia, se puede conseguir resultados verdaderamente extraordinarios en la utilización del Hormigón Coloreado. La libertad en el diseño, la posibilidad de lograr un sinfín de acabados, una construcción costeable, integridad estructural y el bajo coste de su mantenimiento justifican el aumento de su popularidad en las diversas áreas de la construcción.

La fabricación de Hormigón Coloreado no difiere, fundamentalmente, del proceso empleado para producir hormigones sin pigmentos. Sin embargo, algunos factores deben ser considerados durante su producción con el objeto de optimizar el color y la calidad deseada. La elección de los agentes colorantes, tipo y color del cemento, adecuada relación agua/cemento, granulometría y color de los áridos, son factores muy importantes para la obtención de un hormigón de buena calidad, integridad estructural y belleza permanente con bajo coste de mantenimiento. Además, si se conocen los factores que afectan al color obtenido, se pueden lograr con mayor facilidad proyectos duraderos y de gran calidad.

2. Desarrollo histórico y realizaciones

El color, de una forma u otra, siempre estuvo presente en la construcción. Los proyectistas utilizaron, desde los tiempos más

lejanos, el color como elemento esencial que conferían a sus creaciones un valor estético especial. El Palacio de Knosos, la Catedral de Santa Sofía, Nôtre Dame de Paris, o la Mezquita de Córdoba son ejemplos donde la presencia del color enriqueció su belleza arquitectónica. La innovadora tecnología bizantina permitió a los arquitectos Antonio de Trailles e Isidoro de Mileto diseñar una basílica con enormes dimensiones y novedades técnicas que hicieron de ella uno de los edificios más relevantes de la historia de la arquitectura.

El primer pigmento fue producido por William Henry Perkins, hace aproximadamente 140 años, a través de la oxidación de la anilina.

En 1920 la empresa *G. & T. Ltda.*, de Hull, Gran Bretaña, produjo, por primera vez, cemento coloreado. *Art Pavements & Decorations*, de Camden Town, fue quien primero utilizó la incorporación del color en la fabricación de piezas prefabricadas.

La fábrica de cigarrillos *The Carreras Black Cat* es, probablemente, el primer edificio construido con Hormigón Coloreado. En su construcción se empleó una técnica que mezclaba cemento portland y arena coloreada con *ocres de Sudáfrica*, que dotaba al hormigón de reflejos dorados-amarillentos. En sus columnas y cornisas, además, se añadió una parte de cristal de Venecia, molido con diferentes granulometrías, con lo cual se consiguieron brillos rojos, verdes y negros.

También por esta época *Wharf Lane Concrete Company*, de Ilminster, produjo atractivas figuras de adornos utilizando Hormigón Coloreado.

El éxito cosechado con la técnica empleada para la construcción del edificio, sin embargo, no sirvió para que otras construcciones siguiesen su ejemplo. La industria del cemento coloreado derivó, entonces, hacia la prefabricación de diversos elementos, especialmente acabados y revestimientos, tales como mosaicos, terrazas artificiales, baldosas hidráulicas, azulejos o tejas. Son estas últimas, junto con los

adoquines, responsables, hoy en día, por la mayor demanda de pigmentos.

Las técnicas más utilizadas para colorear el hormigón fueron las que mezclaban áridos y cristales molidos de diversos colores, y que producían un excelente efecto estético.

Después de un largo período sin ser empleado en la construcción de edificios, fue durante la década de los 80 cuando el Hormigón Coloreado volvió a ser utilizado en diferentes zonas de los Estados Unidos como revestimientos de paneles prefabricados.

Actualmente, entre las muchas obras existentes en países como Estados Unidos, Alemania, Bélgica, Francia, España, etc., la buena apariencia del hormigón se ve realizada por el color integral que presentan edificios como el *Holocausto Museum*, en Washington, hormigonado *in situ*, o el complejo EuroDisney, en Francia. En España, el arquitecto Perez Luzardo construyó, con bastante éxito, diversos edificios, en las Islas Canarias, utilizando Hormigón Coloreado.

3. Definición e importancia del hormigón coloreado

El Hormigón Coloreado es simplemente un hormigón al que se le ha añadido un agente colorante. Para su fabricación no se requieren herramientas o habilidades especiales, sólo son necesarias buenas técnicas para su elaboración y puesta en obra, que, por otra parte, son sobradamente conocidas, y llevadas a cabo de forma rutinaria en todos los proyectos.

El informe nº 5 del CIB [23] define con la expresión *hormigón de color uniforme y sin defectos de superficie* al hormigón cuyas superficies presentan variaciones de color estéticamente aceptables, exenta de manchas, o bien, superficies donde los defectos son insignificantes y no son perceptibles más que con un examen efectuado de cerca.

Además, afirma que es imposible la realización de superficies de hormigón con una uniformidad tal que cada centímetro cuadrado, ni siquiera cada metro cuadrado, sea de un color uniforme.

TRÜB [94] piensa que los defectos accidentales y las irregularidades de la estructura o de la coloración, se consideran frecuentemente como aportación vivificante, siempre que las variaciones se mantengan en cierta proporción con respecto a la magnitud del edificio y la distancia normal de observación.

4. Materiales constituyentes del hormigón pigmentado

HOF, JUNGK y QUECKBÖRNER [44] definen el Hormigón pigmentado como una mezcla perfecta y homogénea de cemento, árido grueso, arena y pigmento.

4.1. Pigmento

Se define el pigmento como el polvo compuesto por partículas muy pequeñas, algunas de tamaños inferiores a 1 μm . Para poder ser utilizados como tal debe presentar las siguientes características:

- Ser inerte con los demás componentes del hormigón o del mortero.
- Asegurar y mantener su color original.
- Buena resistencia a la acción de la luz y de la intemperie.
- pH completamente estable.
- Insoluble en el agua y sin contenidos de sales y ácidos.
- Mezclarse fácilmente con el cemento y los finos del hormigón.

Prácticamente sólo los pigmentos inorgánicos, y entre ellos únicamente los óxidos de hierro cumplen los requisitos anteriormente expuestos. Los pigmentos más importantes según el color aportado son los obtenidos de los óxidos de hierro recogidos en la *Tabla 2.1*, cuyas

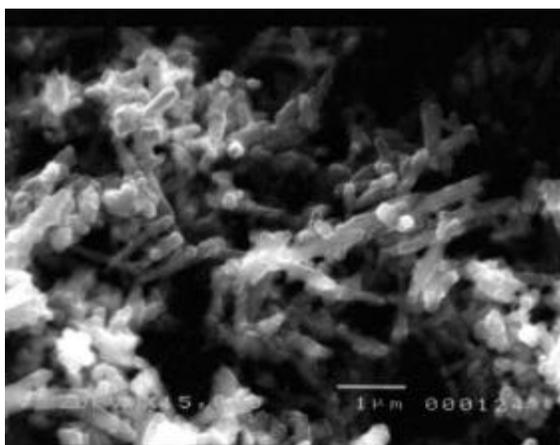
composiciones y estructuras corresponden a los minerales: Hematita, Magnetita y Goetita.

Tabla 2.1. Óxidos de hierro

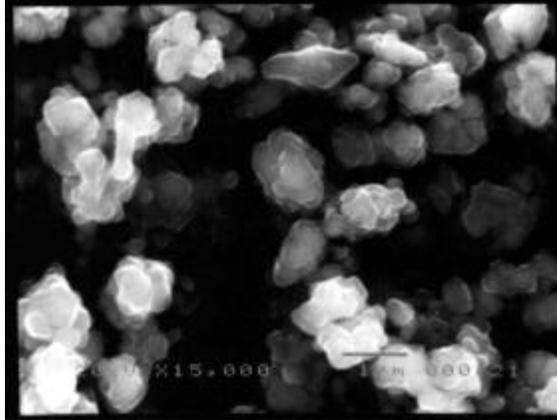
Color	Fórmula	Denominación Química	Nombre Común
NEGRO	Fe ₃ O ₄	Óxido Ferroso-Férrico	Óxido de Hierro Negro
ROJO	Fe ₂ O ₃	Óxido Férrico	Óxido de Hierro Rojo
AMARILLO	Fe(OH) ₂	Hidróxido Ferroso	Óxido de Hierro Amarillo

Los pigmentos de óxido de hierro pueden ser naturales o sintéticos. Los naturales proceden de extracciones minerales, sometidos a diversos procedimientos para la obtención de uniformidad en el tamaño de las partículas, que suelen estar entre las 10 y las 15 micras.

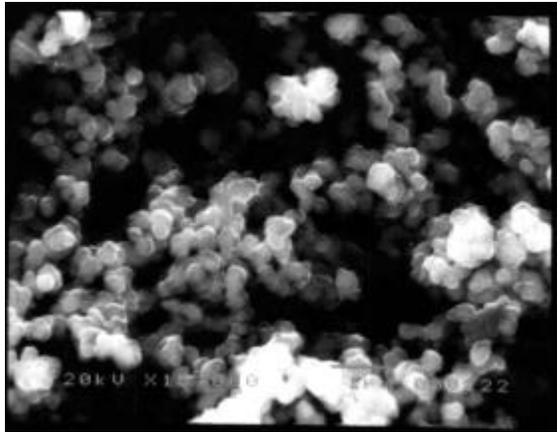
Los pigmentos de óxido de hierro sintéticos (véase fotografías 2.1; 2.2 y 2.3) presentan cualidades superiores a los naturales, fundamentalmente, en el control del tono del color y poder de pigmentación.



Fotografía 2.1- Microfotografía electrónica. Pigmento Amarillo



Fotografía 2.2- Microfotografía electrónica. Pigmento Negro



Fotografía 2.3- Microfotografía electrónica. Pigmento Rojo

En los últimos años se han producido importantes adelantos tecnológicos en la producción y en la técnica de aplicación de los pigmentos sintéticos. Estos nuevos adelantos en la producción de los pigmentos para hormigón tuvieron y tienen como razones principales la obtención de colores más brillantes, automatización de los procesos de incorporación del pigmento, que conllevan a productos cada vez más fiables y económicos, y el empleo de procesos ecológicos en la fabricación de dichos pigmentos.

El poder de coloración del pigmento, definido como la capacidad que tiene para impartir su color natural, es una característica esencial cuando se realiza una evaluación coste-desempeño.

Cuando se prepara una mezcla de hormigón con cantidades crecientes de pigmentos, se observa que la intensidad del color aumenta inicialmente de forma lineal hasta llegar a un punto a partir del cual el aumento de tonalidad por unidad de colorante adicionado es prácticamente nulo, y a este punto lo definimos como saturación. Si empleamos cantidades de pigmentos superiores al punto de saturación no obtendremos una intensificación cromática, como muestra el gráfico de la *Figura 2.1*. Estas curvas varían de acuerdo con el tipo de cemento y pigmento empleados. La utilización de pigmentos con gran poder de coloración es muy importante, una vez que se pueda llegar al efecto cromático que se desea con una cantidad mínima de sustancia colorante, sin que ello conlleve problemas de resistencia del hormigón debido a la gran cantidad de finos de la mezcla. Añadir más pigmento apenas aumentaría ligeramente el color, representando, sin embargo, un aumento importante en el coste del hormigón.

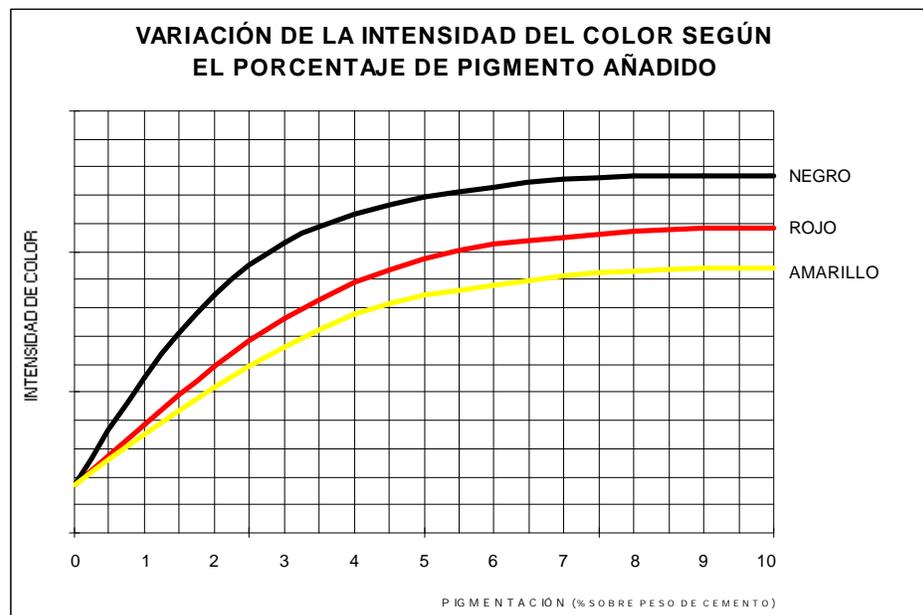


Figura 2.1 - Variación de la intensidad de color según el porcentaje de pigmento añadido. (Fuente: SCHEUBER, W. Colouring Concrete with Pigments. 1991)

Es muy importante que se conozca exactamente el porcentaje de pigmentación óptimo, porque así se consumirá sólo la cantidad de pigmento estrictamente necesaria para obtener la coloración deseada.

Ni la EH-91, ni la UNE, serie 83200, regulan nada específico a respecto del empleo de los pigmentos, remitiéndose la primera a la realización de ensayos previos del hormigón que asegure la ausencia de variabilidad de sus restantes propiedades.

Los pigmentos en polvo son, en general, comercializados en sacos de papel de 25 kg. Los pigmentos amarillos, debido a mayor volumen, se comercializan en sacos de 20 kg.

En la industria de la construcción son innumerables las aplicaciones que pueden tener los pigmentos. Piedras artificiales, terrazos, adoquines, tejas cerámicas, tejas de hormigón pavimentos, bloques, piezas prefabricadas para grandes obras de ingeniería, o incluso estructuras de hormigón visto hormigonados *in situ*, son sólo algunas de las principales aplicaciones de los pigmentos en la construcción.

4.2. Cemento

El color del cemento tiene un efecto determinante sobre el color del hormigón. Los cementos son productos naturales, sujetos a variaciones de color, no sólo debido a la diferencia entre marcas, sino aun dentro de la misma marca, ya que las operaciones de extracción de las canteras, la fabricación y combinación varían. Su color representa esencialmente a un color básico que se puede obtener de la mezcla de hormigón y con el cual todos los otros colores se deben combinar para formar el definitivo.

En todo el mundo, el color más común para el cemento es el gris medio, y es la base para la mayoría de las cartas de colores de los agentes condicionantes del color del hormigón, siendo los más usados

los tonos más claros y oscuros de gris, y los más raros los tonos de café o amarillo.

Los cementos deberán cumplir con las prescripciones establecidas en el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para la recepción de cementos, correspondientes a su denominación, tipo y clase.

Para una misma obra, se recomienda que el cemento sea suministrado por una única fábrica, y que sea, además del mismo tipo y clase. En caso de cemento con adiciones, que sea siempre del mismo lote.

4.3. Árido

El color del árido grueso en la mezcla generalmente no es un factor significativo para la apariencia final del Hormigón Coloreado. Sin embargo, el árido de mayor finura se comporta como un agente adicional del color, influyendo en la coloración final del hormigón.

La granulometría debe mantenerse constante, a través de un rígido control, que garantice la uniformidad de los materiales entre las distintas amasadas, evitando los cambios en la trabajabilidad, las variaciones de color o la textura del hormigón.

Como se ha dicho anteriormente, la menor o mayor presencia de finos tiene una influencia en el color final. El exceso de finos puede clarear el hormigón, ya que el árido presenta una mayor superficie específica, lo que requiere una cantidad superior de pasta de cemento coloreada. Además, la demanda de agua aumenta, lo que deriva hacia un color más claro.

Por otro lado, la menor presencia de finos tiene como consecuencia una menor superficie específica, con lo cual la pasta de cemento coloreada adquiere un mayor protagonismo.

Por causas similares, es importante que se considere la morfología de los áridos. Los áridos machacados, con forma irregular, al presentar una superficie específica mayor que los que tienen forma redondeada, conllevan a un hormigón con colores más claros.

Ciertas arenas, especialmente las de peso ligero, pueden contener polvo residual, incluso después de que hayan sido lavadas. Las arenas más oscuras que contengan polvo pueden cambiar el color del hormigón, puesto que dicho polvo actúa como agente adicional del color. Además, con el desgaste, algunos granos pueden llegar a estar expuestos y hacer que la superficie del hormigón parezca más oscura.

BÜCHNER [15] recomienda la utilización de arena de río lavada para evitar la influencia del polvo residual contenido en la arena frente al color del pigmento.

La influencia del árido, además de los factores relacionados con su granulometría y color, está también en función de su relación respecto al cemento.

La relación árido/cemento varía de un tipo de hormigón a otro. En cualquier caso, una acertada composición de diferentes medidas de áridos, permite aumentar la presencia sin mermar la resistencia del hormigón, ni influir excesivamente en el color final. Una vez determinada la relación agua/cemento para conseguir la máxima resistencia, ésta puede ser alterada dependiendo de la relación árido/cemento y de la granulometría de este último.

Es importante que se considere esta variación, puesto que además de repercutir en la resistencia final del hormigón, también incide directamente en su tonalidad, ya que un defecto de agua produce un ensombrecimiento del color debido a la irregularidad de la superficie, y en caso de exceso se clarea la tonalidad en las superficies debido a la

reflexión irregular de la luz provocada por los microporos formados por el agua sobrante al salir.

Investigaciones llevadas a cabo por SZADKOWSKI [89] comprobaron que bajo la influencia de agentes de deterioro como la radiación ultravioleta, la humedad, temperatura y polución, la superficie del hormigón sufre cambios. Y que una mayor diferencia entre el color de los áridos y la matriz de cemento coloreado, causa un mayor impacto visual en el deterioro de la capa superficial del hormigón. Este efecto se puede, naturalmente, minimizar a través del empleo de áridos con el mismo color de los pigmentos.

En cuanto al color de los áridos, CÁNOVAS [19] facilita la relación reflejada en la tabla siguiente:

Tabla 2.2 - Color de los áridos

Tipo de Àrido	Color
Mármoles	Negro, Azul, Gris, Rojo y Blanco
Caliza	Amarillo
Granito	Negro, Azul, pardo
Silíceo	Color ceniza, tonos pálidos
Rocas eruptivas	Amplia variedad de color

4.4. Agua

El agua utilizada en la fabricación del Hormigón Coloreado deberá cumplir las especificaciones establecidas en el artículo 6 de la EH-91. Deberá estar exenta de partículas que, por su naturaleza, puedan producir manchas o variaciones de tonos en la superficie del hormigón, tales como partículas de hierro en suspensión.

4.5. Aditivo

El empleo de aditivos en el Hormigón Coloreado está condicionado a la realización de ensayos previos con la finalidad de determinar los efectos que ellos puedan tener sobre la coloración del hormigón, con atención especial cuando se utiliza cemento blanco.

La tabla siguiente recoge la información de VEIT [98] sobre los efectos de los aditivos en el Hormigón Coloreado.

Tabla 2.3 - Efecto de los aditivos en el Hormigón Coloreado

Aditivo	Efecto en el Hormigón Coloreado
Plastificante	Facilita la dispersión del pigmento Mayor homogeneización
Oclusores de Aire	A base de linosulfonatos producen oscurecimiento de la superficie
Reductor de Agua	Facilita la compactación Proporciona condiciones para la presencia de eflorescencias
Productos Hidrófugos	Evitan eflorescencias provocadas por el arrastre de sales en el agua

Debido a que algunos aditivos reductores de agua contienen cloruro de calcio u otros componentes que pueden ser perjudiciales a la uniformidad del color, se recomienda la realización previa de ensayos para determinar su compatibilidad con el pigmento empleado.

5. Efectos de los pigmentos en las propiedades del hormigón fresco

Los pigmentos están compuestos por partículas de tamaños inferiores a 1 μm , hasta diez veces menores que las partículas de cemento. Un

material con una granulometría tan fina incide en las condiciones de fabricación del hormigón, tanto por sus dimensiones como por su forma. El pigmento amarillo, por ejemplo, debido a su forma acicular, es capaz de adsorber en su superficie más agua, con lo que disminuye la cantidad efectiva a efectos de fraguado. Sus diminutas dimensiones y forma esférica, confieren a los pigmentos y negro un gran poder de coloración y mayor trabajabilidad al hormigón.

5.1. Trabajabilidad

La incorporación de pigmentos en el hormigón, generalmente se traduce en una reducción de su trabajabilidad. La ASTM C-979 recomienda que el incremento en la demanda de agua para mantener la misma trabajabilidad de la mezcla original no pigmentada no debe exceder del 10% sobre el peso de cemento.

5.2. Tiempo de fraguado

Según WALLEENDAEL [99], la mayoría de los pigmentos no tienen efectos considerables sobre esta propiedad, siempre y cuando se utilicen en dosis recomendadas.

5.3. Contenido de aire

Los pigmentos en general no ejercen ningún efecto sobre el contenido de aire de los hormigones, a excepción del pigmento de carbón negro y otros de partículas muy finas. Cuando se emplea esta clase de colorantes, se debe añadir cantidades adicionales de aditivos incorporadores para los contenidos de aire dentro de valores aceptables. La ASTM C-979 especifica que los pigmentos, cualquiera que sean los tipos, no deben alterar el contenido de aire de los hormigones en porcentajes superiores al 1 %.

5.4. Exudación y asentamiento

Tanto la ASTM C979-82 como la British Standard B 1014, especifican que los pigmentos usados en los niveles recomendados por los fabricantes, no producen efectos adversos sobre estas propiedades. CABRERA y LYNSDALE [17], citando a MAILVAGANAM (USA.1984), añaden que la utilización de pigmentos en cantidades superiores a las recomendadas en hormigones fabricados con cementos de bajo contenido de C_3A provocan un aumento de la exudación.

6. Efectos de los pigmentos en las propiedades del hormigón endurecido

Las investigaciones realizadas sobre las propiedades físicas de los hormigones coloreados son bastante escasas. En la bibliografía estudiada sólo se ha encontrado algunas referencias sobre los efectos de los pigmentos sobre la resistencia a compresión, flexotracción y la retracción que sufren los hormigones que tienen incorporados pigmentos en su formulación.

6.1. Resistencia a compresión y flexotracción

Estudios realizados por MOWAT y SYMONS [69] demostraron que la resistencia a compresión del hormigón no sufre disminución significativa al incorporar el pigmento en las dosis recomendadas, si se mantiene la consistencia original a través de un ajuste de la relación agua/cemento.

PEREZ LUZARDO [81] y BÜCHNER [13] coinciden en que no se presentan alteraciones importantes en la resistencia a flexotracción debido a la incorporación de pigmentos al hormigón, si ésta se produce en cantidades recomendadas.

BÜCHNER [13], sin embargo, pudo comprobar que el pigmento de óxido de hierro amarillo produce una reducción en la resistencia del

hormigón, si es utilizado en cantidades superiores al 6%. Esta reducción es debida a la gran demanda de agua provocada por el pigmento amarillo, como consecuencia de su forma acicular, que absorbe una mayor cantidad de agua, lo que conlleva a una reducción en la relación agua/cemento efectiva de la mezcla.

6.2. Retracción

Estudios realizados por MOWAT y SYMONS [69], incorporando pigmentos de óxido de hierro negro al hormigón demostraron un aumento en la retracción del mismo, al mantener constante la consistencia a través de ajustes en la relación agua/cemento. KROONE y BLAKEY [58] también comprobaron un incremento en la retracción al incorporar pigmentos en el hormigón. Sin embargo, estas investigaciones concluyeron que el aumento en la retracción no es significativo, si la cantidad de pigmento empleada está dentro de los límites aceptables.

7. Efectos de los pigmentos en relación con la durabilidad del hormigón

Son pocos los estudios realizados sobre la durabilidad de los hormigones pigmentados y su comportamiento en distintas condiciones ambientales. En la bibliografía estudiada los trabajos se limitaron a la resistencia al hielo deshielo y permeabilidad.

7.1. Resistencia al hielo-deshielo

De acuerdo con CABRERA y LYNSDALE [17], investigaciones realizadas en Alemania demostraron que los pigmentos no afectan a la resistencia del hormigón al hielo-deshielo. Tales investigaciones comprobaron que el hormigón pigmentado presentaba una resistencia superior a la exigida por la norma DIN 18501.

WALLEENDAEL [99] realizó un estudio sobre el comportamiento de casi cien tipos diferentes de pigmentos y únicamente el hormigón que contenía pigmento negro de carbón presentaba una baja resistencia al hielo-deshielo.

7.2. Permeabilidad

Citando a MAILVAGANAM (USA.1984), CABRERA y LYNSDALE [17], advierten que el empleo de pigmentos como agentes colorantes, en grandes cantidades, pueden aumentar el grado de permeabilidad del hormigón, debido a una mayor demanda de agua como consecuencia del gran aumento de la superficie específica de los finos de la mezcla.

8. Factores que influyen en la coloración y estabilidad colorimétrica del hormigón

La coloración de los productos realizados con Hormigón Coloreado no sólo está condicionada por el color del pigmento, sino también por otros factores. Los principales factores que afectan la estabilidad del color del hormigón pigmentado son su calidad y el ambiente a que vaya estar expuesto. El color del cemento y, principalmente, el color natural de los áridos influyen en la apariencia, a largo plazo, del hormigón.

La adecuada selección de los áridos y cemento empleados, la relación agua/cemento, las condiciones de curado y una compactación efectiva son determinantes para la obtención de la estabilidad del color deseado. El control de tales parámetros es fundamental para la fabricación de un hormigón de calidad. La *Tabla 2.4* recoge algunas de las principales causas responsables por la variación del color del hormigón visto, según el informe n0 5 del CIB [23].

Tabla 2.4 - Variaciones del color del hormigón. FUENTE: Informe n° 5 del CIB. Producción de hormigón de color uniforme y sin defectos de superficie.

Variaciones a causa a de contaminaciones	Por impurezas presentes en la masa del hormigón (p.e.: piritas e impurezas de color que no pertenecen a los materiales que constituyen el hormigón)
	Por la superficie del molde, comprendiendo el agente desencofrante (p.e.: contaminaciones debidas a un exceso de aceite o de suciedad de óxido o de otras manchas sobre la superficie del molde)
	Por causas externas después del desencofrado (p.e.: por suciedad, por proyecciones de mortero, de pintura, etc.)
Variaciones debidas a la separación del agua y de los elementos finos	Por absorción en los encofrados (comprendida la absorción bajo la presión en el curso del hormigonado)
	Por exudación paralela al plano del encofrado
	Por exudación normal al plano del encofrado
	Por fugas de la lechada a lo largo de las juntas del encofrado
Variaciones debidas a cambios en las materias primas o en sus proporciones en la composición del hormigón	Variación en el color del cemento o cambios de origen (p.e.: cementos que provienen de fábricas diferentes)
	Áridos: variación en el contenido de arena y en la granulometría (y más particularmente las partes finas) o cambios de origen
	Variación en la dosificación del cemento y de la relación agua/cemento
Variaciones provocadas por el curado del hormigón	Evaporización irregular de la humedad de la superficie del hormigón, duración inapropiada, diferentes condiciones de curado, etc.
Variaciones que se producen con el curso del tiempo	Suciedades, manchas de óxido, eflorescencia, etc.

8.1 Influencia de los materiales y de la relación agua/cemento

Un hecho de gran importancia a considerar en la fabricación del Hormigón Coloreado es la influencia que tiene el tono gris del cemento portland, que no permite que el producto final ofrezca un color tan brillante como aquél preparado con cemento blanco, principalmente cuando se desea obtener un hormigón con una coloración clara. Por

supuesto que tal diferencia no se nota cuando se emplea pigmento de color negro.

Una desventaja adicional que supone el empleo del cemento gris son las diferencias en cuanto a su color que puede haber entre diferentes envíos de una misma marca, puesto que, normalmente, las fábricas no persiguen una regularidad de tonalidad, sino otras características. Tales diferencias repercuten directamente en el color final del hormigón pigmentado.

Los áridos finos ejercen una gran influencia sobre las cualidades superficiales del hormigón, una vez que se comportan como cargas y absorben pigmento, mientras que los áridos más gruesos quedan envueltos por el cemento pigmentado, por lo que no afectan la coloración final, aunque, con el pasar del tiempo, y debido a la erosión de la capa superficial, pueden quedar a la vista, distorsionando la tonalidad natural del hormigón, en el caso de que su color natural no sea igual a del hormigón.

La presencia de partículas, principalmente óxido de hierro, materia orgánica, carbón, minerales de arcilla, etc. puede causar manchas o variaciones en el color de la superficie del hormigón, por lo que resulta indispensable un control estricto en la observancia de las limitaciones exigidas en las normas.

VEIT [94] recomienda que no se debe emplear áridos porosos porque resultan muy difícil el control de la cantidad de agua y pigmento que ellos absorben, ocasionando grandes cambios de tonalidades entre las diversas amasadas.

La relación agua/cemento afecta a la capacidad de adherencia de los áridos, incide directamente en la porosidad de la pasta, en el color del hormigón y, por supuesto en su resistencia estructural. A igualdad de contenido de cemento, cuanto menor es la relación agua/cemento,

tanto mayor será la resistencia del hormigón, siempre que no se trabaje con un hormigón excesivamente seco.

Se recomienda siempre un control estricto sobre el contenido de agua de los áridos con el objeto de evitar alteraciones en la relación agua/cemento, ya que el agua sobrante del amasado se evapora, dejando atrás de sí cavidades porosas en la superficie del hormigón que dispersan la luz incidente dándole más brillo.

La migración del agua hacia la superficie del hormigón fresco favorece el depósito rápido de cal que, al carbonatarse, proporciona un claro empaldecimiento de su color. Asimismo su exceso puede provocar manchas, como consecuencia de su movimiento a través de la estructura porosa de la superficie del hormigón.

ADAM [4] considera el contenido de agua como uno de los puntos más delicados de regular durante la fabricación del hormigón, debido, principalmente, a la variación del contenido de agua en los áridos.

8.2. Estabilidad colorimétrica del hormigón

La radiación solar, la humedad y temperatura, así como los diferentes agentes polucionantes son los principales factores responsables por el deterioro del hormigón. No se debe ignorar, de igual manera, la ubicación y posición de los productos fabricados con hormigón con relación a los parámetros antes referidos.

SZADKOWSKI [89] clasifica en tres grupos los principales agentes responsables por los cambios que producen en la superficie del Hormigón Coloreado, a saber:

1. Cambios debidos a la erosión de la matriz de cemento.
2. Cambios debidos al tipo de pigmento.

3. Cambios debidos a la suciedad y otros depósitos sobre la superficie del hormigón.

La erosión puede ser provocada por distintas causas, tales como el agua, el viento, la contaminación ácida, el rozamiento, etc. Sin embargo, tiene siempre el mismo efecto: la desaparición de la capa de finos superficiales, volviendo visible el árido empleado. Como consecuencia, el color final resulta ser una combinación óptica de los puntos de áridos y el fondo que permanece. Se recomienda, portanto, el empleo de áridos con color similar al color que se desea dar al hormigón.

Los pigmentos orgánicos son sensibles a la acción decolorante de la luz solar, así como a la alcalinidad del cemento y de la cal. Entre otros, el azul ultramarino no resiste a los medios alcalinos, con lo cual no resulta adecuado su empleo como agente colorantes del hormigón.

Entre otros factores que afectan la apariencia del hormigón respecto a la intemperie, la suciedad merece un especial cuidado, especialmente cuando la superficie del hormigón es porosa o con relieve. Las características de la superficie del hormigón influyen de manera efectiva como mecanismo de ensuciamiento. El oscurecimiento en fachadas a causa de humos, polvo, manchas de muy diversa índole, son otros factores responsables por los problemas estéticos que sufre el hormigón visto.

CALAVERA [18] considera los depósitos de polvo y los cultivos biológicos como los más importantes mecanismos de deterioro ambiental.

Aunque la pérdida del buen aspecto estético sea un importante efecto de la contaminación biológica, es su poder de retención de humedad su principal efecto a la acción de deterioro del hormigón.

Para combatir la contaminación biológica, la guía de durabilidad del CEB [21] recomienda la utilización de un potente germicida en la superficie del hormigón.

También recuerda la influencia del viento como principal agente responsable por el transporte del polvo que provoca la suciedad del hormigón. Señala, además, la influencia de las dimensiones del polvo en los efectos que causa en las fachadas, clasificándolo en finos (0,01 hasta 1 micra), con gran capacidad para cubrir las superficies, debido a la elevada relación superficie/masa; y gruesos (1 μm hasta 1 mm), normalmente de origen mineral y con pequeña capacidad para adherir a la superficie del hormigón.

Es de fundamental importancia la realización previa de un estudio adecuado de las formas con vistas al mantenimiento de la limpieza de las fachadas, especialmente si éstas se encuentran en ambientes a menudo cargados de polvo o con mucha humedad.

KRAWOSKY [53] atribuye la coloración desigual del hormigón al empleo de diferentes marcas de cementos, segregación acentuada de los materiales, pigmentos mal mezclados, defectos en los encofrados, que provocan una absorción desigual de la humedad, y un curado inadecuado.

Otro factor importante que influye de manera especial en el color del hormigón es la humedad. El control estricto para que las piezas de hormigón tengan una uniformidad en su estructura porosa es esencial. Ello hace necesario que la granulometría y grado de humedad de los áridos empleados en su fabricación sean rigurosamente controlados, para asegurar que no varíe la demanda de agua y con ella la porosidad.

También los acabados son determinantes de la tonalidad que vaya a tener el Hormigón Coloreado. Mientras un acabado con superficie lisa

realza el color, otro que presente una textura más rugosa actúa en sentido inverso, ya que la texturización altera el color del hormigón, debido a la manera en que la superficie refleja la luz incidente.

Para la obtención de hormigón pigmentado de buena calidad es imprescindible la correcta elección de los materiales para el encofrado y los procedimientos de tratamiento final. En la superficie entre el encofrado y el hormigón sin fraguar, se forma, por compactado, una fina capa de pasta (cemento, pigmento) y agua, responsable, en gran parte, del aspecto final del hormigón y su comportamiento en la intemperie.

Dependiendo de las características del material empleado para el encofrado, si es impermeable o absorbente, esta capa de pasta fina se queda en la superficie del hormigón y fragua. En el caso de que el encofrado sea de un material absorbente, como la madera, por ejemplo, una parte del agua se introduce en ella, haciendo que la capa superficial sea más delgada que si el encofrado fuera completamente impermeable. Capas superficiales de gran grosor, sin embargo, producen manchas o fisuras. Tales fenómenos ocurren, indistintamente, en los hormigones pigmentados o sin pigmentos.

Es necesario considerar que la presencia de los pigmentos proporciona una mayor retención del agua, ya que aumentan la proporción de finos de la mezcla.

Para combatir la permeabilidad de ciertos encofrados, se aplica un tratamiento desmoldeante. En este caso es muy importante que se realice un riguroso control sobre el tipo y cantidad del producto empleado, una vez que su uso de forma incorrecta puede provocar manchas y afear la superficie del hormigón. PEREZ LUZARDO [81] recomienda la utilización, siempre que sea posible, de encofrados que no necesitan desmoldeante.

En el caso de que su empleo sea imprescindible, se debe observar lo que recomienda la comisión *CIB W 25*, que orienta su aplicación de forma uniforme y en capa tan fina como sea posible, evitándose siempre la utilización de emulsiones solubles en agua, debido a tendencia que tienen de dar una superficie sucia, de porosidad variable. Recomienda, también, el empleo de agua para humedecer los encofrados de madera frente a utilización de aceite. Alertando, finalmente, para la dificultad que representa esta operación.

Con relación a los tratamientos posteriores con el objeto de dotar al hormigón de superficies con texturas obtenidas a través de procedimientos mecánicos o químicos, se requiere para el hormigón pigmentado el mismo cuidado empleado que cuando se trabaja con aquel que no lleva pigmento incorporado.

En el caso de hormigones con tratamiento superficial es esencial que se considere la influencia del color del árido, que como hemos visto, afectará de manera considerable el color final del hormigón.

ADAM [4] recomienda la utilización de encofrado impermeable, no pulido, cuando se considere de gran importancia la uniformidad general del color.

BÜCNHER [13] pudo comprobar que la temperatura de fraguado tiene incidencia sobre el color final del hormigón pigmentado (*figura 2.3*), dado que ciertos pigmentos tienen limitada su estabilidad térmica, como ocurre, por ejemplo, con el óxido de hierro negro que se oxida alrededor de los 180 °C con posibilidad de viraje hacia el rojo. Existen, sin embargo, pigmentos especiales que son termoestables. Aún de acuerdo con BÜCNHER, la temperatura de fraguado repercute también sobre el color natural del hormigón sin pigmentar.

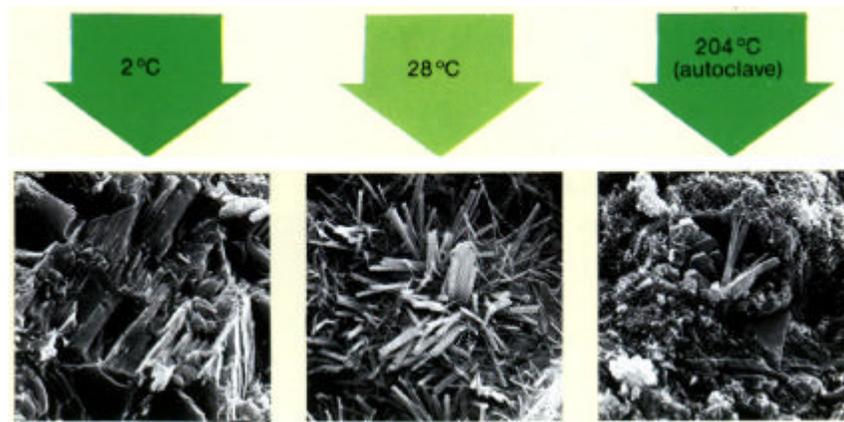


Figura 2.3 – Influencia de las condiciones de curado en el color del hormigón.

FUENTE: BÜCHNER, G. PIGMENTS IN CONCRETE PRODUCTION. 1991)

P. LOPEZ [61] atribuye los problemas de degradación del hormigón que se presentan en la actualidad a que se antepone criterios de mercado (elección errónea de material y rapidez de ejecución, etc.) a los de calidad aceptable y diseño orientado hacia la durabilidad.

8.3. Influencia del amasado y del curado

El amasado influye de forma determinante en el resultado final del hormigón. Es muy importante que las distintas amasadas sean exactamente iguales, incluyendo el orden de vertido de los materiales y el tiempo de amasado, si se desea obtener la misma calidad para los diversos hormigones. Es igual de importante la distribución homogénea de los pigmentos y demás materiales.

ADAM [4] recomienda que se aumente la duración del amasado más allá del tiempo normalmente requerido para un hormigón normal. Considera, además, de gran importancia el control estricto de la docilidad y métodos de transportes elegidos, de cara a evitar variaciones de manejabilidad en el curso del traslado del hormigón, evitándose, siempre, la segregación. Observa además, que los

recipientes deben estar perfectamente limpios de toda sustancia susceptible de manchar el hormigón.

El curado es una de las fases más importantes en el proceso de fabricación del Hormigón Coloreado, por lo que se deberá tener sumo cuidado al seleccionar el método más idóneo de curado, sobretodo en superficies planas horizontales, en las que, por lo general, se desea una apariencia atractiva.

Se deberá evitar el uso de riego con agua o de encharcamiento porque se incrementa la pasta y se producen eflorescencias en la superficie, lo cual resulta perjudicial para la uniformidad del color. Todo tipo de recubrimiento húmedo, tales como las arpilleras, no es adecuado, siendo incluso más desaconsejables que los aportes de agua por riego.

La norma ACI 302 IR-80 hace la siguiente recomendación: *Las membranas plásticas y papel impermeable no deben usarse para curar los pisos coloreados porque provocan la distribución irregular de la humedad de la superficie superior del hormigón, lo cual da como resultado una superficie con manchas debido a la inadecuada migración y distribución de los materiales solubles del hormigón* .

Según DABNEY [28] tampoco es recomendable el curado por medio de aire, porque el hormigón se cura de manera inadecuada, y se obtiene menor resistencia y dureza superficial. También considera no recomendable el empleo de arpilleras u otros recubrimientos húmedos, debido a falta de uniformidad de color que pueden causar.

De acuerdo con KRAWOSKY [53] los compuestos incompatibles del curado químico pueden dejar una apariencia opaca lechosa que oscurece el color.

Generalmente, el Hormigón Coloreado debe curarse con un producto recomendado por el fabricante del agente colorante, que suele estar

formado de compuestos especiales, que se formula únicamente para el empleo en acabados de llana en Hormigón Coloreado y que se iguala al color existente. Exhibe buenas características de curado al mismo tiempo que intensifica el color del hormigón, produciendo una apariencia superficial más uniforme.

Según MONKS [68], incluso el hormigón curado en condiciones ideales en las primeras 48 horas, puede tener su apariencia afectada por la humedad y secado no apropiado.

8.4. Influencia del grado de compactación

El tono y estabilidad del color están marcadamente influidos por la compactación. Estudios realizados por VEIT [98] demuestran que se puede atribuir a una mejor compactación del hormigón la obtención de colores más vivos y con mayor estabilidad bajo los efectos de los agentes de deterioro del hormigón. Además, es sabido que una compactación óptima reduce las eflorescencias, influyendo, de una manera determinante, en el aspecto final del hormigón.

8.5. Eflorescencias

Las eflorescencias representan un gran problema estético para los hormigones, y en particular cuando se trata de hormigones coloreados y los imperativos estéticos son especialmente rigurosos. Está claro que se observan mejor en un hormigón rojo (*fotografía 2.6*) que en el gris natural. En el blanco, sin embargo, prácticamente son inapreciables.

Las eflorescencias tienen su origen en el hidróxido de calcio que se forma al fraguar el cemento y, disuelto en el agua de amasado, se deposita en la superficie, reaccionando con el dióxido de carbono del aire y formando el carbonato cálcico insoluble. Este proceso puede repetirse en sucesivas absorciones y posteriores migraciones de agua a la superficie, como por ejemplo, debido a la lluvia.

Con el paso del tiempo el carbonato cálcico formado sigue combinándose con el dióxido de carbono transformándose en bicarbonato cálcico, el cual sí es soluble y desaparece con el agua de lluvia. Estudios llevados a cabo por KRESSE [57] comprobaron que el proceso de desaparición de las eflorescencias puede durar entre 1 y 2 años, dependiendo de las características climáticas de la zona a la que está expuesto el hormigón.

Se recuerda que la baja densidad del hormigón, el desencofrado temprano y un tiempo cálido y seco, seguido por otro frío y húmedo, son responsables por un aumento de las eflorescencias.

DELIBES [31] relaciona su existencia directamente con la permeabilidad estructural y la textura del hormigón.

Existen diferentes medios para combatir la aparición de las eflorescencias. La utilización de agentes hidrofugantes y el recubrimiento superficial son los que mejores resultados proporcionan.

Los hidrofugantes actúan impidiendo la presencia de agua en forma líquida, no evitando, sin embargo, la condensación de vapor de agua en los capilares del hormigón, con lo cual no evita la formación de eflorescencias secundarias.

El recubrimiento de la superficie del hormigón con resinas acrílicas u otros productos es un procedimiento que se utiliza para impedir la aparición de eflorescencias secundarias. Sin embargo, no resuelve los problemas debidos a una mala fabricación del hormigón.

En ambos casos es esencial la realización de ensayos previos a su utilización.

La guía de durabilidad del CEB [21] recomienda cepillar las eflorescencias irregulares y locales, tan pronto como sea posible, preferentemente antes que se produzca la carbonatación.

En la bibliografía estudiada no se ha encontrado ninguna solución definitiva para el problema de las eflorescencias, remitiéndose siempre a actuaciones que sólo buscan paliar sus efectos.

9. Colorimetría

La percepción de los colores es una impresión sensorial, como resultado de la luz reflejada en un determinado objeto. Su medida sólo enumera sus propiedades físicas. La base de la métrica de los colores se basa sobre en los resultados empíricos obtenidos a través del estudio de la visión de los mismos sobre un gran número de objetos.

El espectro de luz cubre unas longitudes de ondas muy amplias, de las que el ojo humano sólo detecta una pequeña zona localizada entre 380 y 780 nm (*figura 2.4*), denominada zona visible del espectro. Valores superiores a 700 nm representan el infrarrojo, y los inferiores a 380 nm, el ultravioleta. En función de la longitud de onda estimulan de forma diferente la retina y establecen el espectro del color, disponiéndose en orden el rojo, naranja, amarillo, verde, azul y violeta. De estos colores, el rojo, el verde y el azul son considerados como los colores primarios. Los demás se obtienen a partir de la mezcla entre ellos.



Figura 2.4 - Espectro visible por el ojo humano (longitudes de ondas - nm)

Debido al carácter subjetivo de la sensación cromática, la descripción objetiva de un color resulta compleja, puesto que representa un atributo psicofísico de los objetos. Éstos absorben toda o parte de la luz, reflejando el resto. Para medir el color de los objetos, se supone generalmente que estos son opacos; sólo nos interesa la fracción de la radiación que es reflejada o absorbida. La luz reflejada del objeto estimula la retina del observador y es reconocida por el cerebro como un color que es una mezcla de las diferentes longitudes de ondas.

Para la medición de los colores se ha convenido trabajar nada más que con dos o tres composiciones espectrales, precisadas por una recomendación de la *Comission Internationale de IEclairage (CIE)*.

Cuando se habla de medida de colores, se entiende por la determinación de la curva espectral de reflexión, sobre todo en razón del hecho que existe una relación simple entre la reflexión y la concentración de pigmento. Es entonces posible establecer fórmulas basándose en las medidas de reflexión.

Se ha comprobado a través de numerosos ensayos que es posible interpretar también de forma exacta la visión de los colores por el ojo humano, si se admite que existen en la retina tres receptores de sensibilidad diferentes, es decir, que la impresión de los colores está provocada por la excitación de tres centros que conducen al cerebro. Esto significa igualmente que cada color puede estar suficientemente descrito por tres valores (cifras) o tres nociones. Los colores son, a menudo, descritos por su tono, croma y luminosidad.

El Tono mide la composición cromática de la luz reflejada por el objeto que llega al observador, determinando la calidad del estímulo luminoso, que es juzgado como rojo, verde o azul.

La Croma es un atributo de la calidad del color, hace mención a la profundidad, viveza, pureza y saturación del color. Determina el grado

de separación entre el color puro definido por el Tono (Hue) y el color gris o acromático.

La Luminosidad cuantifica la cantidad del estímulo luminoso que recibe el observador, determinando el grado de luminosidad, brillo, o la oscuridad de un color. Se mide a través de una escala que va desde el negro puro (cero) hasta el blanco puro (cien).

La definición y determinación de estos atributos del color están directamente afectados por varios factores, como pueden ser la distancia entre el observador y el objeto, el tipo de fuente luminosa, el entorno o la capacidad de percepción de cada persona.

La distancia entre el observador y la superficie también influye en la percepción del color. Grandes irregularidades que aparecen como defecto visible cuando se analizan desde un punto cercano, se desvanecen al alejarse.

El tipo de fuente luminosa y el propio entorno donde se encuentra el objeto son factores que influyen en la definición y determinación de los atributos del color.

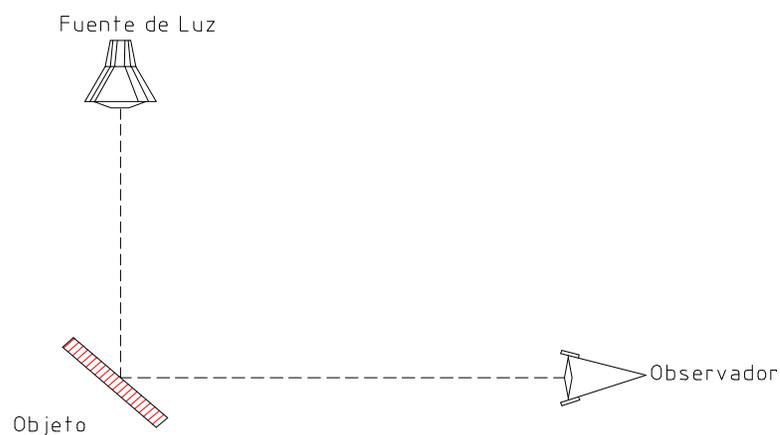


Figura 2.5 - Factores determinantes de la percepción del color

Las zonas de sensibilidad de estos tres espectrales del ojo han sido determinadas por ensayos y normalizadas en 1931 por la CIE (Comisión Internacional de la Luz). Se les designó bajo el nombre de curvas de distribución espectral **x**, **y** y **z** del ojo en visión normal. Se puede constatar que uno de estos centros de excitación (curva **z**) es sobretodo sensible a la luz azul. La curva **y** indica la zona de sensibilidad al verde. El centro **z** es principalmente sensible al rojo, pero acercándose ligeramente el azul.

Las sensaciones cromáticas observadas entre cada individuo suelen ser distintas entre sí, como consecuencia de la diferencia de percepción visual existente entre ellos.

Un material definido, con su superficie determinada, se caracteriza por la relación entre la cantidad de luz recibida y la reflejada, determinando su aspecto más claro u oscuro. La percepción visual de su color depende, entre otros factores, de las condiciones de su estructura superficial. Las diferencias de impresión óptica son consecuencias del modo en que la luz incidente es recibida y reflejada.

9.1. Coordenadas cromáticas

En función de los atributos del color se han establecido cartas de colores y escalas colorimétricas para la determinación del color de los objetos.

9.1.1. Carta de color Munsell

Este sistema se basa en 10 tonos, cinco principales (rojo, R, amarillo, Y, verde, G, azul, B, y morado, P) y cinco intermedios referidos a las mezclas de tonos iguales. Es un método sencillo y barato de cuantificar el color; sin embargo, no evita el problema de defectos de visión del observador. También es necesario tener en cuenta que estas cartas de comparación se deterioran con el tiempo. Además, no tienen presente,

muchas veces, el tipo de iluminante, producen terminologías confusas y sobre todo no existe memoria del color por el observador. Debido a estas dificultades, se recomienda la utilización de métodos que permitan conocer de forma numérica el color de los objetos.

9.1.2. Valoración numérica del color

El concepto de triestímulos está basado en que es posible la reproducción de cualquier color que distinga el ojo humano a través de la mezcla de tres colores fundamentales:

Tabla 2.5 - Longitud de onda de los colores rojo, verde y azul

Color	Longitud de Ondas
ROJO (R)	700 nm
VERDE (V)	546,1 nm
AZUL (A)	435,8 nm

La cantidad (c) de un color (C) estará expresada por las cantidades de los tres colores, representados por la ecuación:

$$q_{(c)} = r.R + v.V + a.A$$

El blanco está reproducido por la mezcla en partes iguales de los tres colores básicos. Se fija, entonces, la unidad para la cantidad de primario que interviene en la mezcla (r,v,a) y que se usa como escala del instrumento de medición.

Se obtiene:

$$1 = r + v + a$$

Siendo:

$$r = \frac{R}{R+V+A} \quad v = \frac{V}{R+V+A} \quad a = \frac{A}{R+V+A}$$

Los valores $r(x)$, $v(y)$ y $a(z)$ son denominados coordenadas cromáticas y $R(X)$, $V(V)$ y $A(Z)$, son los valores de los triestímulos. La conjunción de la longitud de onda reflejada o no absorbida por el objeto y el espectro sensible del ojo humano, nos indica los triestímulos. Tales parámetros son obtenidos, como se ha dicho anteriormente, a través de los colorímetros y espectrocolorímetros. Se puede, de esta manera, expresar gráficamente cualquiera de las coordenadas cromáticas.

Existen diferentes escalas que representan, de manera gráfica, el color, tomando como base los triestímulos. Nos limitamos a detallar las siguientes escalas:

- Coordenadas Cromáticas **L^* , a^* , b^***
- Coordenadas Cromáticas **L^* , C^* , h**

Las Coordenadas Cromáticas **L^* , a^* , b^*** son las que se suelen emplear en la gran mayoría de las normativas de análisis del color. Su principal ventaja está en que se evitan los errores de percepción cometidos con la Carta Munsell. Su representación es un diagrama cromático (*figura 2.6*) en el que el eje **$-a^*$, $+a^*$** representa la variación del color del verde al rojo y el eje **$-b^*$, $+b^*$** representa la variación del azul al amarillo y **L^*** corresponde a la luminosidad. El centro del diagrama es acromático y según nos desplazamos hacia la periferia del diagrama la saturación del color es mayor.

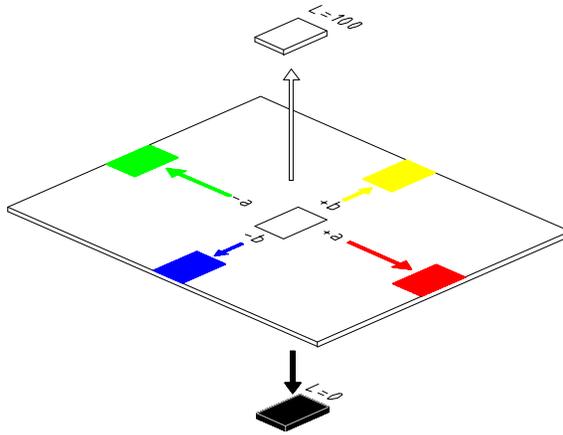


Figura 2.6 - Coordenadas Cromáticas $L^*a^*b^*$

Las Coordenadas Cromáticas $L^* C^* h$ se representan en un diagrama en el cual la coordenada L^* corresponde a la luminosidad del color, C^* es la croma y h es el ángulo hue (tono). El valor de la Croma es cero en el centro y se incrementa al aumentar la distancia con el centro del diagrama (figura 2.7). El ángulo hue se mide siempre desde el eje $+a^*$.

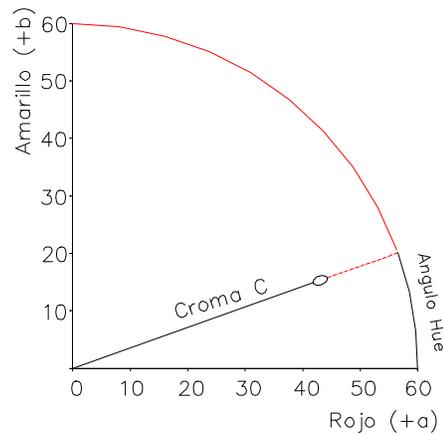


Figura 2.7 - Coordenadas Cromáticas L^*C^*h

9.2. Diferencias cromáticas

Utilizándose las coordenadas cromáticas L^* a^* b^* se puede comparar el color de los objetos y cuantificar sus diferencias, lo que es difícil de establecer por el ojo humano, sobre todo cuando se trata de tonos similares.

En la escala L^* a^* b^* la diferencia de color se establece en función de la variación de los siguientes parámetros:

+ L^* = más Luminoso	- L^* = más Oscuro
+ a^* = más Rojo	- a^* = más Verde
+ b^* = más Amarillo	- b^* = más Azul

La diferencia total de color (E^*), se puede calcular a través de la expresión:

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

Sin embargo, esta determinación en el cambio del color es específica para una valoración total, sin que se pueda saber si las diferencias son debidas al cambio de tono o de la luminosidad. Debido a esto, se recomienda cuantificar las variaciones a través de los cambios de Luminosidad, Croma y Tono, establecidos por medio de la escala L^*C^*h . Generalmente, las alteraciones en el tono son menos perceptibles al ojo humano que las de la cromía o luminosidad.

La diferencia de Tono (Δh) que produce los cambios de color, se puede expresar por la ecuación:

$$\Delta h = \sqrt{(\Delta E^*)^2 + (\Delta L^*)^2 + (\Delta C^*)^2}$$

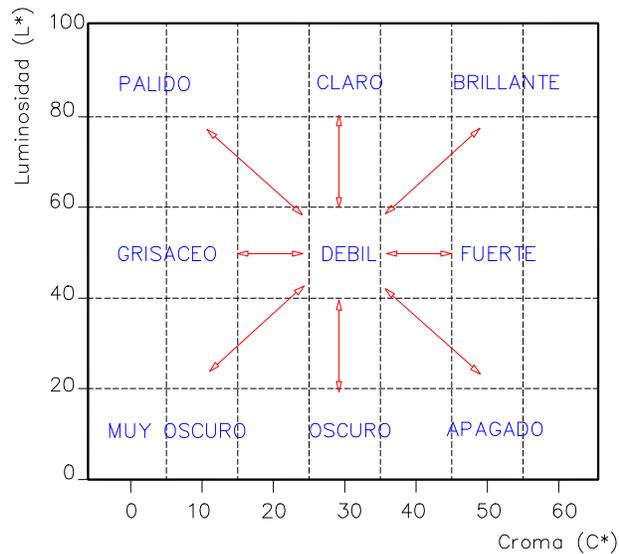


Figura 2.8 - Términos de la variación de la croma y luminosidad. (Fuente: FORT, R. Caracterización Cromática de los Materiales de Construcción)

Esta determinación de las variaciones cromáticas permiten establecer unos límites de tolerancias en el cambio de color de los objetos estudiados.

Las coordenadas cromáticas permiten una valoración precisa de la variación del color. Sin embargo, en ciertas ocasiones, se hace necesario expresar las variaciones de una manera menos técnica, más subjetiva. FORT [35] sugiere una combinación de términos que describen el color, de acuerdo con lo expuesto en la *Figura 2.8*.

9.3. El Espectrofotómetro

El espectrofotómetro permite una valoración numérica precisa y comparativa entre los distintos materiales y sus diferentes tratamientos de conservación (ASTM E 308 y ASTM D 2244, 1985).

Se emplea una técnica no destructiva, ya que no afecta al soporte sobre el que se realizan las medidas y permite obtener datos

sistematizados. El análisis del color de los objetos se realiza *in situ*. Las medidas deben ser efectuadas siempre en la misma cara de las probetas y en condiciones de medidas normalizadas, considerándose siempre el ángulo de observación, el tipo de luz empleada y las condiciones ambientales, como pueden ser la temperatura y humedad relativa.



Figura 2.9 - Espectrofotómetro MINOLTA