

CAPÍTULO I

EL OBJETO DE CONOCIMIENTO

1. EL OBJETO DE CONOCIMIENTO

1.1. El Problema

1.1.1. Antecedentes

Siendo el hormigón el material de construcción más empleado, por muchos años la ingeniería se ha preocupado de la resistencia, la trabajabilidad y de su durabilidad, dejando algo de lado los aspectos estéticos.

Hoy en día, el cliente final, no está especialmente preocupado por la utilidad, ciclos de producción, estabilidad en el transporte, etc. Este cliente está interesado en las mejoras estéticas del hormigón. Esto significa, por un lado, un hormigón homogéneo sin defectos (válido para todo tipo de productos de hormigón), y por otro, éste debería integrarse bien en el medio ambiente. La intención del ser humano ha sido, es y siempre será proteger nuestro entorno para que sea un lugar bello y agradable donde vivir. El hormigón gris que conocemos, a pesar de ser funcional y de que cumple con los requerimientos técnicos, ciertamente no contribuye demasiado a la belleza del entorno. El constructor se interesa más por los problemas que le plantea la forma que por los del color, y se resiste a admitir que es este último el que anima y destaca la construcción, el que crea un interés y requiere la respuesta emotiva del espectador.

Un acabado más estético es logrado con el pintado o con el recubrimiento de las superficies de hormigón, pero esto trae consigo un arduo mantenimiento periódico de dichas superficies, debido a que la pintura desaparece con el paso del tiempo por las inclemencias climatológicas, las superficies se dañan por agentes físicos y/o químicos, creando en éste una nueva superficie que mostrará un espectro totalmente diferente del color original, veremos manchas grises sobre superficies pintadas debido a desprendimientos de la pintura, y colores degradados debido a la baja estabilidad de los rayos UV.

1.1.2. Planteamiento

Las variables comprometidas con el arduo trabajo de mantenimiento del recubrimiento y pintado del hormigón, son directamente proporcionales al trabajoso empleo de cada uno de los productos de recubrimiento.

El arduo trabajo de mantenimiento del hormigón se debe a:

- Laborioso trabajo de pintado
- Laborioso retirado y colocado de piezas de recubrimiento.

Los efectos más desfavorables al presentarse esta situación es que ocasionan un incremento del presupuesto general de mantenimiento por metro cuadrado de superficie de hormigón visto, lo que da como resultado pérdidas económicas para el propietario, por gastos periódicos de mantenimiento.

Para eliminar el problema de mantenimiento de pintura y recubrimiento del hormigón se podría estudiar las siguientes alternativas:

- Hormigón estructural de color sin necesidad de recubrimientos ni pintura
 - Hormigón a base de pigmentos naturales de óxido de hierro
 - Hormigón a base de pigmentos sintéticos de óxido de hierro
- Hormigón estructural con cemento y agregados blancos
- Hormigón visto del color original (gris) con texturas superficiales

1.1.3. Formulación

El planteamiento de este trabajo de investigación surge de la siguiente pregunta:

¿Cómo reducir el trabajo de mantenimiento de recubrimiento y pintura del hormigón?

El generar un hormigón en el que se elimine las tonalidades grises propias de éste, le da una mejora estética tanto o más como lo hacen la pintura y los recubrimientos.

Económicamente, el cemento blanco tiene un costo elevado y a la hora de la fabricación, transporte y puesta en obra el hormigón blanco implica un cuidado riguroso y la utilización de herramientas especiales.

En consecuencia con las alternativas de solución planteadas, solo es posible el hormigón estructural de color a base de pigmentos de óxido de hierro.

1.1.4. Sistematización

De las alternativas posibles, se determinará cuál será la más apropiada, técnica y económicamente, para eliminar el arduo trabajo de mantenimiento de pintura y recubrimiento de estructuras de hormigón armado, con este fin se realizará el análisis de cada una de las soluciones planteadas.

Hormigón a base de pigmentos naturales de óxido de hierro: Los pigmentos naturales son tierras coloreadas de manera natural por óxidos o hidróxidos metálicos, principalmente hierro. Los pigmentos naturales de procedencia de extracciones mineras, localizadas en distintas regiones del mundo, se calcinan a elevadas temperaturas y se hacen pasar por sucesivas cribas para reducir el tamaño de la partícula y controlar su color. Se tratan para eliminar parte de las impurezas y se muelen finamente, o simplemente se muelen sin tratamiento previo. Son conocidos como óxidos naturales o tierras colorantes. La tierra natural calcinada se tamiza hasta conseguir un tamaño uniforme de los granos, y los fabricantes de dichos pigmentos deben garantizar que las partículas tengan una dimensión regular.

Los pigmentos naturales válidos son los derivados de óxidos de metales y, de manera casi exclusiva, los óxidos ferrosos y férricos para la gama de los negros, rojos, amarillos. Únicamente, los minerales puros garantizan no afectar la resistencia.

Hasta muy avanzado el siglo XIX eran los únicos disponibles. A finales del siglo pasado la mayoría de las explotaciones tradicionales en Francia, Italia y España fueron clausuradas. Hoy en día su uso ha quedado muy restringido debido a que el precio se va aproximando al de los sintéticos, su fuerza colorante es baja, los tonos son sucios

amarronados en comparación con los sintéticos y la riqueza y tono están sometidos a fluctuaciones.

Hormigón a base de pigmentos sintéticos de óxido de hierro: Los pigmentos sintéticos básicamente consisten en óxidos de hierro. De igual modo, se deben escoger óxidos técnicamente puros, sin aditivos ni constituyentes secundarios, de un gran poder colorante, cualidad que depende de la naturaleza y pureza, así como de su finura.

Los pigmentos sintéticos son aquellos que se obtienen después de determinadas reacciones químicas partiendo de unas materias primas iniciales. Su desarrollo parte de finales del siglo XIX y principio del XX primeramente con más protagonismo en Inglaterra y después en Alemania.

Los pigmentos de óxido más importantes son

Negro	Óxido de hierro negro
Rojo	Óxido de hierro rojo
Amarillo	Óxido de hierro amarillo
Marrón	Óxido de hierro marrón

Si bien estos pigmentos tienen el mismo origen mineralógico que los naturales, al ser obtenidos por procesos controlados y estandarizados, tienen la ventaja de otorgar alta pureza, elevado brillo y gran poder decoloración. Estos pigmentos son estables a la intemperie, es decir a la luz UV, al ácido carbónico, a cambios fuertes en la humedad y la temperatura, a los ácidos, a los álcalis y a los componentes del cemento.

De las alternativas planteadas, se define como alternativa viable de estudio, el hormigón estructural de color a base de pigmentos sintéticos de óxido de hierro.

1.2. Objetivos

El presente trabajo de investigación tiene los siguientes objetivos:

1.2.1. General.

- Precisar el efecto de los pigmentos en polvo de óxido de hierro en el color y en la resistencia mecánica a compresión del hormigón, para un diseño de mezcla con una resistencia f'_{ck} de 210 Kg/cm², en base a especificaciones ASTM, con el fin de determinar el porcentaje de cantidad optima de pigmento para un hormigón estructural de color integral.

1.2.2. Específicos.

- Evaluar las características de los agregados (grava, arena), a los efectos de identificar su funcionamiento, compatibilidad y trabajabilidad.
- Realizar una investigación técnica de propiedades físicas y reacciones químicas mediante ensayos de laboratorio practicados al pigmento en concordancia a las especificaciones ASTM C-979.
- Analizar el comportamiento del pigmento en una probeta de mortero expuesta a la luz solar y la intemperie por 500 hrs.
- Establecer el procedimiento de diseño de una mezcla de hormigón de color, con agregados de origen local (comunidad de Santa Ana) , para una mezcla con una resistencia f'_{ck} de 210 kg/cm²
- Comparar las mezclas de: hormigón de color vs. Hormigón convencional, con el fin de poder verificar si el pigmento en polvo incide o no en la resistencia a compresión.
- Generar una ecuación mediante ajuste de curva que permita determinar la resistencia a compresión de un hormigón de color en función al porcentaje de pigmento adicionado.

1.3. Justificación.

Las razones por las cuales se elabora el trabajo de investigación son las siguientes:

1.3.1. Teórica

La investigación propuesta busca, mediante la aplicación de teorías y conceptos básicos existentes, aportar con innovaciones tecnológicas, para enriquecer conocimientos en los procesos de diseño de mezclas y su desarrollo mismo.

1.3.2. Metodológica

Para lograr el objeto de estudio, a través de la selección de un hormigón patrón y a partir de dicha dosificación, se pretende incorporar el pigmento de óxido de hierro durante la mezcla de los áridos, antes de agregar el cemento y el agua, de acuerdo a normas internacionales, aplicando un porcentaje de pigmento por cantidad de cemento y determinando si la adición de pigmento afecta o no en la resistencia a la compresión del hormigón.

1.3.3. Práctica

Al darle color a la masa de hormigón, el espectador ya no tendrá el sentimiento de obra inacabada o falta de terminación que le confería las tonalidades grises, por lo que la pintura y recubrimientos en su superficie serán innecesarios, y efectivamente solucionará el problema del arduo trabajo de mantenimiento.

1.4. Hipótesis

Las hipótesis orientan la investigación hacia un horizonte que puede resultar verdadero o falso, en el cual, el resultado se sabrá hasta el final de la investigación, y del cual dependerán varias opciones como por ejemplo, si la investigación continua o se da por concluida. Para nuestro caso como parte de este trabajo de investigación, se plantea la siguiente hipótesis:

- ✓ La adición de pigmento de óxido de hierro en polvo en una proporción que varía desde 4% hasta la tasa de dosis máxima establecida por norma de 10% por cantidad de cemento, generará un hormigón estructural de color integral que mantendrá un nivel de rendimiento comparable a la del hormigón de referencia en cuanto a su resistencia mecánica a compresión.

1.5. Alcance del estudio

1.5.1. Restricciones y limitaciones

Se analizará el pigmento mediante ensayos de laboratorio que recomiendan las especificaciones ASTM C-979¹; las cuales proporcionan los requisitos mínimos de los pigmentos para concreto con un color integral; por lo que queda fuera del alcance de este trabajo de investigación la aplicación de otras normas y estándares internacionales en relación a pigmentos colorantes.

Estos ensayos comprenden:

- la resistencia del pigmento a los Álcalis,
- el porcentaje de solubilidad en agua,
- humectabilidad del pigmento en agua,
- la resistencia a la luz y estabilidad de curado atmosférico en muestras de mortero y
- las características físicas del pigmento de óxido de hierro

Lo referente a ensayos de algunos de los elementos componentes del hormigón, como lo son ensayos al agua y al cemento, no serán realizados durante la etapa experimental, ya que el objetivo principal de la investigación es indagar sobre el pigmento, al ser usado éste como un colorante integral del hormigón.

Al usar cemento gris, la tonalidad del color no será tan intensa como si fuese con cemento blanco y donde no podrá ser demostrado con los pigmentos debido a la poca cantidad de pigmentos que se tendrá para dichos ensayos.

En esta investigación se usará la técnica de coloración integral en el hormigón, por medio de la aplicación de pigmento en polvo de óxido de hierro. Cualquier otra técnica aplicable a la coloración de hormigón queda excluida de los alcances de esta investigación.

Se realizarán especímenes de prueba con pigmentación integral del hormigón, donde se pueda determinar exclusivamente: Resistencia a la compresión de los especímenes pigmentados. No se realizarán ensayos de retracción y agrietamiento de las muestras.

¹ANEXO 1. Normas y especificaciones de la ASTM

La resistencia a la luz del hormigón coloreado, según la especificación ASTM C-979¹ debe ser medida con un aparato de tipo HE ó E descrito en la ASTM G-23; este aparato no se encuentra a la disposición en el laboratorio de la universidad de Tarija por lo que la resistencia a la luz será comprobada únicamente exponiendo las muestras a la luz solar durante 500 horas como sugiere la norma y por medio de inspección visual.

Esta investigación, por tratarse de un trabajo de graduación universitario, tiene un tiempo límite de realización según reglamentos de la Universidad; por lo que todos los monitoreos, evaluaciones y presentación de los resultados en los experimentos, serán los analizados durante un periodo de 13 semanas como máximo.

Debido a la escasez del pigmento y al tipo de aparato requerido, no se podrá llevar a cabo el ensayo en el cual se determinara el punto de saturación del pigmento, o dicho de otra manera, la cantidad a la cual por mas pigmento que se le agregue al hormigón, éste ya no cambia su color o tonalidad.

1.6. Aspectos metodológicos

1.6.1. Tipo de estudio

La investigación a realizar en este trabajo, será de tipo experimental exploratoria, con la fabricación de especímenes de hormigón pigmentado con óxido de hierro y la utilización de agregados y cemento de origen local.

La metodología experimental tiene como fin determinar una serie de pasos o acciones que permitan estudiar de manera eficiente los efectos de la adición de pigmento en las propiedades del hormigón.

El diseño experimental tiene por objetivo determinar el efecto producido por el pigmento y porcentaje de aplicación de éste en las propiedades del hormigón, tanto en estado fresco como endurecido.

Se regirá en el diseño de un hormigón convencional para uso estructural, basados en los ensayos de A.S.T.M. para una mezcla de hormigón con resistencia a la compresión de 210 Kg/cm², ya que se tiene como propósito alterar la mezcla patrón adicionando pigmentos sintéticos de óxido de hierro en tres porcentajes diferentes, de manera que proporcione

color a la totalidad de la masa de hormigón, tratando de conservar y/o mejorar la característica mecánica a compresión, a pesar de que el pigmento actúa dentro de hormigón como impureza.

De esta manera finalmente generar una ecuación en la se determinara la resistencia mecánica a compresión para un cierto porcentaje de pigmento.

1.6.2. Metodología de investigación

El tipo de metodología que se utilizará en la realización de esta investigación será el método científico, en vista que en dicho método se hace uso de un levantamiento de información, donde se hace una recopilación de sucesos y antecedentes que dependiendo de su análisis se buscaran opciones de soluciones factibles o viables de los problemas presentados; para el caso de este trabajo de investigación, por ser de índole novedoso en esta región, no se cuenta con suficiente información histórica disponible del caso específico, ni un problema definido con importancia significativa, sin embargo de lo que se trata es de presentar un nuevo material disponible para su uso en la industria de la construcción, por tanto se abordaran temas que tengan relación con el objeto de estudio de este trabajo en la búsqueda de la viabilidad técnica de uso del óxido de hierro como colorante de hormigón estructural utilizando agregados locales.

Esta investigación se desarrollara en tres etapas, en las cuales se tratara de abordar los más significativos criterios de experimentación en hormigón coloreado, así como el estudio de las posibles variaciones en las características del estado fresco y endurecido. Posteriormente se analizaran los resultados obtenidos en los experimentos para plantear posibles recomendaciones de uso del pigmento y su aplicación.

1.6.2.1.Etapa Técnico-Investigativa

Esta etapa incluirá la investigación de las técnicas y procesos actuales de coloración del hormigón, así como de los materiales empleados para ello. Además se analizaran las propiedades físicas, las normativas aplicables a pigmentos y los ensayos de laboratorio requeridos.

1.6.2.2.Etapa Técnico-Experimental

1.6.2.2.1. Diseño Experimental

Para poder obtener una respuesta válida en la investigación, se llevaran a cabo una serie de ensayos de laboratorio, que arrojaran valores que serán tabulados para poder comprender e interpretar el comportamiento de los elementos del hormigón en estudio.

Estos ensayos comprenden:

Análisis del pigmento para dar fe de:

- la resistencia del pigmento a los Álcalis,
- el porcentaje de solubilidad en agua,
- humectabilidad del pigmento en agua,
- la resistencia a la luz y estabilidad de curado atmosférico en muestras de mortero y las características físicas del pigmento de óxido de hierro;

Ensayos siempre mencionados en la norma ASTM C 979¹.

Caracterización de los agregados. Es primordial conocer las características de los agregados que participarán tanto en la dosificación del hormigón patrón como en la dosificación del hormigón de color. Entre las caracterizaciones de los materiales que se realizará son:

- Granulometría del agregado fino.
- Granulometría del agregado grueso.
- Peso específico del agregado fino.
- Peso específico del agregado grueso.
- Peso unitario del agregado fino.
- Peso unitario del agregado grueso.

El objetivo del desarrollo de esta serie de experimentos es medir el cambio en las variables de resistencia y color que presenta un hormigón al ser pigmentado con óxido de hierro. Para lo cual se tiene que contar con un número suficiente de especímenes fabricados.

1.6.2.2.2. Normativa Aplicable.

La normativa aplicable en esta etapa del estudio será la especificación ASTM C-979¹, la cual rige las especificaciones que deben cumplir los pigmentos para color integral en el hormigón. El pigmento se analizara únicamente bajo esta especificación.

Los cementos portland o los cementos especiales empleados en el hormigón de color deben cumplir con los requisitos especificados en las normas ASTM C150, C595, y C845.

Al momento de elegir los agregados, ya sea gravas o arenas, se debe considerar una diversidad de factores como el color, la resistencia, el tamaño, la forma, la gradación, la textura, la durabilidad, el costo y la disponibilidad, para así poder alcanzar resultados favorables. Es normal utilizar agregados de densidad normal o liviana que se ajustan a las normas ASTM C 33¹.

1.6.2.2.3. Materiales A Utilizar.

Los materiales a utilizar durante toda esta investigación técnica experimental, serán los siguientes: Agregados de origen local, cemento producido en el Puente de marca El Puente y pigmento en polvo de óxido de hierro.

1.6.2.2.4. Estabilidad del pigmento y los efectos en el hormigón

Posteriormente de los ensayos que se le practicará al pigmento, y a los agregados, siempre dentro del cumplimiento de la norma ASTM, está el experimentar y determinar los efectos secundarios que la adición del colorante provoca en las propiedades del hormigón fresco y endurecido. Por ello, en esta etapa de la investigación se ensayaran mezclas pigmentadas de hormigón, donde se realizaran pruebas de: resistencia mecánica a la compresión.

Según la normativa de ASTM C-979¹, respecto a los colorantes para concreto, no puede utilizarse un porcentaje mayor al 10% del peso del cemento de pigmentos, debido a ello se utilizaran dosificaciones de 4%, 6% y 10% para la mezcla de hormigón ensayada en esta etapa.

Dosificación del hormigón de color con pigmentos de óxido de hierro, una vez obtenida la dosificación patrón, se incorporara el pigmento durante la mezcla de los áridos, antes de agregar el cemento y el agua, aplicando variaciones de porcentajes de 4%, 6% y 10% de

pigmento por cantidad de cemento. La dosificación se realizara para dos colores de pigmento.

Elaboración de probetas. La medida de la resistencia a compresión se realizara mediante pruebas estandarizadas. Por lo tanto las probetas serán elaboradas en cilindros de 15cm de diámetro y 30cm de alto.

Rotura de probetas. La información de los datos para la rotura de probetas se basara en el procedimiento probabilístico de muestreo aleatorio simple, es decir cada medición tendrá una muestra de 4 probetas para cada color.

Con la finalidad de estudiar la evolución de fraguado se someterán las probetas a la resistencia mecánica de compresión a los 14 y a los 28 días de edad. Proyectando una cantidad de 24 probetas por color, y 8 probetas de hormigón simple, es decir, en total 56 probetas.

1.6.2.3. Etapa analítica de interpretación y presentación de los resultados en la investigación.

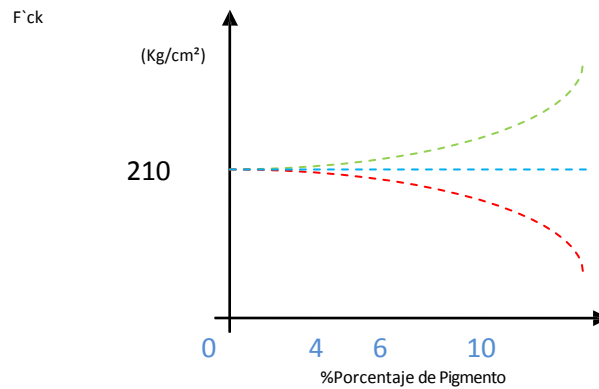
En esta etapa del estudio será donde se determinara la viabilidad técnica del uso del pigmento de óxido de hierro con agregados locales para dar color integral al hormigón, mediante el análisis general de los resultados en los ensayos de resistencia del hormigón pigmentado incluyendo la resistencia a la luz.

Además, será en esta etapa en donde se comprobará la hipótesis planteada anteriormente.

Para finalizar esta etapa y el trabajo de investigación se incluirán conclusiones generales de la investigación, conclusiones generales del estudio y las recomendaciones pertinentes; así también las recomendaciones para posibles estudios futuros o continuaciones de esta investigación.

1.7. Tratamiento de la información.

Una vez completa la recolección de datos se procederá a los cálculos matemáticos en el cálculo de gabinete. Una vez obtenidos los resultados de los esfuerzos a compresión de las probetas en función a cada uno de los porcentajes, se desarrollará una ecuación empírica a partir de un ajuste de curva para cada color de pigmento, con la ayuda de una gráfica en el plano cartesiano, que como dato en el eje horizontal será el porcentaje de pigmento en el hormigón y en el eje vertical la resistencia a compresión obtenida para cada porcentaje.



CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Introducción

El capítulo comprende la información generalizada sobre el hormigón y sus diversos tipos y componentes, las pruebas básicas para el hormigón en estado fresco, las principales características del hormigón endurecido y el diseño simplificado de mezclas de hormigón de peso normal según el método ACI 211.1.

Con referencia al hormigón de color, este capítulo profundiza y presenta algunos de los métodos más utilizados para la coloración del hormigón por medio del uso de colorantes de óxidos de hierro en polvo que son adicionados a la mezcla de hormigón durante su fabricación.

2.2. Hormigón

El hormigón tiene antecedentes históricos desde la época de los romanos 200 años A.C. Los romanos utilizaron un tipo de hormigón que constituyó una revolución tecnológica en la construcción e hizo posible que realizara edificaciones magnificas desde el punto de vista estructural y estético. Utilizaban el hormigón para puentes, cúpulas, paredes, puertos, calles y sistemas de drenaje y canalizaciones de agua.

La argamasa romana, fabricada con cal y puzolana (roca volcánica pulverizada), fue utilizada para unir grandes bloques de sillaría. A menudo, la piedra fue solo un revestimiento mientras que la parte interna del muro se rellenaba con cemento, capas de ladrillo fragmentado, cascajo y argamasa. A medida que se avanza en la técnica y conocimiento de la argamasa, las piedras exteriores se hicieron más delgadas y pequeñas llegando a carecer de toda importancia estructural. Este sistema constructivo se aplicara a la creación de grandes espacios sustentados por arcos y bóvedas de hormigón.

Obviamente, se trataba de un hormigón diferente del que conocemos en la actualidad, pero aun así, las reacciones químicas básicas eran las mismas, y también las materias primas utilizadas entonces eran muy similares. Las características del componente más importante, el cemento, se mejoró mucho allá por el s. XVIII.

Con la caída del imperio romano, el uso del hormigón declina y prácticamente desaparece de la historia hasta 1824, con la invención del Cemento Pórtland en Inglaterra, por Joseph Aspdin.

Cuando en 1824 se desarrolla y patenta un cemento al que se le denomina Pórtland, comienza a extenderse en el mundo el uso de un nuevo material compuesto por una mezcla de gravas, arenas, cemento Pórtland y agua. Por lo tanto, el hormigón puede ser definido como la mezcla de un material aglutinante (normalmente cemento Pórtland Hidráulico), un material de relleno (agregados), agua y eventualmente aditivos, que al endurecerse forma un sólido compacto y después de cierto tiempo es capaz de soportar grandes esfuerzos de compresión y limitados esfuerzos de tensión, según el tipo de elemento en el que se está utilizando.

2.3. Generalidades sobre hormigón

El hormigón se ha convertido actualmente en el material de construcción más ampliamente utilizado en todo el mundo, debido a su extraordinaria versatilidad de formas geométricas que se pueden obtener; sus propiedades físicas y mecánicas como elemento estructural; y su diversificación de variables económicas; razones que lo hacen muy competente frente a construcciones de madera, mampostería y acero.

Este material, se produce a partir de un diseño de mezclas que consiste en la selección de los constituyentes disponibles y su dosificación en cantidades relativas para producir, tan económicamente como sea posible, una masa volumétrica con el grado requerido de manejabilidad, que al endurecer a la velocidad apropiada adquiere las propiedades de resistencia, durabilidad, masa unitaria, estabilidad de volumen y apariencia adecuada.

Según características específicas de los componentes del hormigón o de otros materiales a él incorporados, existen nomenclaturas específicas ²:

- **Hormigón ordinario:** Material que se obtiene al mezclar cemento, agua y áridos minerales de tamaños varios, superiores e inferiores a 5mm.
- **Hormigón en masa:** No contiene en su interior armadura de ninguna clase. Apto para resistir esfuerzos de compresión.
- **Hormigón armado:** hormigón con armadura de acero especial debidamente situada y calculada. Es apto para esfuerzos de compresión y de tracción.
- **Hormigón pretensado:** hormigón con armadura de acero sometida a tracción previamente a la puesta en carga del conjunto.
- **Hormigón mixto:** Es aquel en el que se emplean mezclas de dos o más componentes, y los nombres de estos deberán incluirse en la denominación del hormigón.
- **Hormigón ciclópeo:** Es el que tiene embebidos en su masa grandes mampuestos de dimensión mínima mayor a 30 cm. y de forma tal que el conjunto no pierda la compacidad.

² Hormigones. Ingeniería de la edificación. Según EHE - 08

- **Hormigón aerocluso:** Es el que tiene una cantidad de aire incorporado no mayor del 6% de su volumen, uniformemente distribuido en toda la masa, en forma de burbujas cuyo tamaño está comprendido entre 0,05 y 1mm.
- **Hormigón unimodular:** Es el hormigón con áridos de un solo tamaño.
- **Hormigón ligero:** Compuesto con áridos ligeros.
- **Hormigón pigmentado:** El hormigón coloreado es producido agregando óxidos metálicos (principalmente óxido de hierro). Estos pigmentos se encuentran en forma de polvo, polvillo de granulados finos o líquido.



Figura 2.1 Proporciones de materiales comúnmente usados en la producción de hormigón por volumen

FUENTE: Tecnología de concreto arquitectónico (CAP. PERUANO DEL ACI)

Con el objeto de tener una idea más cercana de los efectos, propiedades y funciones de éstos, dentro de la masa de hormigón, a continuación se definen algunos de los términos de uso común:

Agregado.- El término **agregado grueso**, se refiere a las partículas de agregado mayores a 4.75 mm (malla N°4) y el **agregado fino**, se refiere a partículas menores de 4.75 mm pero mayores de 75µm(malla N°200).

Cemento.- Es un material finamente pulverizado, que no es en sí mismo conglomerante, sino que desarrolla la propiedad conglomerante como resultado de la hidratación (es decir, reacciones químicas entre minerales del cemento y el agua).

Aditivos.- Son materiales diferentes a los agregados, el cemento y el agua, que se agregan a las mezclas de hormigón inmediatamente antes o durante el mezclado, su uso en el hormigón es muy extenso por la diversidad de beneficios que se obtienen con su aplicación.

La modificación de los tiempos de fraguado, la reducción de agua, la inclusión de aire y la agregación de minerales como puzolana, son un ejemplo de los usos más frecuentes de aditivos en el hormigón.

En esta parte de aditivos entra en juego la acción de los colorantes, los cuales podrían ser agregados en polvo o líquido con la finalidad de producir hormigón de colores distintos a los del cemento que se esté utilizando.

Pasta.- La pasta dentro del hormigón se refiere a la mezcla de cemento, agua, aire (naturalmente atrapado o incorporado) y aditivos. Durante el estado fresco del hormigón, la pasta actúa como lubricante de los agregados, dándole fluidez a la mezcla permitiendo los efectos de compactación y colocación de una manera adecuada.

Cuando la mezcla endurece, la pasta de cemento al aglutinarse cierra los espacios que hay entre las partículas y reduce la permeabilidad del hormigón, evitando el desplazamiento de agua en la masa endurecida. La pasta, en unión de los agregados contribuye a la resistencia mecánica a la compresión, lo cual es llamado interface agregado pasta.

2.4. Tipos de hormigón

Debido a los diferentes pesos unitarios que el hormigón pueda tener, se le clasifica en tres grandes categorías:

- El hormigón de peso normal; es el que contiene agregados naturales y agregado de roca triturada, que por lo general su peso oscila entre los 2400 Kg/m³ y es el más utilizado en la industria de la construcción.

- El hormigón Ligero; se utiliza cuando se desea reducir el peso unitario del concreto usando ciertos agregados naturales de densidades ó pesos volumétricos más bajos. Esta definición se le da a un hormigón con peso volumétrico menor a 2000 Kg/m³.
- El hormigón Pesado; es el que sobrepasa los 2600 Kg/m³ y es utilizado en obras donde se requieren propiedades adicionales a las de un hormigón de peso normal, siendo un ejemplo de ello la resistencia al almacenamiento de materiales radiactivos.

La clasificación del hormigón se hace también de acuerdo a las resistencias. Aunque estas deberían ser medidas en pruebas sobre la pasta de cemento puro, no se hace por la dificultad que tiene a ser moldeada dando origen a una gran variación en los resultados. De acuerdo con lo anterior en la mayoría de los países del mundo se mide la resistencia por medio de morteros hechos con materiales específicos y en condiciones muy controladas. Las pruebas de resistencia que existen son: a compresión, tensión y flexión, siendo la primera la más importante, puesto que las restantes tienen un valor muy pequeño relativo al de compresión.³

Desde el punto de vista de la resistencia a la compresión a los 28 días el hormigón se puede clasificar en:

Normal: Aquel cuya resistencia se encuentra entre 140 kg/cm² (2000 psi) y 350 kg/cm² (5000 psi).

Alta resistencia: Aquel cuya resistencia se encuentra entre 350 kg/cm² (5000 psi) y 1000 kg/cm² (14000 psi).

Ultra Alta resistencia: Aquel cuya resistencia es superior a 1000 kg/cm² (14000 psi).

En la actualidad existen muchos tipos de hormigón más que los mencionados anteriormente, los cuales constan de más elementos agregados a la mezcla con el fin de obtener alguna característica especial de ese hormigón.

³ UAJMS, "Manual del laboratorio del hormigón", Editorial "Universitario", Tarija – Bolivia 1991

2.5. Pruebas para el hormigón fresco

El hormigón, como cualquier material hecho de varios componentes, que tienden a formar un solo material homogéneo, debe tener un estricto control de calidad especialmente cuando es utilizado para la construcción de superestructuras, que durante toda su vida útil estarán sometidas a esfuerzos considerables e inesperados donde se debe preservar la seguridad ante un colapso.

El principal control de calidad que se le debe rendir al hormigón está en su fase de frescura, sin dejar la importancia de un buen diseño, correcta elección de los materiales, proceso constructivo y mantenimiento. Este control de calidad del estado fresco, está basado no en más que cumplir con requisitos y normas establecidas para tal estado.

A continuación se presentaran las principales pruebas para el control de calidad del hormigón desarrolladas por la ASTM (American Society for Testing of Materials) de Estados Unidos.

2.5.1. Muestreo

Es de importancia mencionar la obtención de muestras verdaderamente representativas para las pruebas de control. Si el muestreo es representativo, se corre menos riesgo que el resultado de las pruebas pueda ser engañoso.

La especificación ASTM C-172 presenta el procedimiento para un buen muestreo del concreto fresco y su manejo durante la ejecución de las pruebas. Con excepción de la prueba rutinaria de revenimiento y contenido de aire, este método requiere que la muestra sea de por lo menos 20 litros, que se utilice dentro de los 15 minutos a su obtención y que se proteja durante este periodo de la luz directa del sol, del viento, así como otras fuentes de evaporación acelerada.

Las muestras para los ensayos subsiguientes de hormigón fresco pueden ser⁴:

⁴ Norma EN 12350-1 para muestras compuestas y aleatorias.

- Muestras compuestas.- Cantidad de hormigón que proviene de la integración de una cantidad de muestras individuales que se toman en forma uniforme en torno a una mezcladora o masa de hormigón.
- Muestras aleatorias.- Son muestras individuales que se originan en una parte de la mezcladora o de la masa de hormigón y luego se integran totalmente.
- Muestras individuales.- Muestras que se toman en un punto apropiado y luego se integran.

2.5.2. Consistencia.

La prueba de revenimiento, es el método de mayor aceptación que generalmente se utiliza para medir la consistencia del concreto. El equipo de prueba consiste en un cono de revenimiento (un molde de metal de forma cónica de 30 cm de altura con diámetro de 20 cm en la base y de 10 cm en la parte superior) y una barra de acero (de 15.9 mm de diámetro y 61 cm de largo) que tenga una punta de forma semiesférica. Un alto de revenimiento señala a un hormigón húmedo o fluido. Esta prueba debe iniciarse dentro de los 5 minutos después de la obtención de la muestra y deberá completarse en 2.5 minutos, ya que el concreto pierde revenimiento con el tiempo.

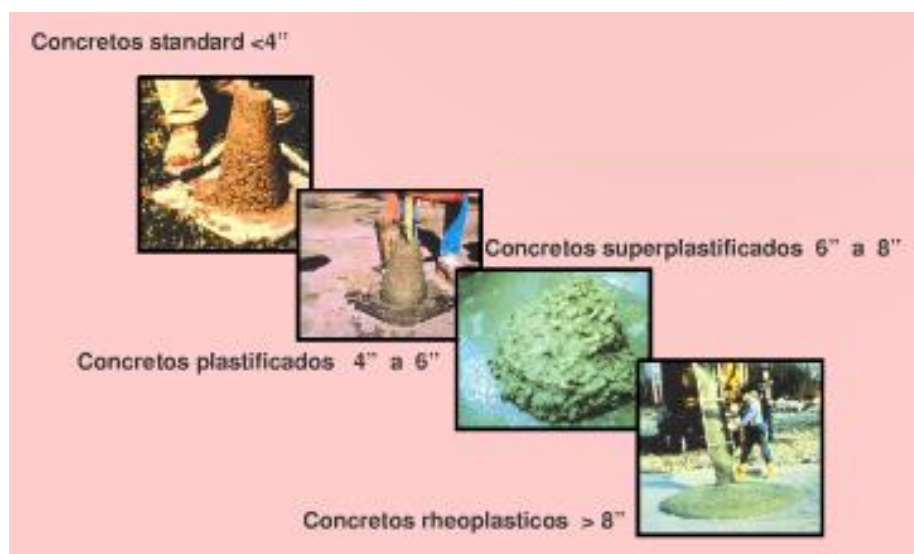


Figura 2.2 Asentamientos para diferentes tipos de hormigón

FUENTE: Tecnología de concreto arquitectónico (CAP. PERUANO DEL ACI)

El hormigón fresco se coloca en un molde hueco con forma de tronco de cono y se compacta. Cuando se eleva el molde, el asentamiento da una medida de la consistencia del hormigón. El asentamiento es la diferencia en mm entre la altura del molde y la altura del hormigón fresco que queda luego de deformarse cuando se retira el molde.

Todo el proceso desde el comienzo del vertido hasta retirar el molde debe llevarse a cabo en 150 segundos. El ensayo sólo es válido si el resultado es un asentamiento residual en el cual el hormigón permanece intacto y simétrico luego de retirar el molde, es decir, el hormigón se mantiene erguido en forma de tronco de cono (o a semejanza del mismo). Si el hormigón colapsa asentamiento se debe obtener otra muestra. Si la muestra colapsa en dos ensayos consecutivos, el hormigón no tiene la plasticidad y la cohesión requeridas para el ensayo de asentamiento.

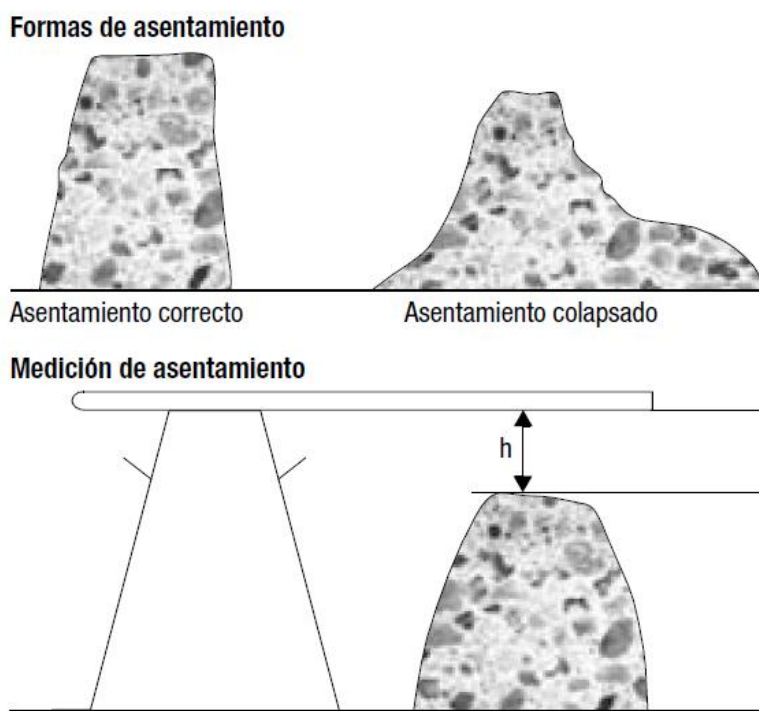


Figura 2.3 Formas y medición del asentamiento

FUENTE: Hormigón fresco. MANUAL DEL HORMIGÓN Sika

Asentamientos Recomendados para Diversos Tipos de Construcción y Sistemas de Colocación y Compactación				
Consistencia	Asentamiento mm.	Ejemplo de Tipo de construcción	Sistema de colocación	Sistema de compactación
Muy seca	0-20	Prefabricados de alta resistencia, revestimiento de pantallas de cimentación	Con vibradores de formaleta; hormigones de proyección neumática (lanzado)	Secciones sujetas a vibración extrema, puede requerirse presión
Seca	20-35	Pavimentos	Pavimentadoras con terminadora vibratoria	Secciones sujetas a vibración intensa
Semi - seca	35-50	Pavimentos, fundaciones en hormigón simple	Colocación con máquinas operadas manualmente	Secciones simplemente reforzadas, con vibración
Media	50-100	Elementos compactados a mano, losas muros, vigas	Colocación manual	Secciones medianamente reforzadas, sin vibración
Húmeda	100-150	Elementos estructurales esbeltos	Bombeo	Secciones bastante reforzadas, sin vibración
Muy húmeda	150 o más	Elementos muy esbeltos, pilotes fundidos "in situ"	Tubo-embudo Tremie	Secciones altamente reforzadas, sin vibración (Normalmente no adecuados para vibrarse)

Tabla 2.1 Asentamientos en el hormigón fresco

FUENTE: Tablas de dosificación ACI-211

2.5.3. Peso Volumétrico y Rendimiento.

Los resultados pueden ser suficientemente exactos para determinar la cantidad de hormigón producida por mezcla. Esta prueba también da cierta indicación del contenido de aire si se conocen los pesos específicos de los ingredientes.

El tamaño del recipiente utilizado para determinar el peso volumétrico y el rendimiento varían según el tamaño del agregado; el recipiente de 14 litros se utiliza normalmente con agregados de hasta 51 mm (2"). Se debe tener cuidado de consolidar correctamente y enraizar la superficie de manera que el recipiente quede adecuadamente lleno.

2.5.4. Tiempo de Fraguado

Las reacciones entre el cemento y el agua son la causa principal del fraguado del hormigón aunque por varias razones, el tiempo de fraguado del hormigón no coincide con el tiempo de fraguado del cemento con el que ha sido elaborado.

Los fenómenos de rigidización, fraguado y endurecimiento son manifestaciones físicas de las reacciones progresivas de hidratación del cemento. Además los tiempos, inicial y final del fraguado del cemento son los puntos definidos arbitrariamente por el método de prueba, que determinan el inicio de la solidificación de la pasta de cemento.

Igualmente, el fraguado del hormigón es definido como el inicio de la solidificación de una mezcla de hormigón fresco. Tanto el tiempo inicial como el final de una mezcla de hormigón, son definidos arbitrariamente por un método de prueba como es el método de resistencia a la penetración ASTM C 403 “Prueba para tiempo de fraguado de concreto mezclado por medio de la resistencia a la penetración”.

Los factores que controlan los tiempos de fraguados son la composición del cemento, la relación agua/cemento, la temperatura y los aditivos. Puesto que los fenómenos de fraguado y endurecimiento en una pasta de cemento hidratada son influidos por el llenado de espacios vacíos con los productos de la hidratación, la relación agua/cemento afectara obviamente los tiempos de fraguado. Por lo tanto, los datos de tiempo de fraguado en una pasta de cemento no coinciden con los tiempos de fraguado del hormigón que contenga el mismo cemento, porque las relaciones agua/cemento en los dos casos son por lo regular diferentes. Generalmente cuanto mayor sea la relación agua/cemento mayor serán los tiempos de fraguados.

2.6. Propiedades del hormigón endurecido

Para la selección de los materiales, la ingeniería toma en cuenta la resistencia de los mismos ante las cargas aplicadas. Dependiendo de cómo el esfuerzo actúa en el hormigón, son distinguidos unos de otros, como por ejemplo tensión, compresión, flexión, cortante y torsión.

Entre las propiedades más importantes de una mezcla de hormigón endurecida están:

- a) Impermeabilidad.
- b) Durabilidad.

- c) Resistencias mecánicas: compresión, tensión, flexión, cortante, fatiga, impacto, abrasión y cavitación.
- d) Cambios volumétricos: contracción, expansión, deformación elástica, deformación plástica.
- e) Resistencia al fuego y a las radiaciones.
- f) Propiedades térmicas, acústicas y eléctricas.

Para el interés de este estudio, se tratara únicamente las propiedades de resistencia y durabilidad del hormigón endurecido:

2.6.1. Resistencia

Una propiedad importante del hormigón endurecido es la resistencia a la compresión. Se determina por el ensayo de compresión en muestras especialmente producidas (cubos o cilindros) o testigos de una estructura.

En los sólidos, existe una relación inversa fundamental entre la porosidad (la parte de huecos presente en el volumen) y la resistencia. Por lo tanto, en materiales de múltiples fases como el hormigón, la porosidad de una estructura puede convertirse en un límite de la resistencia mecánica que se desarrolla inicial y continuamente. El hormigón contiene espacios vacíos de varios tamaños y formas en la matriz, y microgrietas en la zona de transición entre la matriz y los agregados gruesos, por ello los modos de falla bajo esfuerzo son muy complejos y variables.

Bajo tensión uniaxial, se necesita mucho menos esfuerzo para el inicio y desarrollo de las grietas en la matriz. En compresión, el modo de falla es menos frágil porque se necesita energía considerablemente mayor para formar y para expandir las grietas en la matriz.

Los principales factores que influyen en la resistencia a la compresión son el tipo de cemento, la relación agua/cemento y el grado de hidratación que se ve principalmente afectado por el método y tiempo de curado. La resistencia del hormigón resulta asociada por lo tanto a la resistencia del cemento hidratado, la resistencia de los áridos, la adherencia de los dos componentes y el curado. Aunque la respuesta real del hormigón al esfuerzo

aplicado es un resultado de complejas interacciones entre varios factores, para entenderlos, la resistencia a la compresión se analiza separadamente bajo tres categorías: Características y proporciones de los materiales, Condiciones de curado y los parámetros de prueba.

2.6.2. Durabilidad

Mientras que el hormigón correctamente constituido, colocado y curado, ofrece una larga vida de servicio ante la mayoría de los ambientes naturales e industriales, ocurren fallas prematuras en las estructuras del hormigón que representan valiosas lecciones para controlar los factores responsables de la falta de durabilidad.

Según el comité ACI 201, se define la durabilidad del hormigón como la capacidad para resistir a la acción del tiempo, los ataques químicos, la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro; es decir el hormigón durable retendrá su forma original, su calidad y su servicio, cuando se exponga a su medio ambiente.

Las obras de hormigón deben proyectarse no solo para que resistan las acciones mecánicas previstas sin que alcancen su estado límite de agotamiento, sino, también, para que resistan aquellas acciones ambientales de tipo físico o químico que puedan deteriorarlas reduciendo su vida de servicio o exigiendo para su conservación un costo importante de mantenimiento o reparación.

Por ello, la durabilidad es una cualidad que debe tenerse en cuenta durante la realización del proyecto, estudiando la naturaleza e intensidad potencial previsible del medio agresivo y seleccionando las formas estructurales, los materiales, las dosificaciones y los procedimientos de puesta en obra más adecuados en cada caso.

2.7. Diseño de mezclas de hormigón de peso normal según ACI 211

Para poder diseñar mezclas de hormigón de peso normal, en este trabajo se sigue el procedimiento descrito por el reglamento de la American Concrete Institute 211. el cual se detalla a continuación.

Generalidades:

La estimación del peso de la mezcla para hormigón requerido, implica una secuencia de pasos lógicos y directos, que de hecho, ajustan las características de los materiales disponibles a una mezcla adecuada para un trabajo requerido.

El ACI proporciona nueve pasos necesarios para diseñar una mezcla de hormigón y poder al mismo tiempo realizar las pruebas de laboratorio requeridas para verificar las mezclas diseñadas.

El hormigón se diseña, según el peso, en kilogramos por metro cúbico de hormigón fresco. Cada uno de los factores que se ven involucrados en la mezcla tienen relación entre sí, ya que al momento de hacer los ensayos en el laboratorio, existen varios factores que pueden afectar de alguna u otra forma cualquiera de las características esperadas del hormigón; es por eso que cuando se hace un diseño de mezcla para un hormigón con unas características determinadas, no se puede asegurar que ese diseño será el óptimo, y que siempre producirá los mismos resultados en cualquier lugar o situación específica.

Procedimiento:

Primer paso: Elección del revenimiento. Cuando no se especifica el revenimiento, se puede seleccionar un valor apropiado para la obra según la tabla A4.1⁵ del ACI 211.1 que se muestra en los anexos. En dicha tabla se proporcionan un rango de valores sugeridos según sea el uso del hormigón y tipo de obra que se vaya a realizar.

Segundo paso: Elección del tamaño máximo del agregado. Se debe buscar el tamaño máximo de los agregados que pueda ajustarse a las necesidades de la obra, y que no afecte en ningún caso las propiedades buscadas en la estructura. Cuando un agregado de tamaño mayor está bien graduado, se obtiene la ventaja que se generan menos huecos, lo que contribuye a disminuir la cantidad de mortero requerido por volumen unitario de hormigón.

Las restricciones del tamaño máximo del agregado indican que éste en ningún caso debe:

- Ser mayor de 1/5 de la menor dimensión de los lados del encofrado.

⁵ *Tablas de dosificación ACI-211 ANEXO 4*

- Ser mayor de $\frac{1}{3}$ del espesor de la losa.
- Ser mayor de $\frac{3}{4}$ del espacio libre mínimo entre varillas individuales de refuerzo, paquetes de varilla o torones de pretensado.

Se debe tener especial cuidado al momento de la elección del tamaño máximo del agregado, ya que una mala elección puede producir una segregación excesiva en el hormigón ocasionando consecuentemente, una estructura defectuosa.

Tercer paso: Cálculo del agua de mezclado y el contenido de aire. La cantidad de agua por volumen unitario de hormigón que se requiere para producir determinado revenimiento, depende del tamaño máximo, de la forma de la partícula y granulometría de los agregados, la temperatura del hormigón, así como de la cantidad de aire incluido, y el uso de aditivos químicos. No afecta significativamente el contenido del cemento o materiales cementantes dentro de sus niveles normales de empleo (bajo circunstancias favorables el uso de algunos aditivos minerales finamente divididos pueden reducir un poco los requerimientos de agua).

En la Tabla A4.4⁶ del reglamento del ACI 211.1 (ver Anexos) aparecen valores estimados del agua de mezclado que se requiere para hormigones hechos con diversos tamaños máximos de agregado, con y sin aire incluido. Según sea la textura y forma del agregado, los requerimientos de agua de mezclado pueden estar ligeramente por encima o por debajo de los valores tabulados, pero son lo suficientemente aproximados para un primer cálculo. Estas diferencias en el requerimiento de agua no se reflejan necesariamente en la resistencia, ya que pueden estar implicados otros factores de compensación.

Para nuestro caso el hormigón será un hormigón de peso normal, sin aditivos ni aire incluido y sin exposición alguna.

Cuarto paso: selección de la relación agua cemento. La relación agua/cemento requerida se determina no sólo por los requisitos de resistencia, sino también por otros factores como la durabilidad. Debido a que diferentes agregados, cementos y materiales cementantes producen generalmente resistencias diferentes empleando la misma relación agua/cemento, es muy deseable establecer una relación entre la resistencia y la relación agua/cemento para los materiales, que de hecho se van a emplear. En ausencia de estos datos, se pueden tomar

los datos mostrados en la Tabla A4.5⁶ del ACI 211 (que se muestra en los anexos). Estos valores aproximados y relativamente conservadores se usan para hormigones que contengan cemento Pórtland Tipo 1. Con materiales comunes, las relaciones tabuladas de agua/cemento deben producir las resistencias indicadas, con base en pruebas a los 28 días de muestras curadas en condiciones normales de laboratorio. La resistencia promedio seleccionada debe exceder la resistencia especificada con un margen suficiente para mantener dentro de los límites especificados las pruebas con valores bajos. Para condiciones de exposición severas la relación agua/cemento se debe mantener baja, aun cuando los requerimientos de resistencia puedan cumplirse con valores mayores.

Cuando en el hormigón se adiciona puzolanas naturales u otros elementos finamente molidos, se debe considerar una relación agua/cemento más puzolana.

Quinto paso: Cálculo del contenido de cemento. La cantidad de cemento por volumen unitario de concreto se rige por las determinaciones expuestas en el tercero y cuarto paso. El cemento requerido es igual al contenido estimado de agua de mezclado, dividido entre la relación agua cemento ya calculadas anteriormente.

Sexto paso: Estimación del contenido de agregado grueso. Para poder obtener la cantidad de agregado grueso necesaria por volumen unitario de hormigón se debe multiplicar el factor obtenido de la tabla A4.6⁶ del ACI 211.1 por el peso volumétrico seco varillado del agregado, en términos resumidos. Para poder obtener este factor se debe utilizar el tamaño máximo nominal de agregado (ya calculado anteriormente), y el módulo de finura de la arena que será utilizada. El contenido de agregado grueso puede llegar a afectar la trabajabilidad, y aún más si el tipo de hormigón será depositado con bomba. Por eso debe tenerse cuidado con la proporción de agregado grueso escogido.

Séptimo paso: Estimación del contenido de agregado fino. A estas alturas, ya se tiene el peso de todos los componentes del hormigón excepto el agregado fino (arena). El agregado fino puede determinarse por diferencia, y existen dos métodos con los cuales se puede calcular la cantidad de agregado fino necesaria para fabricar un metro cúbico de hormigón con características específicas.

El primer método se basa en el peso del hormigón, y por consiguiente, si se conoce el peso del hormigón y el peso de los demás componentes excepto la arena, por diferencia puede calcularse este peso necesario de agregado fino.

El segundo método es más exacto, ya que se basa en el volumen que todos los materiales ocupan en el volumen unitario de hormigón. Por tanto el proceso consiste en restar al volumen unitario de concreto el volumen ocupado por cada uno de los materiales que ya se tienen (en este caso el cemento, la grava, el agua y el aire), quedando de la diferencia, el volumen de arena necesario.

Octavo paso: ajustes por humedad del agregado. Las cantidades de agregado que realmente se deben pesar para el hormigón deben considerar la humedad del agregado. Los agregados están generalmente húmedos y sus pesos secos se deben incrementar con el porcentaje de agua, tanto absorbida como superficial, que contienen. El agua de mezclado que se añade a la mezcla propuesta se debe reducir en cantidad igual a la humedad libre contribuida por el agregado, es decir, humedad total menos absorción.

Pero también puede darse el caso que utilicen agregados que estén completamente secos al momento de fabricar el hormigón. Si la absorción (normalmente medida después de saturar los agregados con agua un día) es mayor en aproximadamente uno por ciento y la estructura por sí propia de las partículas del agregado es tal que una fracción significativa de la absorción ocurre durante el tiempo anterior al fraguado inicial, puede haber un aumento notable en la velocidad de pérdida de revenimiento, debida a una disminución efectiva del agua de mezclado. También la relación agua/cemento efectiva se puede reducir por el agua absorbida por el agregado antes del fraguado; esto, por supuesto, considerando que las partículas de cemento se introducen dentro de los poros del agregado.

Noveno paso: ajustes en las mezclas de prueba. Las proporciones calculadas de la mezcla se deben verificar mediante mezclas de prueba, preparadas y probadas según la ASTM C – 192. Los ajustes a los que se refiere incluyen el usar solo el agua necesaria para producir el revenimiento deseado, independientemente de la cantidad supuesta al dosificar los componentes de la prueba. Con los ajustes se debe lograr evitar la segregación así como otros desperfectos en las superficies de concreto. Con respecto al ajuste del agua de

mezclado, la cantidad estimada de agua de mezclado para producir el mismo revenimiento que el de la mezcla de prueba, sería igual a la cantidad neta de agua de mezclado empleada, dividida por el rendimiento de la mezcla de prueba en m^3 .

Si el revenimiento de la mezcla de prueba no es el correcto, increméntese o redúzcase nuevamente el contenido estimado de agua en 2 kg por metro cúbico de concreto por cada centímetro de incremento o reducción del revenimiento.

Con respecto al peso unitario del hormigón fresco, si éste es menor al estimado en el diseño, se deben hacer las modificaciones adecuadas en el contenido de aire, ya que cuanto más aire contiene una mezcla, su peso disminuye. Por tanto, habrá que corregir el aire incluido en el hormigón (si este fuera el caso).

Y finalmente, para calcular los nuevos pesos de la mezcla, se iniciara el proceso desde el cuarto paso; si es necesario, se modificará el volumen de agregado grueso de la Tabla A4.6⁶, para obtener una trabajabilidad adecuada.

2.8. Hormigón pigmentado

Las mejoras sobre el hormigón todavía no han acabado y probablemente nunca lo harán. Aunque, hoy en día, estas mejoras no abarcan únicamente las cuestiones técnicas, un aspecto específicamente interesante para el fabricante, sino que la opinión del cliente final es la que está tomando mayor relevancia. Y a este cliente final, no está especialmente preocupado por la utilidad, ciclos de producción, estabilidad en el transporte, ect. Este cliente está interesado en las mejoras estéticas del hormigón. Esto significa, por un lado, un hormigón homogéneo sin defectos (válido para todo tipo de productos de hormigón), y por otro, éste debería integrarse bien en el medio ambiente. La intención del ser humano ha sido, es y siempre será proteger nuestro entorno para que sea un lugar bello y agradable donde vivir. El hormigón gris que conocemos, a pesar de ser funcional y cumpla con los requerimiento técnicos, ciertamente no contribuye demasiado a la belleza del entorno.

Una de las formas de hacer la vida más bella es utilizando el color, actividad a la que se ha dedicado el hombre desde el comienzo de su existencia, como se demuestra en las pinturas

rupestres de las cuevas de Lascaux, las pinturas aborígenes de Australia y África, y los frescos de gran precisión y detalle propios de las pirámides de Egipto, por nombrar algunas.

La técnica de colorear hormigones se desarrolló después de la Segunda Guerra Mundial. Inicialmente, se aplicó en prefabricados y hacia los años 80, comenzó a usarse directamente en obra.

Afortunadamente, los tonos en el hormigón coloreado pueden ser tan durables como los que se encuentran en la naturaleza. Los pigmentos usados son los mismos responsables de la paleta de colores de la naturaleza. Disponibles en un amplio espectro de tonos, los óxidos minerales y otros pigmentos reconocidos usados en los aditivos del hormigón coloreado son económicos, resistentes al clima y de un color durable. Integralmente mezclados en el hormigón, los pigmentos se adhieren al cemento portland para llegar a formar parte permanente de la mezcla de hormigón. Combinado con la durabilidad intrínseca del hormigón, el color integral proporciona una belleza durable para complementar cualquier diseño.

El uso del color se está incrementando en casi todos los tipos de hormigón, desde el colado en obra y pasando por el premol-deado, hasta los productos manufacturados de hormigón tales como bloques para mampostería, muros de retención segmentados y adoquines entrelazados. No es sorprendente ver cuánta belleza y valor agrega el color al hormigón. En muchos proyectos arquitectónicos, el hormigón coloreado es una alternativa económica a los materiales costosos de construcción, tales como la piedra o el azulejo.

Aunque debe tomarse en cuenta el costo extra de los aditivos de color, pueden aplicarse colores integrales y darles acabado en la mayoría de los diferentes tipos de obras de hormigón, usando técnicas similares a las requeridas para el hormigón simple, de modo que los costos de aplicación adicionales sean razonables. Además, la permanencia del coloreado integral del hormigón significa un ahorro significativo en los costos de ciclo de vida, en comparación con los gastos que implica aplicar y mantener capas de desgaste, recubrimientos, manchas o acabados pintados.

Coloreando el concreto

El hormigón se produce a partir del cemento portland, arena, roca triturada o agregados y agua. Los aditivos pigmentados de color se agregan a esta receta básica para crear el hormigón coloreado. Debido a que los aditivos de color se mezclan en el hormigón, el color va en todas las fases a través de cada colocación o cada producto de hormigón. Esto significa que, a diferencia de los tratamientos aplicados a la superficie, el color permanecerá visible aun en las esquinas martelinadas, en las superficies fracturadas expuestas o rugosas y en los cortes con sierra o cuando se sopletea con arena.

Los aditivos de color más populares están hechos con pigmentos de óxido de hierro –el mismo compuesto que se encuentra en la herrumbre común–. Mientras que el color de la herrumbre común es generalmente un naranja rojizo, el óxido de hierro también se presenta en tonos de amarillo, café y negro. Al mezclar estos cuatro tonos primarios, se puede producir una amplia paleta de hormigón coloreado. El óxido de hierro puede ser refinado de las menas que se producen naturalmente y de minerales tales como el ocre.

Sin embargo, se dispone de colores más intensos a partir de óxidos de hierro sintéticos que se reciclan del hierro. Estos pigmentos son químicamente inertes, resistentes a la decoloración y ambientalmente seguros. Como lo sabe todo aquel que en alguna circunstancia haya tenido que tomar agua de un tubo oxidado, el óxido de hierro no es tóxico. Y si usted ha tratado alguna vez de remover la oxidación de un fregadero de cocina, sabrá que es un agente colorante muy resistente

Las ventajas del uso del hormigón coloreado son innumerables. Dentro de las más importantes destaca la durabilidad de los colores, ya que los pigmentos son químicamente estables y no cambian significativamente su tono bajo exposiciones ambientales normales según estudios internacionales y además ofrece un ahorro en costos por metro cuadrado ya que no requiere del proceso de pintura, ni de terminaciones, no requiere más mantención que lavar el recubrimiento; y estéticamente tienen un valor agregado.

El color tiene una influencia positiva sobre el estado de ánimo, y ha sido objeto de múltiples experimentos y estudios. Cualquiera puede notar estos efectos: ¿No es cierto que nos sentimos mucho mejor cuando vamos de compras por el centro de una ciudad con

bonitas fachadas de colores y aceras coloreadas, en lugar de simple asfalto o paredes grises y apagadas? Ya que encontramos hormigón por todas partes en nuestro día a día, deberíamos estar impacientes por utilizar un hormigón que nos haga sentir mejor.

El hormigón coloreado se puede conseguir de dos maneras: pintándolo o bien utilizando hormigón que ya tenga color. La forma de conseguir éste último es añadiendo el color directamente en la mezcla del hormigón. Mientras la pintura se puede desaparecer con el paso del tiempo debido a la exposición a las inclemencias climatológicas o el simple uso diario, el hormigón fabricado añadiendo pigmentos en la mezcla, en cambio, no se estropea. Incluso, si la superficie se daña por agentes físicos y/químicos, creará éste una nueva superficie que mostrará exactamente el espectro del color original. Ya no veremos más manchas grises sobre superficies pintadas debido a desprendimientos de la pintura, ni colores degradados debido a la baja estabilidad de los rayos UV.

Mientras los otros materiales para la edificación no estructural, como adoquines o tejas muy a menudo se colorean, los elementos de prefabricado estructurales continúan dejándose grises en la mayoría de los casos. Esto se debe a que las estructuras de prefabricado se acostumbran recubrir con ladrillos o tejas. Pero en general, la mayoría de materiales de hormigón siguen siendo de color gris.

Hoy en día, el aspecto estético del hormigón se puede mejorar utilizando hormigón coloreado durante el proceso de producción. Por su parte, los fabricantes de prefabricado de hormigón ya han realizado una gran labor para mejorar el aspecto gris del hormigón creando formas geométricas y diseños diferentes sobre las superficies de las estructuras.

Además ahora, estos efectos conseguidos gracias a la modificación de las superficies todavía puede mejorarse más utilizando diferentes tonalidades de colores.

El hormigón de color presenta varios beneficios como ser:

Ahorro económico: Permite crear edificios y estructuras con color permanente, sin necesidad de mantenimiento de pintado.

Perfectos acabados: Coloración en masa uniforme gracias al uso de pigmentos que se dispersan fácilmente.

Sostenibilidad: Su uso como material único permite evitar recubrimientos, pinturas y trabajos posteriores de mantenimiento.

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

- **BS 1014** (1975) "Specification for pigments for Portland cement and Portland cement products", de Inglaterra, que establece los requisitos básicos que deben cumplir los pigmentos utilizados para la coloración del cemento Portland y para los productos del cemento Portland.
- **ASTM C-979²** "Standard Specification for Pigments for integrally colored concrete", de Estados Unidos, que cubre los requisitos básicos de los pigmentos en polvo, para ser usados en mezclas de concreto íntegramente coloreados.
- **DIN 53 237** "Testing Of pigments; pigments for coloration of building materials based on cement or lime", de Alemania, que hace referencia a las condiciones que actualmente se imponen a los pigmentos empleados en la coloración de materiales de construcción aglomerados con cemento y cal.
- **GUÍA ACI 212.** Destinada al empleo de aditivos en el concreto, insta a la realización de ensayos de laboratorio sobre las propiedades del concreto aditivado. Advierte acerca de la posibilidad de modificación de propiedades con el empleo de aditivos minerales finamente divididos. Dedicar un pequeño apartado, el 7.5, a los aditivos colorantes, indicando los adecuados según el color deseado y señalando los requisitos exigibles a éstos. Las dosificaciones menores a 6% de peso en cemento no alteran las propiedades del concreto. Hace notar, por último, las diferentes intensidades del color según la procedencia del pigmento, la dificultad de obtención de colores azules intensos y verdes y el cuidado a tener con las eflorescencias.

Es importante destacar que estas normativas son aplicables a hormigones fabricados con cementos Portland y para los productos de cemento Portland, sin embargo no se podría

deducir de esto que los pigmentos especificados en dichas normativas no podrían ser utilizados satisfactoriamente con cementos que no sean Portland.

2.8.1. Pigmentos, Colorantes Y Nociones Del Color

Generalmente se suele utilizar la denominación de “colorante” para referirse al producto que colorea el mortero, sin embargo, su descripción correcta es la de pigmento.

Un colorante es aquella sustancia soluble en un medio o vehículo (normalmente acuoso) que por sus propiedades ópticas colorea dicho medio a menudo reaccionando con él. Por ser solubles, limita su aplicación a productos alimenticios principalmente. Su naturaleza es casi siempre orgánica, y puede ser de origen natural o sintético.

Un pigmento sin embargo, es una sustancia **insoluble**. La forma y tamaño de su partícula le confieren unas propiedades ópticas tales que la luz que reflejan es muy intensa. Por supuesto, si cambiamos el iluminante, es decir la longitud de onda de la luz, las propiedades ópticas se modificarán.

Elegir el pigmento es muy importante para la calidad del producto final. Años de investigación de los productos de hormigón coloreado expuestos a diferentes condiciones climáticas en todo el mundo han mostrado que los pigmentos inorgánicos de óxidos tienen buenas propiedades de fijación.

Por tanto, las sustancias que añadimos a un producto cementoso confiriéndole a este color, son necesariamente pigmentos.

El color que percibimos de los objetos es fruto de una interpretación de nuestro cerebro a un estímulo del ojo al recibir la luz reflejada por un objeto que está siendo iluminado.

La luz solar blanca como sabemos se compone de varias longitudes de onda que constituyen el **espectro visible**. Cada franja de longitudes de onda determina un color. Podemos conseguir descomponer la luz blanca en una serie de colores al hacerla pasar por un prisma. El arco iris surge por la descomposición que experimenta la luz blanca al atravesar la gota de agua, que actúa como un prisma. Nuestro ojo es sensible solo a los colores cuya longitud de onda esta aproximadamente entre 400 y 700 nm (espectro visible),

los ultravioletas (por debajo de 400) y los infrarrojos (por encima de 700) no podemos verlos.

Un objeto negro es el que no refleja ningún color, es decir, absorbe todas las longitudes de onda de la luz blanca. Asimismo, un objeto verde, absorberá todos los colores de la luz blanca excepto el verde.

Para colorear los productos a base de cemento tenemos las limitaciones que nos marcarán las tonalidades de los pigmentos que podamos emplear. Como los óxidos de hierro (amarillos, rojos y negros) ocupan un lugar hegemónico en este caso y las opciones de azul son prohibitivas, normalmente encontraremos en el hormigón los tonos puros del óxido de hierro o sus combinaciones. También en menor medida los verdes de óxido de cromo.

2.8.1.1. Origen De Los Pigmentos

Los pigmentos son finas partículas de polvo, químicamente inertes, insolubles en agua y que dotan de color al material al cual se añaden. Los usados para colorear el hormigón, como ya se mencionó deben ser insolubles, tanto en el agua como en los agregados, ser inertes químicamente con respecto al cemento, a los agregados y a los aditivos; resistentes a la intemperie, estables a la luz y a temperaturas extremas y deben quedar firmemente embebidos, con los finos del cemento cuando endurezca.

Los pigmentos pueden ser **naturales** o **sintéticos**.

Los naturales son productos de cantera o mina. Se tratan para eliminar parte de las impurezas y se muelen finamente, o simplemente se muelen sin tratamiento previo. Son conocidos como óxidos naturales, tierras colorantes o simplemente ocre. Hasta muy avanzado el siglo XIX eran los únicos disponibles.

Hoy en día su uso ha quedado muy restringido debido a que el precio se va aproximando al de los sintéticos, su fuerza colorante es baja, los tonos son sucios amarronados en comparación con los sintéticos y la riqueza y tonos están sometidos a fluctuaciones.

Los pigmentos sintéticos son aquellos que se obtienen después de determinadas reacciones químicas partiendo de unas materias primas iniciales. Su desarrollo parte de finales del

siglo XIX y principio del XX primeramente con más protagonismo en Inglaterra y después en Alemania.

Si bien estos pigmentos tienen el mismo origen mineralógico que los naturales, al ser obtenidos por procesos controlados y estandarizados, tienen la ventaja de otorgar alta pureza, elevado brillo y gran poder de coloración. Estos pigmentos son estables a la intemperie, es decir a la luz UV, al ácido carbónico, a cambios fuertes en la humedad y la temperatura, a los ácidos, a los álcalis y a los componentes del cemento.

2.8.1.2. Naturaleza de los pigmentos

Los pigmentos podrán ser de naturaleza **orgánica**, moléculas que contienen carbono formando enlaces covalentes carbono-carbono o carbono-hidrógeno, y de naturaleza **inorgánica**, los que no poseen dicha composición.

Los orgánicos se suelen caracterizar por:

- Peor solidez a la luz, ácidos y álcalis.
- Elevada fuerza colorante.
- Tonos limpios.
- Dispersión más complicada que en los inorgánicos.
- Pocos mantienen su estabilidad por encima de los 200 °C.
- Tamaños de partícula muy pequeños en comparación con los inorgánicos.

Los inorgánicos suelen tener como características generales las siguientes, si bien hay excepciones:

- Buena solidez o resistencia a la descomposición por la radiación ultravioleta.
- Buena resistencia a los ácidos y álcalis.
- Modesta fuerza colorante.

- Buen poder cubriente. También se dice buena opacidad.
- Tonos poco limpios en comparación con los pigmentos orgánicos.
- Facilidad de dispersión.
- Suelen tener más resistencia a la temperatura que los orgánicos.

2.8.1.3. El poder de teñidura de los pigmentos

El poder de teñidura de los pigmentos es una característica de calidad importante que es esencial en la evaluación de su relación entre su coste y sus beneficios. El poder de teñidura es definido como la capacidad de un pigmento de pasar su color natural para un medio que está siendo coloreado.

Elegir el pigmento es muy importante para la calidad del producto final. Años de investigación de los productos de hormigón coloreado expuestos a diferentes condiciones climáticas en todo el mundo han mostrado que los pigmentos inorgánicos de óxidos tienen buenas propiedades de fijación.

Los pigmentos de óxidos minerales deben cumplir con las exigencias del ASTM C979². Pueden añadirse a la matriz para obtener colores que no se pueden crear a través de la combinación de cementos y agregados. Los que se emplean con mayor frecuencia son los óxidos minerales finamente molidos, ya sean naturales o sintéticos.

La cantidad de pigmentos en la mezcla debe proporcionarse dentro de los márgenes de resistencia y absorción requeridos. El tono del color depende de la cantidad de pigmentos que se emplee. La cantidad de pigmento se expresa como un porcentaje del contenido de cemento por peso. Si dicha cantidad excede el 5% no aumentará la intensidad del color, pero si pasa del 10% puede perjudicar la calidad del hormigón.

2.8.1.4. Composición Química de los Pigmentos

De acuerdo a su composición química, los pigmentos presentan una amplia variedad de colores, los cuales provienen de óxidos de hierro y cromo.

En los pigmentos de óxido de hierro, los más conocidos se encontrarán en diferentes tonos y colores. Así, los óxidos de hierro rojo variarán de tonalidad desde el bermellón hasta el violeta, mientras que los otros óxidos de hierro proporcionan negro o amarillo.

El óxido ferroso color rojo, es el más estable de todos los diferentes grados de oxidación del hierro. Con la excepción de los pigmentos ocre y sienas, todos los pigmentos, óxidos de algún mineral, son, en principio, de composición uniforme.

En la tabla siguiente se presenta el color del pigmento y su composición química.

Color	Fórmula química	Denominación	Nombre común
Rojo	Fe_2O_3	Óxido Ferroso	Hematita
Negro	Fe_3O_4	Óxido Férrico	Magnetita
Amarillo	$\text{Fe}_2\text{O}_3\text{H}_2\text{O}$	-	Linonita
Amarillo	FeOOH	Hidróxido Ferroso	Goetita
Marrón	FeCO_3	-	Siderita
Marrón negro	FeS	-	Pirita
Café	$\text{FeOOH} + \text{Fe}_3\text{O}_4$ y/o Fe_2O_3	-	Lepidocroquita
Verde	Cr_2O_3	Óxido de Cromo	-
Azul	CoAl_2O_4	Aluminato de Cobalto	-
Azul	$\text{Co}(\text{Al}, \text{Cr})_2\text{O}_4$	Aluminato de Cobalto	-
Blanco	TiO_2	Dióxido de Titanio	-

Figura 2.2 Composición química de los pigmentos

FUENTE: Universidad Austral de Chile

En la tabla se aprecia que, a excepción de los colores en cuya composición intervienen el cromo y cobalto, en la composición química de los pigmentos intervienen componentes similares a los presentes en la composición de los cementos. Esto da las primeras directrices en cuanto a que la composición química de los pigmentos no debería afectar las propiedades del hormigón.

2.8.1.5. Características Físicas de los Pigmentos.

Las principales características físicas que se deben controlar en los pigmentos en polvo son las de tamaño y forma de partícula, y absorción de agua.

2.8.1.6. Porcentaje de Pigmento en la mezcla

El pigmento se agrega en un porcentaje del peso seco del cemento. Mientras mayor es la cantidad que se agrega a la mezcla, mayor es la intensidad del color. No todos los pigmentos permiten una coloración igual. Esto se debe a la pureza y calidad del pigmento, que es lo que determina su poder de coloración y rendimiento. En todos los casos va a existir un punto de saturación, que va a variar también según la calidad del pigmento. Este punto se encuentra dentro de un rango de 5 a 8 % en base al peso seco del cemento. Se recomienda una dosificación entre un 2 y 6 %. Diversos estudios han comprobado la influencia negativa que tienen los pigmentos en la resistencia de los hormigones al agregarse en un porcentaje mayor a un 10%.

Saber la concentración óptima de los pigmentos ayuda a economizar porque sabemos que no estamos poniendo más pigmentos que la cantidad absolutamente necesaria. Si se ponen cantidades más y más grandes de pigmentos en la mezcla del hormigón, la intensidad del color crece inicialmente de manera linear con la concentración del pigmento. Sin embargo, cuanto más pigmento se pone se entra en una gama donde la adición de más pigmento no significa tonos más profundos y, por lo tanto, este es un procedimiento poco económico. El establecimiento de una gama de saturación depende, entre otras cosas, de los parámetros del sistema del hormigón, pero en general, las adiciones más grandes que 5% no son necesarias para los pigmentos por su gran poder. La cantidad de pigmentos exigida para producir un determinado tono puede a veces ser tan grande que tal aumento en la cantidad de polvos tiene un efecto negativo en las propiedades técnicas del hormigón.

2.8.1.7. Requerimientos normalizados

La norma sobre pigmentos para la coloración integral del hormigón ASTM-C979², especifica los requerimientos que deben cumplir los pigmentos y los métodos de ensayo correspondientes. También prescribe la incorporación de un máximo del 10% en peso del cemento.

Las condiciones especificadas más importantes son las siguientes:

-Humectabilidad en agua: El pigmento deberá ser humectable en agua.

-Resistencia a los álcalis: El pigmento tratado con hidróxido de sodio no deberá mostrar ningún cambio significativo de color.

-Resistencia a la luz: La porción expuesta a la luz solar de los especímenes no deben mostrar diferencias significativas de color de las porciones no expuestas. Un pigmento que falla este ensayo no debe considerarse resistente a la luz. Sin embargo, un pigmento que cumple esta prueba puede deslucirse cuando sea expuesto a condiciones de intemperismo.

- Efecto sobre la resistencia: El concreto pigmentado, al dosaje máximo prescrito, tendrá una resistencia a la compresión a los 28 días no menor que el 90% y una relación agua/cemento no mayor que 110% de la mezcla de control ensayada.

2.9. Comportamiento del hormigón pigmentado

Los cambios de colores que se manifiestan tanto en el hormigón sin color como en el hormigón coloreado, tienen muchas causas y pueden tener una naturaleza temporal (ej., eflorescencia) o permanente (ej. exposición de la superficie del agregado).

2.9.1. Eflorescencia

La eflorescencia es la maldición de todos los fabricantes de hormigón, especialmente a respecto de los colores y cuando hay muchos requisitos cuanto a la apariencia del hormigón. Es obvio que se notan más los depósitos de cal en el hormigón coloreado que en el hormigón gris natural, o hasta en el hormigón blanco.

La eflorescencia resulta de la cal libre que se disuelve en la agua de la mezcla (eflorescencia primaria) o en la lluvia o neblina (eflorescencia secundaria) que se deposita en la superficie del hormigón, donde reacciona con el dióxido de carbono en el aire y forma el carbonato de calcio insoluble. La porosidad del hormigón tiene un papel importante aquí. Cuanto más compacto es, más baja será la tendencia a la eflorescencia. En una reacción lenta, el carbonato de calcio en la superficie del hormigón podrá reaccionar con el dióxido de carbono disuelto en el agua para formar bicarbonato de calcio que, por su vez, es soluble en agua. De esta manera la eflorescencia es lavada. Componentes ácidos de la atmósfera naturalmente también tienen un efecto de disolución en los depósitos de cal en la superficie del hormigón.

2.9.2. La acción de las intemperies en la pasta del cemento endurecida

Sobre la superficie del hormigón hay una capa de lodo compuesta de los agregados finos y del cemento. Su grosor depende de la formulación, del método de compactación, etc. Esta capa se gasta gradualmente por el tiempo y después de algunos años, las partículas de agregado en la superficie se quedan expuestas y contribuyen más con el color general del sistema.

La fotografía a continuación muestra que los cambios de color en materiales de construcción pigmentados son relativamente pequeños comparados con un espécimen en el fondo, los bloques de hormigón expuestos durante 25 años muestran muy poco cambio excepto una superficie un poco sucia.



Figura 2.4 Acción del intemperismo en especímenes pigmentados

FUENTE: Instituto de investigación del Hormigón (Como colorear hormigón)

2.10. Materia Prima

2.10.1. Cemento

Debido a que el color del cemento varía incluso entre lotes de un mismo fabricante, esa variación afecta también el color del hormigón, por lo que se recomienda usar cemento del mismo fabricante y lote para toda la obra.

Es recomendable la utilización de agregados claros, para evitar la aparición de áreas con sombras o colores diferentes. La arena utilizada afecta el color. Las partículas finas actúan como pigmentos en la pasta de cemento de tal manera que, cuando se quiera una blancura máxima, deberá utilizarse arena blanca o amarilla. En principio, cualquier agua potable es utilizable para el amasado. Sin embargo, su almacenaje y transporte debe realizarse por medios que no contaminen el color del hormigón, esto es, recipientes y conducciones limpias y exentas de óxidos de hierro. El agua deberá estar libre de partículas en suspensión. Al igual que en los hormigones grises, los aditivos más frecuentes son los plastificantes o fluidificantes, y en determinadas circunstancias se utilizan hidrófugos. Aún cuando en principio los aditivos utilizados en hormigones grises son válidos, es esencial realizar ensayos previos a su utilización a escala industrial, para verificar que no alteren el color final requerido u otras características como el aspecto superficial, los tiempos de fraguado, las resistencias mecánicas, etc.

Gris no sólo da la apariencia de suciedad, como retira el brillo de cualquier color sea donde sea. Así, el hormigón manufacturado con el cemento Pórtland normal nunca va a producir colores tan brillantes como las hechas con cemento blanco. Sin embargo, la claridad de los colores obtenidos con el cemento blanco depende de cuáles pigmentos son utilizados. Si el pigmento es negro, no hay casi diferencia entre el hormigón hecho con cemento blanco o con cemento gris. Con marrón oscuro y rojo, la diferencia es pequeña, y con amarillo y azul, la diferencia es muy evidente.

El cemento blanco proporcionará tonos más luminosos que el gris, a la vez que más abanico de tonalidades. Los cementos grises, limitan los colores claros como amarillos y azules principalmente, quedando estos con tonos muy apagados y oscuros. Sin embargo para los tonos oscuros (rojos, negros, marrones) la diferencia entre usar cemento blanco o gris es más reducida a nivel de color.

2.10.2. Agregados

Las gravas, piedra y arena forman la estructura granular cuyos vacíos deberían llenarse con el ligante. La estructura granular constituye aproximadamente el 80% del peso y el 70-75% del volumen de hormigón. El uso óptimo del tamaño y la calidad del árido mejora la

calidad del hormigón. Los áridos pueden ser de origen natural (fluviales o glaciares), o de trituración. En algunos casos es necesario proceder a su lavado, clasificación y mezcla en instalaciones industriales para mejorar su comportamiento como esqueleto granular en el hormigón. Para que un material sea adecuado para ser usado como árido se requiere que no interfiera con el fraguado, tenga una adherencia suficientemente fuerte con la pasta de cemento endurecida y no comprometa la resistencia y durabilidad del hormigón.

Como uno de los elementos del hormigón, los agregados afectan por su color y granulometría. Se deben controlar ambas características de los lotes que se usen en la misma obra.

La forma de la partícula determina cómo se va a agrupar, qué densidad tendrá y cómo se moverá dentro de la mezcla.

Al momento de elegir los agregados, ya sea gravas o arenas, se debe considerar una diversidad de factores como el color, la resistencia, el tamaño, la forma, la gradación, la textura, la durabilidad, el costo y la disponibilidad, para así poder alcanzar resultados favorables.

El agregado también tiene otra repercusión sobre el resultado de la pigmentación, pues el agregado grueso produce en el mezclador un efecto dispersante mucho más intenso sobre el pigmento, que otro grano fino. Las aglomeraciones livianas de pigmento que pueden producirse, por ejemplo, durante el transporte, se destruyen muy fácilmente por el grano grueso del agregado. Si por el contrario sólo hay arena muy fina, no queda más alternativa que intensificar mucho el mezclado.

Al decidir sobre la combinación de los agregados, finos y gruesos, debemos tener presente los requisitos básicos para el hormigón. En el primer caso, la estética, la elección del agregado grueso, y por tanto, su color es de mayor importancia para las superficies abiertas trabajadas.

Existen varios colores de agregados además las gravas naturales ofrecen una gran variedad de tonalidades cálidas, tierra y grises. A menos que el acabado consista en una exposición de los mismos, el color del agregado grueso no es un factor significativo.

Granulometría de áridos o porción total de “finos”. Un preparado muy rico en finos va a necesitar más dosificación de pigmento ya que la superficie específica total es muy superior a la de un preparado de granulometría más gruesa, y por tanto hará falta más cantidad de pigmento para cubrir dicha superficie.

Color de los áridos. Su influencia es menor en el color final, ya que el aporte de superficie específica es bajo en relación a la del cemento. Los áridos son envueltos por lechada de cemento, por lo que su tonalidad tiene un impacto bajo en el color final.

La arena sí es un factor que puede afectar a la coloración del hormigón. Esto se debe, a que la mayor parte de las arenas conservan un alto contenido de residuos y polvo, aún después de su lavado. Estos residuos pueden añadir un color adicional, o aparecer en la superficie del hormigón a medida que esta se expone a la acción de la intemperie.

Es normal utilizar agregados de densidad normal o liviana que se ajustan a las normas ASTM C 33² y ASTM C 330, en acabados de agregado expuesto para obtener como resultado combinaciones ilimitadas de color y textura. Entre los mencionados agregados se incluye la grava natural, la grava triturada y los agregados de piedra triturada de diversos colores.

2.10.3. Agua

El cemento requiere de agua para fraguar y curar. La relación agua/cemento es determinante en la trabajabilidad del hormigón y en la apariencia de la superficie. Esta última puede presentar irregularidades o poros que le dan un color pálido a la superficie cuando hay exceso de agua, lo que disminuye la resistencia del hormigón y aumenta la formación de eflorescencias.

La relación agua/cemento influye en el tono, el brillo y la intensidad de coloración incrementando la luminosidad conforme lo hace la cantidad de agua. Es indudable que, al tratarse de hormigones estructurales en los que la mayor proporción de agua repercute negativamente en la resistencia, el equilibrio entre resistencia y luminosidad en el color debe ser consecuencia de un muy equilibrado valor agua/cemento.

Otro fenómeno directamente ligado con la relación agua/cemento es la retracción hidráulica. El primer cuidado en la dosificación de todo hormigón, en el cual se pretende minimizar la retracción, consiste en utilizar bajas dosis de agua, pues un mayor contenido de ésta en el interior del hormigón se traducirá en un mayor número de fisuras y poros saturados, desde donde se origina finalmente la tensión superficial, responsable directa de la retracción hidráulica. Sin embargo, el principal parámetro que permite establecer la resistencia a la compresión del hormigón es la relación agua/cemento, inversamente proporcional a la resistencia esperada, la cual depende de modo directo de la cantidad de cemento empleado. Si las exigencias de resistencia a la compresión del hormigón son altas se requerirá de una escasa relación agua/cemento, lo que sumado a una dosis baja de agua, generarían un hormigón con muy poca o ninguna trabajabilidad, propiedad muchas veces tan importante como la resistencia, sobre todo en estructuras de hormigón armado, donde se tenga un armado muy cerrado, dificultando la aplicación del hormigón en la obra.

2.10.4. Pigmento

El pigmento se agrega en un porcentaje del peso del seco de cemento. Mientras mayor sea la cantidad de pigmento que se agregue a la mezcla, superior es la intensidad del color del hormigón. Las características de este componente del hormigón se encuentran detalladas el punto 2.8. de este capítulo.

CAPÍTULO III

DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Introducción

El hormigón sólo, como ya es sabido, no presenta ningún otro color diferente del gris o blanco dependiendo con qué tipo de cemento se fabrique (cemento gris o blanco). Pero es de notar que si se desea otro color diferente al normal en el hormigón se deben verificar que las propiedades esenciales del mismo no se vean afectadas en gran medida por el cambio de color, y también depende del destino que vaya a tener dicho hormigón coloreado.

El hormigón que se colorea con algún tipo de pigmento está regido por condiciones estándar que se mencionan en la norma ASTM C – 979 como efectos en el hormigón.

Los colorantes para hormigón de tipo integral, pueden perfectamente usarse en la coloración de morteros, ya sea que se coloren con un fin puramente decorativo o arquitectónico. En un mortero coloreado no se requieren, necesariamente, características de resistencia a la compresión y otras que se piden en el hormigón; más sin embargo, éste mortero debe tener las características adecuadas para resistir los efectos ocasionados por los agentes atmosféricos como la lluvia, el sol, nieve, etc. Ya que si el objetivo de tener un mortero coloreado se enfoca en la tonalidad que éste puede presentar, debe por lo tanto cumplir con esos requerimientos de resistencia a dichos agentes. Antes de comenzar con los ensayos del pigmento en el hormigón, es necesario conocer la variación de los efectos estéticos en el mortero, provocados por la adición de óxido de hierro como pigmento colorante de tipo inorgánico.

Todo pigmento para hormigón, que tenga como fin el ser utilizado integralmente como un componente más de la mezcla ó como un aditivo colorante en polvo, debe ser analizado y aprobado mediante el cumplimiento de algunas de las normas y especificaciones que se mencionaron en el capítulo anterior; sin embargo, la metodología de análisis y por consiguiente la interpretación de los resultados es opción del investigador siempre y cuando tome en cuenta los principales efectos secundarios que puede ocasionar la utilización de dicho producto en diversas dosificaciones; siendo los principales los efectos estéticos y estructurales.

Antes de comenzar en detalle con las pruebas que serán llevadas a cabo, se debe tipificar el tipo de mezcla de hormigón que será fabricada, y cuáles serán sus características de compresión que se requerirán para su diseño. Requiriendo para este fin ensayos de laboratorio aplicados a los áridos (Caracterización de los áridos) y al pigmento a ser utilizado.

El presente capítulo comprende una descripción de la metodología experimental de los ensayos realizados y pruebas aplicadas al hormigón como a sus componentes con el fin de cumplir los objetivos planteados en esta investigación.

Abarca: la investigación de las propiedades físicas y el análisis químico del óxido de hierro a utilizar en esta investigación como un pigmento integral para hormigón según las especificaciones ASTM C-979⁷, la determinación de la densidad, la solubilidad del pigmento en el agua, el análisis de la resistencia del pigmento a los álcalis, etc. Presentando el análisis de los resultados obtenidos, de este como de todos los componentes del hormigón, en el capítulo IV.

En este capítulo se establece también el método que pretende demostrar experimentalmente, la diferencia de tonalidad que se podría presentar en la comparación de dos especímenes de mortero pigmentado con óxido de hierro, de igual fabricación, pero con diferentes estados de curado y de exposición solar. Se detalla todo el procedimiento necesario para realizar la fabricación de dichos especímenes de mortero pigmentados; enunciando primeramente de forma contextual lo establecido en el anexo A1 de la norma ASTM C-979⁷, el cual servirá como guía de procedimiento.

Se enuncia como se llevó a cabo el diseño de la mezcla por medio del ACI 211, y posteriormente se mencionan cuáles serán los ensayos que serán practicados a dicha mezcla.

⁷ Normas y Especificaciones ASTM. ANEXO 1.

3.2. Caracterización de los agregados

Para determinar la caracterización de los agregados (arena y grava), se realizaron los ensayos estándar para agregados en hormigones, basadas en las normas ASTM C 33⁷.

Los ensayos mencionados a continuación fueron ejecutados en el “Laboratorio de suelos y hormigones” de la carrera de ingeniería civil, de la “Universidad Autónoma Juan Misael Saracho (UAJMS)”, siendo estos ensayos los mínimos requeridos por la norma de dosificación ACI – 211.

3.2.1. Análisis granulométrico

La determinación de la distribución granulométrica de los áridos se realizó por medio de un tamizado. La muestra seca se tamizo utilizando los tamices de la serie preferida, tomando como dato la masa retenida en cada uno de ellos. Con esta masa retenida se determinó los porcentajes parciales retenidos y los acumulados que pasan, con los cuales se obtiene el módulo de finura y los tamaños máximos absolutos y nominal de los áridos.

Este procedimiento se detalla a continuación:

Granulometría del agregado fino (Arena) y agregado grueso (gravilla).

Para su realización se recurrió al siguiente material y equipo:

Material:

- Muestra representativa, la cual se obtiene por cuarteo.

Equipo:

- Balanza sensible al 0.1 gr.
- Juego de Tamices
Para agregado fino: (3/8, 4, 8, 16, 30, 50, 100, Tapa y Base).
Para agregado grueso: (2 ½, 2, 1 ½, 1, ¾, ½, 3/8, N° 4, Tapa y Base).
- Horno de temperatura constante (105° C).
- Brocha de limpieza.
- Bandejas de secado y pesado.

La preparación y obtención de la muestra representativa, en primer lugar consiste en obtener una muestra completamente seca, ya que los agregados en su forma natural contienen cierto grado de humedad que perjudicaría el desarrollo del ensayo, por lo cual se dejó la muestra secando en un horno a temperatura constante durante un periodo de 24 Hrs. antes del ensayo granulométrico.

Una vez seca la muestra se procede al cuarteo del agregado, de manera que las partículas sujetas a estudio sean elegidas al azar y estén acomodadas de forma equilibrada entre partículas grandes, medianas y pequeñas.



Figura 3.1 Cuarteo del agregado grueso
FUENTE: Elaboración propia.



Figura 3.2 Cuarteo del agregado fino
FUENTE: Elaboración propia.

Además de preparar la muestra para la granulometría se aprovechó de realizar el ensayo correspondiente al contenido de humedad de la muestra.

Ya obtenida la muestra representativa y cuando ya adquirió una temperatura ambiente, se comienza con el ensayo apartando y pesando la cantidad requerida para hacer la prueba. El peso de la muestra de agregado fino deberá ser de unos 500 gramos, para este ensayo se pesó 1000 gr del material.

El peso de la muestra de agregado grueso necesario para el ensayo deberá estar de acuerdo con el siguiente cuadro:

Tamaño máximo de las partículas (plg)	Peso mínimo de la muestra (gr)
3/8	1000
½	2500
¾	5000
1	10000
1 ½	15000
2	20000
2 ½	25000
3	30000
3 ½	35000

Tabla 3.1 Peso de la muestra de agregado grueso según tamaño máximo nominal

FUENTE: Manual de laboratorio de hormigón

Se continúa introduciendo la muestra al juego de tamices correspondiente para cada uno y ordenándolos de abertura mayor a menor, en el siguiente orden:

Tamices	Abertura (mm)
2 ½	63
2	50.8
1 ½	38.10
1	25.40
¾	19.05
½	12.50
3/8	9.50
N° 4	4.80
BASE	-

Tabla 3.2 Tamices para la granulometría agregado grueso

FUENTE: Elaboración propia.

Tamices	Abertura (mm)
3/8	9.50
Nº4	4.75
Nº8	2.36
Nº16	1.18
Nº30	0.60
Nº50	0.30
Nº100	0.15
BASE	-

Tabla 3.3 Tamices para la granulometría agregado fino
FUENTE: Elaboración propia.

Posteriormente se procedió con el tamizado o agitado de las mallas, horizontalmente con movimientos de rotación y verticalmente con golpes de vez en cuando, El tiempo de agitado fue aproximadamente por 15 minutos, luego de ese lapso se procedió a retirar los tamices de mayor abertura, pesando las partículas retenidas en cada una de las mallas, cuyos datos fueron registrados cuidadosamente.

Para generar la tabla granulométrica⁸ y posteriormente la curva granulométrica, obtener el módulo de finura, el tamaño máximo del agregado como también el contenido de humedad, se aplicó las siguientes fórmulas:

Retenido acumulado arena

$$Ret. acum = \sum \text{Peso Ret} (3/8 + N^{\circ}4 \dots \dots + BASE) \quad (3.1)$$

$$\%Ret = \left(\frac{Ret.acum}{WM} \right) \cdot 100\% \quad (3.2)$$

Donde:

% Ret: Porcentaje de retención

Ret. acum: Retenido acumulado

WM: Peso total de la muestra

Retenido acumulado grava

$$Ret. acum = \sum \text{Peso Ret} (2 1/2, \dots \dots + BASE) \quad (3.3)$$

⁸ Informe de caracterización y dosificación– ANEXO 5

$$\%Ret = \left(\frac{Ret.acum}{WM} \right) \cdot 100\% \quad (3.4)$$

Donde:

% Ret: Porcentaje de retención

Ret. acum: Retenido acumulado

WM: Peso total de la muestra

% que pasa del total

$$\%Pasa = 100\% - \%Ret \quad (3.5)$$

Donde:

% Pasa: Porcentaje que llega a pasar por cada uno de los tamices del total

Módulo de finura de la arena

$$MF = \sum \frac{\%Ret(N^{\circ}4,8,16,30,50,100)}{100} \quad (3.6)$$

Donde:

MF: Módulo de finura

$\sum$ (**%Ret**): Sumatoria de los porcentajes retenidos en las mallas (4,8,16,30,50,100).

Contenido de humedad

$$\%Humedad = \left[\frac{(Wh - Ws)}{Ws} \right] \cdot 100\% \quad (3.7)$$

Donde:

%Humedad: Contenido de agua en porcentaje.

Wh: Peso húmedo de la muestra (humedad de banco)

Ws: Peso seco de la muestra (secado en horno a 105° C)

Tamaño máximo del agregado

El tamaño máximo del agregado es el tamaño mínimo del tamiz por el cual pasa el 100% de la muestra.

3.2.2. Determinación del peso unitario⁹

El proceso para la determinación de la densidad aparente suelta y compactada de los áridos se realizó de acuerdo a lo establecido en la norma boliviana. Esta norma establece los procedimientos para determinar la densidad aparente de los áridos. Además se aplicará al ensayo de los áridos de densidad real entre 2000 y 3000 kg/m³, que se emplean en la elaboración de morteros y hormigones.

Peso unitario del agregado fino (Arena) y agregado grueso (gravilla)

En este ensayo se determinará el peso unitario de los agregados y de mezclas de agregados a temperatura ambiente.

Para su realización se utilizó el siguiente equipo y material:

Material:

- Muestra representativa del agregado obtenida por cuarteo a humedad ambiente:
Grava aproximadamente 25kg.
Arena aproximadamente 5kg.

Equipo:

- Balanza sensible al 0.5% del peso de la muestra.
- Una varilla de 5/8" diámetro y unos 60 cm de largo.
- Cuchara
- Juego de recipientes cilíndricos de volumen:
Grava – 14000 cm³.
Arena – 3000 cm³.

Los moldes de peso unitario en el laboratorio de la universidad ya se encuentran calibrados por lo que no fue necesario llevar a cabo el proceso de calibración.

Las muestras de los agregados se encontraban en un estado demasiado húmedo por lo que se procedió a secarlos hasta que adquirieran una humedad aceptable (0-5%)

⁹ Los resultados del ensayo para determinar el peso unitario de los agregados se encuentran en : *ANEXO 5 - Informe de caracterización y dosificación*

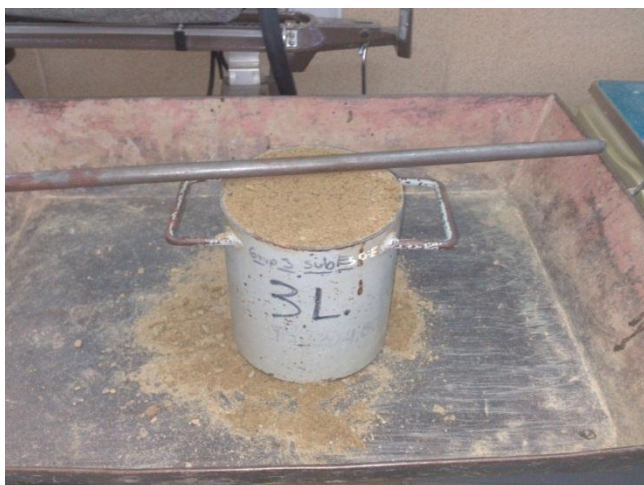


Figura 3.3. Molde y varilla para peso unitario de la arena

FUENTE: Elaboración propia.

Para cada uno de los agregados se realizó el peso unitario suelto, (acomodación natural de sus partículas) y el peso unitario compactado, (acomodación forzada

por apisonamiento uniforme en 3 capas de 25 golpes).

Para la determinación del peso unitario suelto se procedió a llenar los moldes por completo para luego enrazarlos, de manera que la muestra no sobrepase los bordes. Seguidamente se pesaron los moldes llenos del material y registraron los datos, proceso que se repitió tres veces para mayor precisión y exactitud en los resultados.

Para la determinación del peso unitario compactado, se llenó el molde hasta una tercera parte de su capacidad, nivelándose el agregado con las manos. Luego por medio de la varilla se apisono uniformemente esta capa 25 veces. Se repitió el procedimiento anterior dos veces hasta llenar el molde y finalmente se termina enrazando con la varilla teniendo como guía el borde del molde. Se pesa el molde con muestra y se registra el dato.

Para el procesamiento de datos fue necesario aplicar las siguientes formulas:

$$PUS = \frac{Ws}{Vol} \quad (3.8)$$

Donde:

PU_s: Peso unitario suelto.

W_s: Peso de la muestra suelta.

Vol: Volumen del molde.

$$PUC = \frac{Wc}{Vol} \quad (3.9)$$

Donde:

PU_c: Peso unitario compactado.

Wc: Peso de la muestra compactada.

Vol: Volumen del molde.

3.2.3. Determinación del peso específico y absorción de los agregados.¹⁰

Este ensayo tiene por objeto la determinación del peso específico aparente y del peso específico a granel, lo mismo que la cantidad de agua que absorbe el agregado cuando se sumerge en agua por un periodo de 24 horas, expresada como un porcentaje en peso.

Peso específico y absorción del agregado fino – (Arena)

Para su realización se utilizó el siguiente equipo y material:

Material:

- Muestra representativa obtenida por cuarteo de aproximadamente dos kilos, que se coloca dentro de un recipiente lleno de agua y se deja saturando por 24 horas.
- Agua

Equipo:

- Balanza sensible a 0.1gr.
- Matraz de 500 ml.
- Molde cónico y una varilla
- Bandeja de saturación y secado
- Secadora eléctrica



Figura 3.4. Molde y varilla para peso específico de la arena
FUENTE: Elaboración propia.

¹⁰ Los resultados del ensayo para determinar el peso específico de los agregados se encuentran en : *ANEXO 5 - Informe de caracterización y dosificación*

Una vez pasadas las 24 horas de saturación se sacó la muestra del recipiente colocándola en una bandeja para poder secarla uniformemente. Con el fin de inspeccionar que tan seca esta la muestra, se utilizó el molde cónico y su varilla.

De toda la muestra se colocó 500 gr en el matraz y se llenó con agua hasta el tope. Con el fin de eliminar burbujas de aire en el matraz, se rodó el matraz sobre sí mismo. Se registraría el peso total, (matraz + agua + muestra), posteriormente se trasladó dicha muestra en un plato para ser introducida al horno de secado y registrar su peso pasadas las 24Hrs, se repitió el proceso en un total de tres mediciones.

Para el procesamiento de datos fue necesario aplicar las siguientes fórmulas que nos permitieron generar su peso específico a granel, saturado con superficie seca, aparente y el porcentaje de absorción:

$$PEg = \frac{A}{V-W} \quad (3.10)$$

$$PEss = \frac{PMss}{V-W} \quad (3.11)$$

$$PEA = \frac{A}{(V-W)-(500-A)} \quad (3.12)$$

$$\%Ab = \left(\frac{PMss-A}{A} \right) \cdot 100 \quad (3.13)$$

Donde:

PEg: Peso específico a granel.

PEss: Peso específico saturado con superficie seca.

PEA: Peso específico aparente.

%Ab: Porcentaje de absorción

V: Volumen del matraz en ml.

W: peso en gr. o volumen en ml. de agua agregado al matraz.

PMss: Peso de la muestra saturada con superficie seca.

A: Peso en el aire de la muestra secada al horno en gr.

Peso específico y absorción del agregado grueso – (Grava)

Para su realización se utilizó el siguiente equipo y material:

Material:

- Muestra representativa obtenida por cuarteo.
- Agua

Equipo:

- Balanza sensible al 0.1gr.
- Cesto cilíndrico de malla metálica N°4 (h:20; D:20)
- Toalla
- Bandeja de saturación y secado
- Turril para sumergir el cesto

Al igual que el agregado fino, el agregado grueso fue sometido a saturación 24Hrs. antes de ejecutar el ensayo, la cantidad necesaria de dicha muestra representativa fue equivalente a 20.000gr.

Veinticuatro horas más tarde, se procedió al secado de las partículas con la ayuda de una toalla, dejando la superficie de cada una de ellas completamente secas y saturadas interiormente, habiendo registrado el peso de la muestra en esas condiciones, fue introducida al cesto metálico y sumergida al turril, y así de esa forma haber conocido el peso de la muestra saturada dentro del agua; a dicho peso fue descontado el peso del cesto metálico, y se procedió a introducir la muestra al horno en un recipiente, se repitió el proceso para un total de tres mediciones. Para el procesamiento de datos fue necesario aplicar las siguientes fórmulas que nos permitieron generar su peso específico a granel, saturado con superficie seca, aparente y el porcentaje de absorción:

$$PE_g = \frac{A}{B-C} \quad (3.14)$$

$$PE_{SSS} = \frac{B}{B-C} \quad (3.15)$$

$$PE_A = \frac{A}{A-C} \quad (3.16)$$

$$\%Ab = \left(\frac{B-A}{A} \right) \cdot 100 \quad (3.17)$$

Donde:

PEg: Peso específico a granel.

PEss: Peso específico saturado pero con superficie seca.

PEA: Peso específico aparente.

%Ab: Porcentaje de absorción.

A: Peso de la muestra secada en el horno, en gr.

B: Peso de la muestra saturada pero con superficie seca, en gr.

C: Peso de muestra saturada dentro del agua.

3.3. Propiedades físicas y análisis preliminares al pigmento según métodos de prueba de la especificación ASTM C-979¹¹

Se debe mencionar que la determinación de algunas de las propiedades del pigmento se puede volver un tanto compleja por la necesidad de utilizar aparatos y equipo especializado que no están al alcance de esta investigación, además de necesitar lapsos de tiempo justificablemente largos.

Por lo anterior, se realizara todo lo que esté al alcance para la determinación de algunas propiedades del óxido de hierro como pigmento para hormigón, ó que lleguen en un futuro a ser características de interés para otro tipo de investigación o estudio similar.

3.3.1. Determinación de la densidad del pigmento

La densidad del pigmento, fue determinada por un método sencillo y rápido comúnmente utilizado por los químicos industriales, como se menciona en el siguiente procedimiento:

Material y Equipo.:

- Balanza analítica.
- Probeta de 25 ml.

¹¹ Normas y Especificaciones de la ASTM– ANEXO 1

- Óxido de hierro (una sola muestra homogenizada, aprox. 2 grs.)
- Termómetro.

Se comenzó registrando las características de la probeta como ser peso y volumen. Luego se colocó en la probeta el material al cual se le determinara la densidad y posteriormente se volvió a pesar.

Posteriormente se agregó agua en la probeta hasta que se tenga en completo los 25 ml, y se pesó esta sustancia.

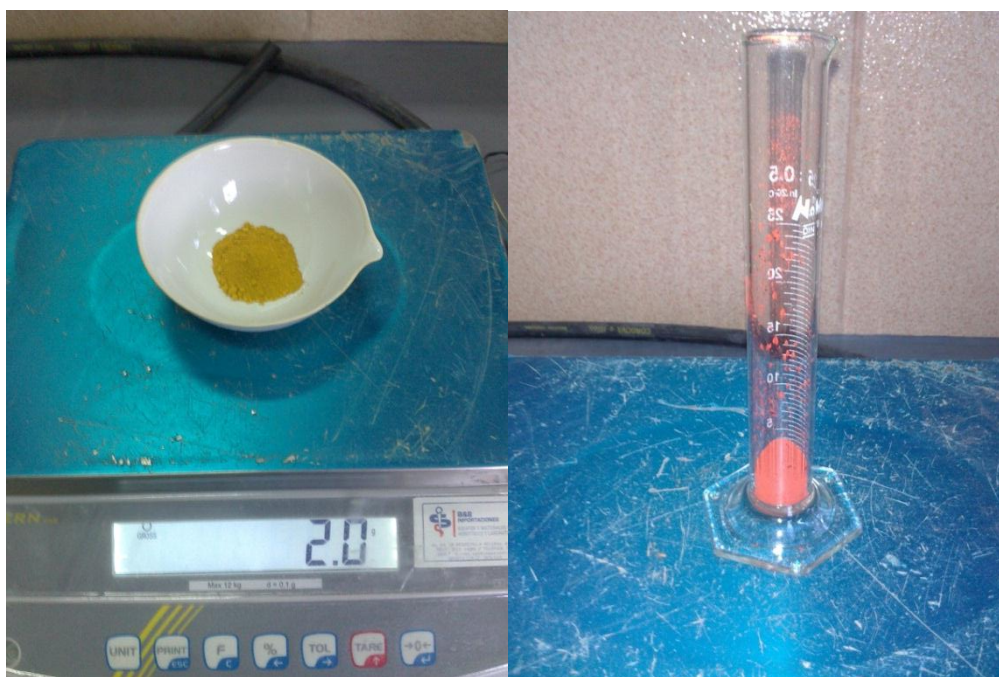


Figura 3.5. Muestra y probeta para ensayo de densidad del pigmento

FUENTE: Elaboración propia.

Finalmente se hicieron los siguientes cálculos:

$$\text{Calcular el peso neto de la sustancia como: } W_{\text{sustancia}} = W_t - W_p \quad (3.18)$$

$$\text{Calcular el peso del óxido de hierro como: } W_o = W_{p+a} - W_p \quad (3.19)$$

$$\text{Calcular el peso del agua como: } W_{\text{agua}} = W_{\text{sustancia}} - W_{\text{óxido}} \quad (3.20)$$

Calcular el volumen de agua en la solución como:

$$V_{\text{agua en solución}} = W_{\text{agua}} * \gamma_{\text{agua}} \quad (3.21)$$

Calcular el volumen del óxido en la solución como: $V_{\text{óxido}} = V_{\text{probeta}} - V_{\text{agua}}$ (3.22)

Calcular la densidad del óxido de hierro en grs/ml con la formula siguiente:

$$\text{Densidad del pigmento} = \frac{W_{\text{pigmento}}}{V_{\text{pigmento}}} \quad (3.23)$$

Desarrollo de la práctica para la determinación de la densidad del óxido de hierro¹²

Peso de la probeta (W_p) = 55,4 grs.

Peso de la probeta + muestra (W_{p+o}) = 57,4 grs.

Para el pigmento rojo:

Peso de la probeta + muestra + agua (hasta los 25 ml.)= (W_t)= 81,6 grs.

$W_{\text{sustancia}} = W_t - W_p = 26,2$ grs.

$W_{\text{óxido}} = W_{p+o} - W_p = 2$ grs.

$W_{\text{agua}} = W_{\text{sustancia}} - W_{\text{óxido}} = 24,2$ grs.

$V_{\text{agua en solución}} = 24,2 \text{ grs.} / (1 \text{ grs/ml}) = 24,2$ ml.

$V_{\text{óxido}} = V_{\text{probeta}} - V_{\text{agua}} = 25,00 - 24,2 = 0,8$ ml.

$$\text{Densidad del pigmento rojo} = \frac{W_{\text{pigmento}}}{V_{\text{pigmento}}} = \frac{2 \text{ grs}}{0,8 \text{ ml}} = 2,5 \frac{\text{grs}}{\text{ml}}$$

Para el pigmento amarillo:

Peso de la probeta + muestra + agua (hasta los 25 ml.)= (W_t)= 81,2 grs.

$W_{\text{sustancia}} = W_t - W_p = 25,8$ grs.

$W_{\text{óxido}} = W_{p+o} - W_p = 2$ grs.

$W_{\text{agua}} = W_{\text{sustancia}} - W_{\text{óxido}} = 23,8$ grs.

$V_{\text{agua en solución}} = 23,8 \text{ grs.} / (1 \text{ grs/ml}) = 23,8$ ml.

¹² Procedimiento gráfico de la obtención de resultados detallado en el ANEXO 2 (A.2.1)

$$V_{\text{oxido}} = V_{\text{probeta}} - V_{\text{agua}} = 25.00 - 23,8 = 1,2 \text{ ml.}$$

$$\text{Densidad del pigmento amarillo} = \frac{W_{\text{pigmento}}}{V_{\text{pigmento}}} = \frac{2 \text{ grs}}{1,2 \text{ ml}} = 0,8 \frac{\text{grs}}{\text{ml}}$$

3.3.2. Análisis de humectabilidad en agua del pigmento

Como parte de los requerimientos generales de la especificación ASTM C-979 también se encuentra el análisis de humectabilidad del pigmento en agua. El proceso de ensaye se describe en el apartado 7.1 de dicha norma y se detalla a continuación:

Humectabilidad del Agua¹³

Agregar 10 gr. de pigmento a 150 ml de agua des-ionizada en un vaso volumétrico de 250 ml. Si el pigmento no se mezcla rápidamente con el agua cuando se revuelve con la espátula, pero si en lugar de eso, una porción substancial de pigmento flota en la superficie del agua, el pigmento es incompatible y no es humectable en agua.¹⁴



Figura 3.6. Análisis de humectabilidad en agua

FUENTE: Elaboración propia.

¹³ Tomado de Annual Book of ASTM Standard 2003, Volume 04.02 "Concrete and Aggregates" Esp. C-979-99

¹⁴ Procedimiento gráfico de la obtención de resultados detallado en el ANEXO 2 (A.2.2)

3.3.3. Análisis de la resistencia del pigmento a los álcalis

Otro aspecto muy importante relativo a la composición química del cemento Pórtland se refiere a los álcalis, óxidos de sodio (Na_2O) y de potasio (K_2O), cuyo contenido suele limitarse para evitar reacciones dañinas del cemento con ciertos agregados en el hormigón.

Esto ha dado motivo para el establecimiento de un requisito químico opcional, aplicable a todos los cementos Pórtland, que consiste en ajustar el contenido de álcalis totales, expresados como Na_2O , a un máximo de 0.60% cuando se requiere emplear el cemento junto con agregados reactivos.

Este ensayo tiene su importancia debido a las posibles diferencias de color y efectos secundarios de reacciones que se pudiesen ocasionar en el hormigón por la presencia masiva de álcalis en el cemento. El procedimiento para realizar este ensayo esta descrito siempre en la especificación ASTM C-979 apartado 7.2 y se menciona a continuación:

Resistencia a los álcalis.

Agregar dos porciones de pigmento de 10 g cada uno por separado en vasos volumétricos de 250 ml, conteniendo cada uno 150 ml de agua des-ionizada y mover hasta mezclarse completamente. Agregar 10 ml al 10 % del peso de la solución, de hidróxido de sodio a un vaso volumétrico y mover completamente una vez más. Dejar la lechada por una hora entonces remover y filtrar en embudos de Buchner separados. Lavar la porción del filtro reemplazando el agua tres veces con agua caliente des-ionizada, secar la porción el papel filtro en un horno a $110 \pm 3^\circ\text{C}$ por 4 ± 0.5 horas. Retirar del horno, enfriar y moler los pigmentos en un polvo fino. Fabricar dos piladas pequeñas adyacentes de pigmento en polvo y presionar contra el piso con una espátula. Comparar el color del control y tratamiento de los pigmentos en polvo.

Desarrollo.¹⁵

Para esta práctica se analizaron dos muestras en total para cada color, la primera con agregado de hidróxido de sodio y la segunda como muestra de control y comparación del color en el pigmento.

¹⁵ Procedimiento gráfico de la obtención de resultados detallado en el ANEXO 2 (A.2.3)

Los pigmentos se mezclaron rigurosamente en cada uno de los vasos volumétricos, presentando burbujas de aire principalmente cerca de las paredes de los recipientes.

Se le agrego la solución de hidróxido de sodio a los dos vasos volumétricos, ocasionando que el olor de la solución se volviera insoportable debido al hidróxido agregado. Luego se mezcló nuevamente la solución en los vasos volumétricos que contenían el pigmento con hidróxido de sodio.



Figura 3.7. Vasos volumétricos con el pigmento con la solución de hidróxido de sodio.

FUENTE: Elaboración propia.

Finalmente se filtraron ambas soluciones en embudos de Buchner, quedando solamente una masa de color en los filtros de los embudos.



Figura 3.8. Filtrado con embudo de Buchner (izquierda) mediante vacío y. Molienda de la muestra después de secada al horno.

FUENTE: Elaboración propia.

Una vez tenidos los sedimentos húmedos dentro del embudo de Buchner, se procedió a colocarlos junto con el papel filtro dentro del horno a 110° C por un periodo de tiempo de 4 horas. Inmediatamente después fueron sustraídas del horno y molidas en un mortero con pistilo de cerámica para posteriormente ser presionadas con una espátula en un vidrio blanco, donde fuera posible la observación e identificación visual de los cambios de color en el pigmento como efecto del hidróxido de sodio más la temperatura.

3.3.4. Determinación del porcentaje de solubilidad del pigmento en agua

Conocer la cantidad de materia del pigmento que se disuelve en agua, es una de las exigencias y recomendaciones de la especificación ASTM C-979. Por lo tanto, como parte de esta investigación se encuentra el determinar el porcentaje de materia soluble en agua, con base en los procedimientos de los métodos de prueba de dicha norma.

Según el apartado 7.4 de los métodos de prueba de la ASTM C-979, el proceso debe hacerse en base a la especificación ASTM D-1208 “Métodos de Prueba Estándar de Propiedades Comunes de Ciertos Pigmentos”, donde los alcances vinculan al apartado 5 “Materia Soluble en Agua” el cual describe el procedimiento siguiente:

Materia Soluble en Agua¹⁶

Procedimiento.

Pesar cerca de 10 gr. de la muestra del pigmento y agregarlos en un vaso volumétrico de 400 ml. Agregar 100ml de agua, hervir por 5 minutos y enfriar luego transferirla a un frasco volumétrico de 250 ml. Posteriormente agregar agua hasta la marca de 250 ml, mezclarlo y dejar precipitar (asentar). Filtrar el líquido flotante a través de un papel seco de filtrado, descartar los primeros 25 ml. Evaporar 100 ml del agua que fue filtrada por sequedad en un plato o preferiblemente en un horno a 105 Y 2 oC. Enfriar y pesar.

Calculo. Calcule el porcentaje de materia soluble en agua “M” como sigue:

$$M = \frac{R_1 * 2,5}{S_2} * 100$$

Donde R1 es el peso del residuo, S2 es el peso del espécimen

¹⁶ Tomado de Annual Book of ASTM Standard 2003, Volume 04.02 “Concrete and Aggregates”

Desarrollo de la práctica.¹⁷

1- Primeramente se pesaron los 10 gr. de pigmento

2- Peso del plato = 72,2 grs (para el pigmento rojo)

Peso del plato = 50,9 grs (para el pigmento amarillo)

3- Después de agregar el pigmento (óxido de hierro) en el beaker de 400 ml; seguidamente se le agregaron 100 ml de agua común (agua potable); una vez tenida la solución pigmento-agua, se procedió a cocer por 5 minutos. Después de esto se filtró la solución en un frasco volumétrico con embudo normal.

4- Seguidamente se procedió agregando agua hasta la marca de 250ml. Se removió enérgicamente y se dejó asentar la solución. Luego se extrajeron 100 ml de la parte superficial de la solución, descartando siempre los primeros 25 ml por el efecto de la espuma y se hizo evaporar esos 100 ml en el plato previamente pesado en el inciso 2. Una vez evaporada toda el agua se vuelve a pesar el plato con los sedimentos que quedaron dispersados en las paredes en forma de manchas únicamente.



Figura 3.9. Cocción de la solución (izquierda) y filtrado de la solución (derecha)

FUENTE: Elaboración propia.

¹⁷ Procedimiento gráfico de la obtención de resultados detallado en el ANEXO 2 (A.2.4)

5- Peso del plato + sedimento = 72,28 grs (para el pigmento rojo)

Peso del plato + sedimento = 50,84 grs (para el pigmento amarillo)

Finalmente se realizó el cálculo para determinar el porcentaje de materia soluble en agua “M” como sigue:

$$M_{\text{pigmento rojo}} = \frac{R_1 * 2,5}{S_2} * 100 = \frac{0,08 * 2,5}{10} * 100 = 2,00\%$$

$$M_{\text{pigmento amarillo}} = \frac{R_1 * 2,5}{S_2} * 100 = \frac{0,06 * 2,5}{10} * 100 = 1,50\%$$

3.3.5. Estabilidad de curado atmosférico y resistencia a la luz del pigmento

El mortero es una mezcla muy utilizada en la actualidad en la mayoría de los proyectos de construcción. Esto se debe a su buen funcionamiento como pegamento para unidades de mampostería y otra gama de aplicaciones en las que se utiliza. Como ya es conocimiento de todo profesional o trabajador en la rama de la construcción, el mortero es una mezcla compuesta por cemento, arena y agua, los cuales son mezclados en cierta cantidad para producir el mortero con las características deseables. Generalmente los morteros son utilizados con una consistencia plástica, trabajable y pastosa, que para obtener estas características se deben tomar en cuenta factores tales como la temperatura del lugar donde se esté fabricando, las condiciones de humedad de la arena y el tipo de cemento que sea usado.

En este apartado se pretende demostrar experimentalmente, la diferencia de tonalidad que se podría presentar en la comparación de dos especímenes de mortero pigmentado con óxido de hierro, de igual fabricación, pero con diferentes estados de curado y de exposición solar. A continuación se detalla todo el procedimiento que fue necesario realizar para la fabricación de dichos especímenes de mortero pigmentados; según lo establecido en el anexo A1¹⁸ de la norma ASTM C-979, el cual servirá como guía de procedimiento.

¹⁸ Normas y Especificaciones ASTM – ANEXO 1

Figura 3.10. Moldes de madera para elaboración de especímenes de mortero con medidas de 9" x3" x2"

FUENTE: Elaboración propia.



Para poder llevar a cabo los ensayos de estabilidad de curado atmosférico y resistencia a la luz del pigmento, se fabricaron veinte especímenes de forma prismática. Los moldes fueron sujetos por medio de tornillos de rosca, para el fácil desmolde de los especímenes.

Los moldes usados para elaborar los especímenes, presentan medidas de 9"x3"x2" (largo ancho y espesor respectivamente) ¹⁹. Las dimensiones normalizadas de los especímenes fueron modificadas debido a que el espesor recomendado de 0.50" es difícil de fabricar.

La especificación sugiere que el espesor sea de 0.50" para que pueda ser colocado en la máquina emisora de luz que se utiliza en el ensayo de resistencia a la luz, en nuestro caso y como se mencionó anteriormente, no se utilizó este equipo. La resistencia a la luz se medirá mediante la exposición directa del espécimen a la luz solar.

Las cantidades de materiales utilizadas para la elaboración del mortero están dadas para producir un mortero 1:3 (cemento: arena).

A continuación se detallan las características físicas de los materiales utilizados en la elaboración de los especímenes de mortero.

¹⁹ La norma ASTM C-979 proporciona medidas de 9"x3"x1/2" para los moldes de madera, pero también afirma que pueden modificarse las dimensiones de los especímenes siempre que no se afecte ninguna de las características de dosificación e igualdad de los materiales con que se fabrican todos los especímenes.

1. Cemento: El cemento a utilizar será un cemento Pórtland Blanco que cumple con los requerimientos establecidos en la norma ASTM C-150. Este material será proporcionado a la mezcla según como establece el anexo A1 de la norma ASTM C-979 y el diseño de la mezcla.
2. Arena: La arena que será utilizada para la elaboración de los especímenes de mortero será la arena proveniente del río Santa Ana la cual tiene la característica de poseer un módulo de finura de 2.61, además presenta un color más claro que la arena de otros lugares como la proveniente de la cantera de San Mateo.
3. Agua: el agua utilizada en la fabricación del mortero, fue el agua que se utiliza en el laboratorio (Agua Potable).
4. Pigmento: el pigmento usado para la coloración del mortero fue el óxido de hierro sintético.

3.1.1.1. Cálculo de cantidades de materiales para especímenes de mortero en laboratorio

Se presenta a continuación como se realizó el cálculo de los materiales utilizados para elaborar los especímenes de mortero, así como su diseño y las variaciones que se tuvieron al momento de su ejecución.

Cantidades necesarias para la elaboración de un espécimen.

Para no afectar la dosificación de la mezcla se modificaran todas las cantidades en un 10% adicional por desperdicio.

Como indica la norma ASTM C-979²⁰ en su anexo 1 la preparación de las mezclas de mortero en los tres niveles de pigmento (basado en el peso del cemento) debe estar de acuerdo con las siguientes formulas:

²⁰ Normas y Especificaciones ASTM – ANEXO 1

	Control ^A
Arena silicea	480.0 g
Cemento blanco	160.0 g
Pigmento	0.0 g
Agua ^B	72 ml

Las cantidades que se muestran están dadas para un molde con dimensiones de 9''x 3''x ½'' (13,5 pulg³), por lo que para adecuarlas a nuestras dimensiones (54 pulg³) basta con una regla de tres simple:

Arena:

$$\frac{480 \text{ gr}}{13,5 \text{ plg}^3} = \frac{x}{54 \text{ plg}^3} \quad \rightarrow \quad x = 1920 \text{ gr}$$

Aumentando 10% por pérdidas: $x = 1920 \text{ gr} \times 1,1$

$$x = 2112 \text{ gr de arena}$$

Cemento:

$$\frac{160 \text{ gr}}{13,5 \text{ plg}^3} = \frac{x}{54 \text{ plg}^3} \quad \rightarrow \quad x = 640 \text{ gr}$$

Aumentando 10% por pérdidas: $x = 640 \text{ gr} \times 1,1$

$$x = 704 \text{ gr de cemento}$$

Agua:

$$\frac{72 \text{ ml}}{13,5 \text{ plg}^3} = \frac{x}{54 \text{ plg}^3} \quad \rightarrow \quad x = 288 \text{ ml}$$

Aumentando 10% por pérdidas: $x = 288 \text{ ml} \times 1,1$

$$x = 316,8 \text{ ml de agua}$$

A continuación se muestran los cuadros con las cantidades necesarias de los materiales, para fabricar cada uno de los especímenes de mortero; tanto para el ensayo de estabilidad de curado atmosférico como para el de resistencia a la luz.

Cantidades necesarias para un espécimen:

Cuadro resumen para especímenes dispuestos para ensayo de estabilidad de curado atmosférico:

10% PERDIDA	Mezcla de Control	4% de pigmento	6% de pigmento	10% de pigmento
Arena	2112 gr	2112 gr	2112 gr	2112 gr
Cemento Blanco	704 gr	675,84 gr	661,76 gr	633,6
Pigmento	---	28,16 gr	42,24 gr	70,4
Agua	316,8 ml	316,8 ml	316,8 ml	316,8 ml

Cuadro resumen de especímenes para ensayo de resistencia a la luz

10% PERDIDA	4% de pigmento	6% de pigmento	10% de pigmento
Arena	2112 gr	2112 gr	2112 gr
Cemento Blanco	675,84 gr	661,76 gr	633,6
Pigmento	28,16 gr	42,24 gr	70,4
Agua	316,8 ml	316,8 ml	316,8 ml

3.1.1.2. Etapa de fabricación, curado y exposición de los especímenes.

A continuación se presentan como se llevó a cabo la secuencia de fabricación de los especímenes para los ensayos de estabilidad de curado atmosférico y resistencia a la luz.

Elaboración de especímenes

Con respecto al agua de mezclado, inicialmente se tenía un valor de 316,8 gr; pero al momento de hacer la mezcla se pudo observar que no era suficiente cantidad de agua para producir una mezcla plástica y trabajable; por lo que se optó por hacer incrementos

periódicos hasta lograr un mortero con una trabajabilidad y plasticidad adecuada. Por tanto el agua total utilizada para la mezcla de mortero fue aproximadamente de 700 ml.²¹

Los componentes fueron mezclados en un balde de tamaño adecuado.

Figura 3.11. Mezcla de mortero para el llenado de los moldes de madera.

FUENTE: Elaboración propia.



Figura 3.12. Compactación de la mezcla de mortero con apisonador de madera de 2'' x 4''

FUENTE: Elaboración propia.

Al mismo tiempo que se estaba fabricando la mezcla, se estaban cubriendo los moldes de madera con un líquido desmoldante de tipo viscoso y transparente, para evitar que se adhiriera el mortero a los mismos²².

²¹ Existen varios factores como la temperatura que hacen variar la cantidad de agua utilizada para hacer una mezcla.

²² El líquido desmoldante utilizado fue vaselina líquida.

Una vez que se tenían cubiertas las superficies internas de los moldes y hecha la mezcla, se procedió a llenar cada molde. A medida que iban llenando los moldes, la mezcla se compactaba en una superficie horizontal por medio de un apisonador de madera de área efectiva de trabajo de 8 pulgadas cuadradas.

Los moldes fueron colocados sobre una superficie horizontal antiadherente y limpia para evitar que se mancharan los especímenes con cualquier otro agente externo.

En la figura siguiente se pueden apreciar los especímenes ya terminados, en el cual se encuentran las muestras pigmentadas y una muestra de control.



Figura 3.13. Especímenes de mortero terminados, en los moldes de madera

FUENTE: Elaboración propia.

Curado y exposición de los especímenes de mortero

Una vez llenados los moldes, se dejaron los especímenes en ambiente fresco por 24 horas, para luego desmoldarlos e introducirlos en un depósito con agua por un periodo de 3 días.

Terminado el proceso de curado, se procedió a colocar cada espécimen en su ambiente respectivo, según sea la prueba a la que fue sometido.



Figura 3.14. Especímenes de mortero en proceso de curado

FUENTE: Elaboración propia.

Estabilidad de curado Atmosférico²³

Los especímenes de estabilidad de curado atmosférico, dispuestos para curado en campo, se colocaron a la intemperie, protegidos de la luz directa del sol mediante papel periódico húmedo, que continuamente se estuvo humedeciendo hasta el momento de su comparación con los especímenes curados en el laboratorio a humedad controlada. Estos especímenes estuvieron expuestos a temperaturas ambientes comprendidas entre 25-35°C, el tiempo de exposición fue compuesto por meses de época de verano y otoño.

En cuanto a los especímenes para estabilidad de curado atmosférico dispuestos para curado bajo condiciones de laboratorio, éstos fueron introducidos en un espacio amplio lleno de agua a temperatura ambiente controlada entre 20 y 23°C, en donde se mantuvieron hasta el momento de comparación con los especímenes curados en campo.

Resistencia a la Luz²³

Referente a los especímenes dispuestos para ensayo de resistencia a la luz, fueron cubiertos en la mitad de cada una de sus caras; de tal forma que una mitad quedara expuesta a los rayos ultravioleta y la otra mitad quedara cubierta de la exposición; estos especímenes permanecieron así por un periodo de 500 horas según como menciona la norma ASTM C-979.

3.2. Metodología del diseño de mezcla²⁴



De acuerdo al ACI 211:

La dosificación de los materiales para el hormigón debe establecerse para lograr:

- Trabajabilidad y consistencia que permita colocar fácilmente el hormigón, sin segregación ni exudación

²³ Procedimiento gráfico de la obtención de resultados detallado en el ANEXO 2 (A.2.5)

²⁴ Las tablas necesarias para el diseño de mezcla se presentan en el ANEXO 4 – Diseño de mezclas.

- Resistencia a exposiciones especiales
- Conformidad con los requisitos del ensayo de resistencia
- Acabado superficial

3.2.1. Dosificación de hormigones H-21 (Metodo ACI -211)



- De los materiales (Agregados: origen, tamaño y color)
- Del elemento a vaciar, tamaño y forma de las estructuras
- Resistencia requerida
- Condiciones ambientales
- Condiciones a la que estará expuesta
- Aspecto agradable → variaciones min. de color y textura



- En relación a su geometría y el refuerzo de las estructuras
- Muchas veces la selección del TM está en función de la disponibilidad del material y por su costo.
- Deberá ser el mayor económicamente disponible y compatible con las dimensiones de la estructura.



- Examinar el tamaño de la sección que se va construir, la cantidad y espaciamiento del acero de refuerzo.
- Considerar las condiciones de colocación.
- Considerar el sistema de compactación.



- Está en función de las condiciones de trabajabilidad
- TMN del agregado grueso
- Ocasionalmente del tipo de cemento



El ACI proporciona el % aprox. de aire total

$$\text{AIRE TOTAL} = \text{A. ATRAPADO} + \text{A. INCORPORADO}$$



La relación a/c es función de la resistencia, durabilidad y requisitos de acabado.

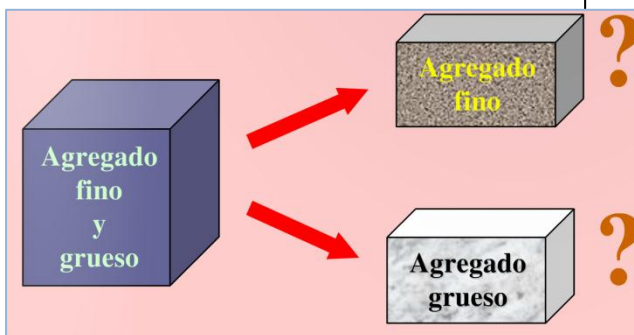


Cemento = agua / (a/c)



Análisis de la capacidad de acomodamiento y compactación de las partículas
↓

Lograr una máxima densidad y por ende una máxima resistencia





Calculo teórico para 1 m³ (volúmenes absolutos)



Prevía corrección por el aporte de humedad de los agregados



3.2.2. Alteración de la dosificación reduciendo la cantidad de cemento

La dosificación obtenida para un hormigón normal será alterada en el momento de la mezcla de los materiales, reduciendo la cantidad de cemento (masa de cemento) y reemplazándolo por el pigmento en polvo de óxido de hierro.

El pigmento se agregó en un porcentaje del peso seco del cemento. Mientras mayor es la cantidad que se agrega a la mezcla, mayor es la intensidad del color.

El peso total del cemento en la dosificación de hormigón normal equivale al 100% de su peso en la mezcla, es por ello que se consideró a este valor como punto de partida para

extraer el cemento y añadir el pigmento, con la finalidad de reponer la porción extraída y mantener constante la cantidad de finos presentes en la mezcla.

Para todos los tipos de pigmentos va a existir un punto de saturación, que va a variar también según la calidad del pigmento. Este punto se encuentra dentro de un rango de 5 a 8 % en base al peso seco del cemento. Se recomienda una dosificación entre un 2 y 6 %. Diversos estudios han comprobado la influencia negativa que tienen los pigmentos en la resistencia de los hormigones al agregarse en un porcentaje mayor a un 10%.

Saber la concentración óptima de los pigmentos ayuda a economizar porque sabemos que no estamos poniendo más pigmentos que la cantidad absolutamente necesaria.

Sin embargo, cuanto más pigmento se pone se entra en una gama donde la adición de más pigmento no significa tonos más profundos y, por lo tanto, este es un procedimiento poco económico. El establecimiento de una gama de saturación depende, entre otras cosas, de los parámetros del sistema del hormigón, pero en general, las adiciones más grandes que 5% no son necesarias para los pigmentos por su grande poder.

Para determinar el porcentaje adecuado de pigmento en la mezcla, que entregue el color deseado pero sin afectar las características estructurales del hormigón, se ensayara muestras con una adición de 4, 6 y 10% de peso de cemento²⁵.

Peso de cemento	Peso del pigmento	Peso en conjunto
(%)	(%)	(%)
100	0	100
90	10	100
94	6	100
96	4	100

Tabla 3.4 Porcentaje de pigmento que reemplaza el cemento

FUENTE: Elaboración propia

Estas diferencias de porcentaje se realizaron a modo de ver si la adición de pigmento, afecta de manera significativa la resistencia a compresión del hormigón, y si es así, saber cuánto es la diferencia entre colores y entre distintos porcentajes.

²⁵ Los valores calculados del peso de pigmento que se usó en la mezcla del hormigón de color, para los distintos porcentajes, se encuentran detallados en el ANEXO 5 –Informe de Caracterización y Dosificación.

3.3. Elaboración de las muestras.

A continuación, se describe el proceso que se siguió, para la elaboración de los diferentes tipos de muestras basados en ensayos de testificación de materiales (ASTM), constando de probetas cilíndricas estándar de 15cm. de diámetro y 30cm de alto.

La norma sugiere elaborar tres especímenes cilíndricos como mínimo, para nuestro caso fueron cuatro los especímenes que se fabricaron con cada mezcla de hormigón para cada periodo de tiempo (14 y 28 días).

La norma hace mención de otros ensayos tales como el de revenimiento, el cual será explicado más adelante.

3.3.1. Hormigón Simple.

En primer lugar se realizó el hormigón que usaremos como patrón, es decir, es un hormigón sin pigmentos, realizado a modo de comparación con los hormigones de colores y así conocer sus respectivas diferencias entre resistencias.

Se inició el vaciado de probetas (patrón) de hormigón simple, pesando los agregados, de acuerdo a las proporciones obtenidas del cálculo de dosificación correspondiente a cada agregado (cemento, arena, grava, agua), en condición de humedad natural.

A continuación se introdujo a la mezcladora el agregado grueso y gran parte del agua,

segundos más tarde, luego de que el agregado grueso se haya saturado, se introdujo el cemento y la arena, seguido del agua restante para fluidificar la mezcla y esta se homogenice en función al diseño de cálculo.



Figura 3.15 Finalización del proceso de mezclado

FUENTE: Elaboración propia.

Luego de transcurridos un par de minutos en la mezcladora, se vació la pasta de hormigón sobre un recipiente, para proceder al vaciado de las probetas y al ensayo de consistencia o desplazamiento de cono.

Los moldes se colocaron en un lugar donde no serán movidos por un periodo de 24 ± 8 horas después que han sido llenados. Los moldes fueron limpiados y cubiertos en su interior con un líquido claro de tipo viscoso (vaselina) para evitar que el hormigón se adhiera a las paredes de los moldes.

Teniendo los moldes y el hormigón listos, se procedió al llenado de los especímenes según la siguiente secuencia. Los cilindros se llenaron en tres capas, dando a cada capa 25 golpes con una varilla de punta redonda de $5/8''$ y alrededor de 15 golpes con un martillo de goma en los 4 puntos cardinales del cilindro. Terminada la última capa, se enrasó la superficie con la misma varilla de compactación para que la superficie quede lo más lisa y uniforme posible. Hay que aclarar que los tres cilindros se fueron llenando al mismo tiempo; esto se hizo para evitar que las mezclas en cada espécimen difirieran un poco unas de las de otras.

Figura 3.16. Vaciado de probetas en moldes cilíndricos

FUENTE: Elaboración propia.



Se dejó fraguar al hormigón por 24Hrs. y se procedió al desmolde para que las piezas de hormigón (probetas cilíndricas), sean sometidas al curado.

3.3.2. Hormigón pigmentado

Las mezclas efectuadas se realizaron de acuerdo a lo recomendado por la norma ASTM y algunos estudios realizados en esta línea, el método más recomendado es el método por vía seca, al que se asocia un mayor aprovechamiento del poder de coloración del pigmento, optimizando costos y logrando un hormigón de color uniforme al romper los aglomerados de pigmento. La mezcla por vía seca consiste en poner en la mezcladora los agregados gruesos secos, adicionar pigmento y mezclar. Así los agregados hacen por medio de molienda, romper los aglomerados de pigmento, logrando que éste se incorpore a la mezcla. Posteriormente se agrega la arena, cemento y finalmente el agua, siguiendo este mismo orden.

Una vez que se adiciona el agua a todos los componentes que están en la mezcladora, se sigue el mismo procedimiento que para el hormigón patrón. Después del enrasado y alisado de las probetas, se espera un tiempo de 24 horas Aprox. para luego desmoldarlas y sumergirlas en agua hasta cumplir las edades requeridas para los ensayos.

3.4. Curado de las muestras

Luego del proceso de fraguado del hormigón, fue necesario mantenerlo tan saturado de agua como sea posible, con el fin de terminar de hidratar las partículas del cemento y conseguir así su máxima eficiencia.

Respecto al curado que tuvieron los especímenes, después que se llenaron los moldes, se los colocó en un ambiente fresco. Los especímenes se mantuvieron así durante un periodo de 24 horas $\pm$ 8 horas hasta su momento de desmolde. Cuando los especímenes fueron desmoldados, se trasladaron hacia el cuarto de curado donde fueron sumergidos en una piscina llena con agua. Una vez depositados los especímenes en el cuarto de curado, se espera que se cumpla el periodo necesario para poder ser ensayados.



Figura 3.17. Curado de las probetas

FUENTE: Elaboración propia.

3.5. Ensayo al hormigón en estado fresco

3.5.1. Ensayo estándar para el revenimiento del hormigón

Este ensayo sirve para verificar la consistencia del hormigón; ya que según sean los resultados obtenidos, se puede clasificar una mezcla de hormigón como muy seca o muy fluida. El revenimiento se mide en unidades de pulgadas.

El ensayo consistió en llenar con hormigón fresco un cono recto metálico truncado (cono de Abrams) cuyas medidas son las siguientes: 12" de altura, 8" de diámetro en su base y 4" de diámetro en su parte superior. El cono debe estar provisto de asas para poder sujetarlo sobre una superficie y evitar que se mueva o se levante mientras se está llenando con el hormigón fresco. Los pies del operador fueron los que sirvieron para sujetar el cono a la base, y así

evitar que se moviera. Además, el cono debe poseer dos sujetadores en la parte superior para poder levantarlo manualmente sin ningún problema.

El cono se llenó en tres capas, siendo la primera capa igual a $1/3$ de la altura del cono, la segunda capa igual a $2/3$ de la altura del cono, y finalizando la última capa con el llenado completo del cono. Cada capa se compactó con 25 golpes por medio de una varilla de $5/8''$ con punta redonda con un diámetro también de $5/8''$.

Una vez que el cono está completamente lleno, se eliminó el exceso de hormigón colocado en la última capa haciendo rodar la misma varilla usada en la compactación, sobre la superficie superior del cono hasta que todo el hormigón quede al mismo nivel del cono.

Teniendo esto, se procedió a levantar el cono verticalmente evitando cualquier tipo de movimiento de tipo lateral o torsional. El cono se levantó en un tiempo aproximado de 5 segundos a una velocidad constante; un vez que el cono fue levantado, lo que ocurrió es que el concreto se asentó o perdió su forma original que tenía dentro del cono. El revenimiento es la distancia vertical, medida en pulgadas, entre la altura original que tenía el cono y el centro de la circunferencia del círculo superior formado en el concreto asentado.



Figura 3.18. Ensayo de Asentamiento con el cono de Abrams

FUENTE: Elaboración propia.

De acuerdo al revenimiento que se obtenga en el ensayo, se pudo clasificar la mezcla como seca, muy seca, fluida o muy fluida. Como la mezcla requerida deberá tener un revenimiento de 4", si el revenimiento obtenido en un ensayo diera menos de 4", entonces puede devolverse a la hormigonera y hacer los ajustes de agua necesarios para poder llevar el hormigón a las 4" deseadas. La norma propone una tolerancia de $\pm 1/2"$, aunque para revenimientos mayores de 4" se puede aumentar este valor hasta $\pm 1"$. Por consiguiente, si en el ensayo de revenimiento realizado se obtenía un valor de revenimiento que caía dentro de la tolerancia permitida, se tomaba como aceptable el revenimiento y se anotaba el revenimiento que se obtenía.

3.6. Ensayo al hormigón en estado endurecido

La resistencia del hormigón es el factor que se emplea frecuentemente para definir su calidad. Se puede medir a compresión, tracción, flexión y tracción indirecta. Aunque por lo general el control del hormigón se realiza por ensayos de rotura a compresión, como en este caso donde todas las probetas se realizaron con ensayo a compresión.

3.6.1. Resistencia a la compresión.

Las pruebas de resistencia a compresión se llevaron a cabo conforme a la norma ASTM C39²⁶, sobre probetas cilíndricas estandarizadas, se utilizó una prensa digital de pruebas a compresión marca CONTROL'S, de procedencia Italiana, (sistema de pistón hidráulico, capacidad máxima de fuerza 2000 KN., velocidad nominal 0.5Mp/s, controlada electrónicamente).

Para las pruebas se utilizaron muestras cilíndricas normalizadas de 15cm. de diámetro y 30cm de alto. Con un total de cincuenta y seis (56) probetas.

Se fabricaron especímenes de hormigón para ser ensayados a los 14 y 28 días de edad.

Los especímenes de hormigón que iban a ser ensayados, se sacaron del cuarto de curado. Se secaron superficialmente y se tomaron sus dimensiones de diámetro y altura, medidas en extremos opuestos del mismo para obtener un promedio.

Se hicieron los ajustes de la máquina de ensayo para poder obtener datos reales y en concordancia con las medidas que presentaron los especímenes a ser ensayados.

²⁶ Normas y especificaciones ASTM – ANEXO 1

Seguidamente se colocó el espécimen a ser ensayado en la máquina de ensayo colocándole dos placas de neopreno en los extremos del cilindro. Las placas colocadas con neopreno sirven para que la carga sea uniforme sobre todo el espécimen y así evitar una falla prematura del espécimen por alguna excentricidad de la carga sobre el espécimen.

Una vez colocado el espécimen en la maquina con las placas en sus extremos se procedió a aplicarle carga hasta llevarlo a la falla. Cuando el espécimen falló se verifico la forma de su fractura, la carga de ruptura y el esfuerzo, siendo proporcionados estos dos por la misma máquina de ensayo.



Figura 3.19. Rotura a compresión

FUENTE: Elaboración propia.

Como se fabricaron cuatro cilindros de cada mezcla de hormigón, al momento que fueron ensayados los cuatro, se toma el valor promedio de ellos.²⁷ Terminado el ensayo se retiraron los pedazos de espécimen ensayados y se procedió a limpiar la máquina de ensayo.

²⁷ Los valores de esfuerzo a la compresión de los cuatro especímenes deben ser cercanos y sus variaciones no deben ser tan grandes

3.7. Resumen de resultados obtenidos

3.7.1. Ensayos aplicados a los pigmentos ²⁸

Ensayo de laboratorio	Proceso seguido	Resultados para el pigmento amarillo	Resultados para el pigmento rojo
Determinación de la densidad	Método volumétrico	D=0,8 gr/ml	D=2,5 gr/ml
Análisis de humectabilidad en agua	Especificación ASTM C-979 ap. 7.1	Humectable en agua	Humectable en agua
Resistencia del pigmento a los álcalis	Especificación ASTM C-979 ap. 7.2	Alta resistencia a los álcalis	Alta resistencia a los álcalis
Determinación del porcentaje de solubilidad del pigmento en agua	Especificación ASTM D-1208 ap. 5	Cantidad soluble en agua = 1,5%	Cantidad soluble en agua = 2%

Tabla 3.5. Tabla resumen de los resultados aplicados al pigmento

FUENTE: Elaboración propia.

3.7.2. Ensayos aplicados a probetas de mortero pigmentado ²⁶

Ensayo de laboratorio	Proceso seguido	Resultados con pigmento amarillo	Resultados con pigmento rojo
Resistencia a la Luz	Especificación ASTM C-979 ap. 7.6	Alta resistencia a la luz	Alta resistencia a la luz
Estabilidad de curado atmosférico	Especificación ASTM C-979 ap. 7.5	No muestran variaciones significativas de color	No muestran variaciones significativas de color

Tabla 3.6. Tabla resumen de los resultados aplicados a las probetas de mortero

FUENTE: Elaboración propia.

²⁸ La determinación de los resultados de los pigmentos como de las probetas de mortero se encuentran detallados en el ANEXO 2

3.7.3. Ensayos aplicados al hormigón²⁹

Probeta N°	Edad (días)	Resistencia (kg/cm2)	Proyección 28 días (kg/cm2)	Resistencia promedio (kg/cm2)	Probeta N°	Edad (días)	Resistencia (kg/cm2)	Proyección 28 días (kg/cm2)	Resistencia promedio (kg/cm2)
HORMIGÓN 4% PIGMENTO AMARILLO Asentamiento=3 1/2"					HORMIGÓN 4% PIGMENTO ROJO Asentamiento =4"				
1	14	141,89	166,93	161,68	1	14	153,73	180,86	181,06
2	14	129,01	151,78		2	14	134,96	158,78	
3	14	138,66	163,13		3	14	155,00	182,35	
4	14	140,16	164,89		4	14	171,92	202,26	
1	28	186,01	186,01	187,69	1	28	190,05	190,05	205,49
2	28	189,88	189,88		2	28	212,63	212,63	
3	28	192,42	192,42		3	28	214,83	214,83	
4	28	182,43	182,43		4	28	204,43	204,43	
HORMIGÓN 6% PIGMENTO AMARILLO Asentamiento =3 1/2"					HORMIGÓN 6% PIGMENTO ROJO Asentamiento =4"				
1	14	124,57	146,55	153,27	1	14	146,91	172,84	176,85
2	14	130,63	153,68		2	14	147,38	173,38	
3	14	134,15	157,83		3	14	151,30	178,00	
4	14	131,78	155,04		4	14	155,69	183,17	
1	28	182,66	182,66	180,01	1	28	199,47	199,47	200,73
2	28	180,99	180,99		2	28	198,60	198,60	
3	28	177,46	177,46		3	28	205,76	205,76	
4	28	178,91	178,91		4	28	199,11	199,11	
HORMIGÓN 10% PIGMENTO AMARILLO Asentamiento =4"					HORMIGÓN 10% PIGMENTO ROJO Asentamiento =4"				
1	14	91,48	107,62	110,91	1	14	140,39	165,16	160,29
2	14	102,74	120,87		2	14	134,79	158,57	
3	14	85,53	100,62		3	14	136,69	160,82	
4	14	97,37	114,55		4	14	133,11	156,60	
1	28	137,04	137,04	146,55	1	28	195,54	195,54	191,37
2	28	149,92	149,92		2	28	192,71	192,71	
3	28	150,09	150,09		3	28	183,12	183,12	
4	28	149,17	149,17		4	28	194,10	194,10	

Tabla 3.7. Tabla resumen de los resultados del ensayo de compresión para probetas hormigón de color

FUENTE: Elaboración propia.

²⁹ La determinación de los resultados del ensayo de compresión se encuentran detallados en el ANEXO 6

Probeta Nº	Edad (días)	Resistencia (kg/cm ²)	Proyección 28 días (kg/cm ²)	Resistencia promedio (kg/cm ²)
HORMIGÓN PATRÓN Asentamiento =3 1/2"				
1	14	169,84	199,81	195,37
2	14	164,24	193,22	
3	14	165,00	194,12	
4	14	165,16	194,31	
1	28	213,85	213,85	213,40
2	28	206,28	206,28	
3	28	223,03	223,03	
4	28	210,44	210,44	

Tabla 3.8. Tabla resumen de los resultados del ensayo de compresión para probetas de hormigón normal

FUENTE: Elaboración propia

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1. Introducción

Debido a la diversidad de ensayos que fueron realizados durante toda la investigación, se realizó de manera inicial un análisis e interpretación de resultados de cada ensayo por separado, detallando cada uno de ellos, y finalmente un análisis global de la investigación.

Los resultados de los ensayos a analizar fueron presentados previamente en el capítulo anterior y su obtención fue detallada en los anexos ya mencionados.

4.2. Análisis del pigmento

4.2.1. Determinación de la densidad del pigmento

En esta investigación la importancia de las propiedades físicas consiste en analizar este material según como es obtenido, es decir en polvo. Para ello la American Society for Testing Materials (A.S.T.M) en la especificación C-979, dan los requerimientos necesarios que deben cumplir los pigmentos para hormigón con color integral, siendo esta la norma a la que se le da mayor énfasis de análisis, práctica y cumplimiento en este trabajo.

El objetivo, es que el polvo de óxido de hierro pase a formar parte de un determinado peso, volumen y mezcla de materiales que interactúan y reaccionan entre sí para conformar una sola masa homogénea, que pasa de un estado plástico, a un estado de endurecimiento total, como lo hace el hormigón.

Las propiedades físicas del óxido de hierro, necesarias para el propósito de este estudio, están principalmente concentradas en: *la Intensidad del color que presente antes y después de mezclarlo con cemento, la solubilidad en agua y la densidad.*

La densidad del pigmento según esta práctica resulta ser de:

$$\text{Densidad del pigmento rojo} = 2,5 \frac{\text{grs}}{\text{ml}}$$

$$\text{Densidad del pigmento amarillo} = 0,8 \frac{\text{grs}}{\text{ml}}$$

Sin corrección por temperatura.

Se hace evidente que la densidad del pigmento de óxido de hierro amarillo es mucho menor a la del óxido de hierro rojo y aún más a la del cemento, lo cual tendrá influencia en la resistencia a compresión final del hormigón.

El pigmento amarillo al ser más liviano, al incorporarse a la mezcla de hormigón según el peso requerido, ocupara un mayor volumen en el total de la mezcla de lo que ocuparía el pigmento rojo o el mismo cemento en un hormigón normal, lo que tendrá una influencia negativa en la resistencia a compresión de las probetas.

Nota: Se analizó solamente una muestra de óxido de hierro de cada color, la cual estaba debidamente homogenizada al igual que todo pigmento a utilizar en esta investigación.

4.2.2. Análisis de humectabilidad en agua del pigmento

Según el ensayo, quedó demostrado que el pigmento *es completamente humectable en agua*. Esto se debe a que cuando se agregó el pigmento al agua destilada no hubo partículas que se mantuvieron en la superficie de la solución; a medida que se removía el fluido, se pudo observar que se producían burbujas de aire en la superficie y que el total del pigmento se disolvía en el líquido, como puede verse en la fotografía.



Figura 4.1. Pigmento completamente humectable en agua

FUENTE: Elaboración propia.

4.2.3. Análisis de la resistencia del pigmento a los álcalis

De las muestras analizadas (M1, M2), la muestra dos no mostro diferencia en color comparada con la muestra uno que era el control o patrón de la práctica, la cual presentaba un ligero y casi inapreciable cambio en su color en comparación con los otros pigmentos tratados con hidróxido de sodio.

Por lo tanto, y según la especificación ASTM C-979, **el pigmento tiene resistencia a los álcalis** que se presenta en el cemento como óxidosde sodio (Na_2O).

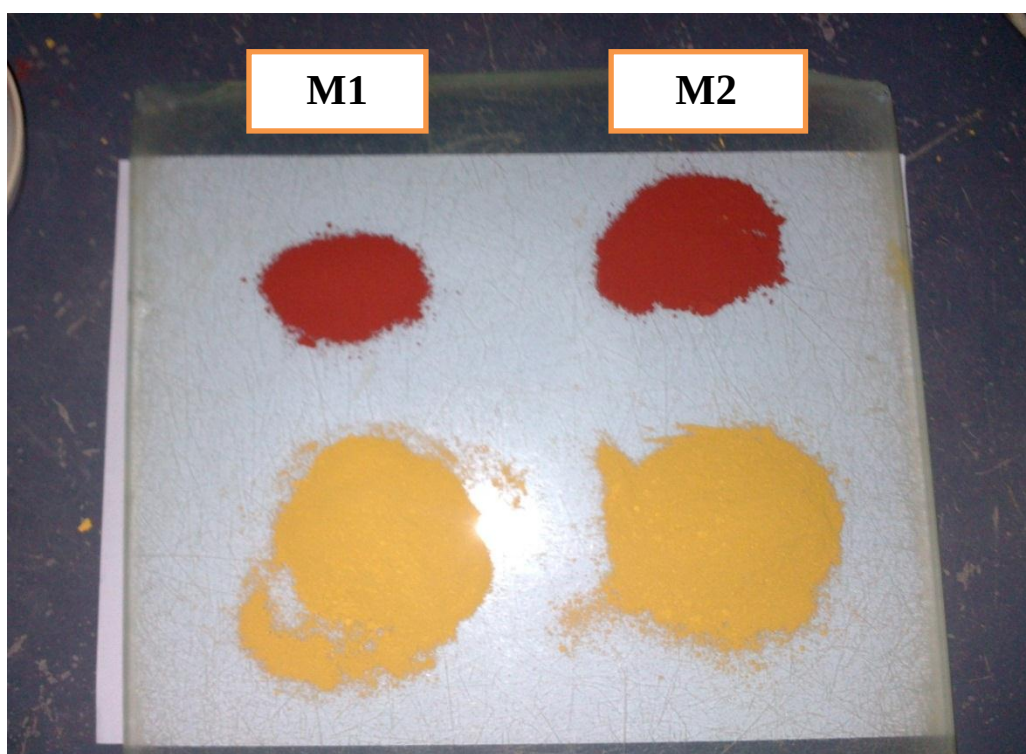


Figura 4.2. Las muestras analizadas según el ensayo de resistencia a los álcalis no presentan diferencia de color alguno. La muestra M2 son restos de pigmentos tratados con Hidróxido de Sodio, la muestra M1 es el pigmento control.

FUENTE: Elaboración propia.

Debido a las propiedades que posee el hidróxido de sodio, el adicionar este compuesto a la solución de óxido de hierro ocasiona un aumento en su olor, puesto que mientras mayor sea la cantidad de hidróxido adicionada, mayor será la intensidad con la que expedirá el olor la mezcla. Así como el hidróxido de sodio aumenta el olor de la solución con pigmento, también según los elementos que forman o que están incluidos en el cemento, los agregados

y el agua de mezclado, así también puede reaccionar el óxido de hierro al ser usado en el hormigón.

Como la diferencia obtenida en el ensayo fue mínima, significa que el óxido de hierro puede mezclarse con cementos de diferentes clases, y que sin importar los elementos, sustancia o sales que estén presentes en un hormigón las variaciones de color por reacciones de álcalis serán mínimas.

4.2.4. Determinación del porcentaje de solubilidad del pigmento en agua

Algunos pigmentos poseen cierto porcentaje de solubilidad en el agua; la solubilidad del pigmento en agua es un índice para poder determinar si el pigmento se disolverá con el agua de mezclado en la fabricación del hormigón, o no se disolverá y pasará a formar parte de los finos.

Para nuestro caso como se obtuvo del ensayo que 2% del óxido de hierro rojo y 1,5% de óxido de hierro amarillo es soluble en agua, puede decirse que una mínima parte del pigmento se disolverá con el agua de mezclado mientras que la mayor parte de éste pasará a formar parte de los finos.



De acuerdo a la norma el total de materia soluble en agua no será superior a 2% en masa de la muestra original del pigmento.

Ambos colores de óxido de hierros cumplen lo establecido por la norma.

Figura 4.3. Soluciones filtradas

FUENTE: Elaboración propia.

4.2.5. Estabilidad de curado atmosférico y resistencia a la luz del pigmento

Al momento que se fabricó el mortero para hacer los especímenes que fueron sometidos a ambos ensayos con el pigmento, se pudo visualizar que el mortero fabricado con cemento blanco presentó una apreciable factibilidad a cambiar su tonalidad o color, ya que, con solo utilizar el porcentaje mínimo de pigmento aplicado, que para nuestro caso fue el 4% del peso del cemento, se puede apreciar un cambio en el color del mortero. Esto se debe a la poca cantidad de hierro presente en el cemento blanco y a los agregados que fueron utilizados, que para nuestro caso fueron la arena proveniente del río Santa Ana.

Los especímenes que fueron pigmentados con el 4% del peso del cemento, cambiaron su tonalidad de blanca a un rojo y amarillo claro, respectivamente para cada pigmento. Y según como se iba aumentando la cantidad de pigmento utilizada, así fue cambiando el color del mortero de claro a más oscuro. Lo anterior puede analizarse como si la intensidad del color del mortero esté completamente ligada a la cantidad de pigmento adicionado a la mezcla, caso que también ocurre con otros colorantes para hormigón tanto en forma de pigmentos colorantes o como líquidos. Se puede decir en este caso que el óxido de hierro si cumple esta característica que es común a la mayoría de los colorantes para hormigón existentes en la actualidad.



Figura 4.4. Especímenes de mortero a diferentes porcentajes de pigmento y de color, y espécimen de control

FUENTE: Elaboración propia.

Estabilidad de curado atmosférico:

Una vez que los especímenes terminaron su proceso de curado bajo condiciones diferentes (condiciones de campo y laboratorio), se procedió a realizar una comparación de tipo visual entre cada uno de los especímenes pigmentados con la misma dosificación.

Del mismo modo se deben comparar los especímenes de control para verificar como afecta el curado en las características de un mortero hecho con cemento blanco.

A continuación se presentan las comparaciones realizadas a cada uno de los morteros pigmentados y de control, así como ciertas observaciones de los mismos.

- **Comparación de especímenes de control.**

Al hacer la comparación visual de color entre los especímenes curados en laboratorio y los curados en campo, fue posible observar que el curado es un factor que afecta aún al mortero sin pigmentar, ya que existe cierta diferencia, aunque sea poca, en la tonalidad de los especímenes que fueron utilizados como muestras de control; a pesar que fueron fabricados solamente con cemento blanco, arena y agua.

Para hacer la comparación visual, se colocaron los especímenes en luz solar para poder apreciar mejor las diferencias de color entre ambos. La imagen siguiente muestra cómo ha cambiado la tonalidad de los especímenes de control, solo viéndose afectados por el tipo de curado que recibieron cada uno.

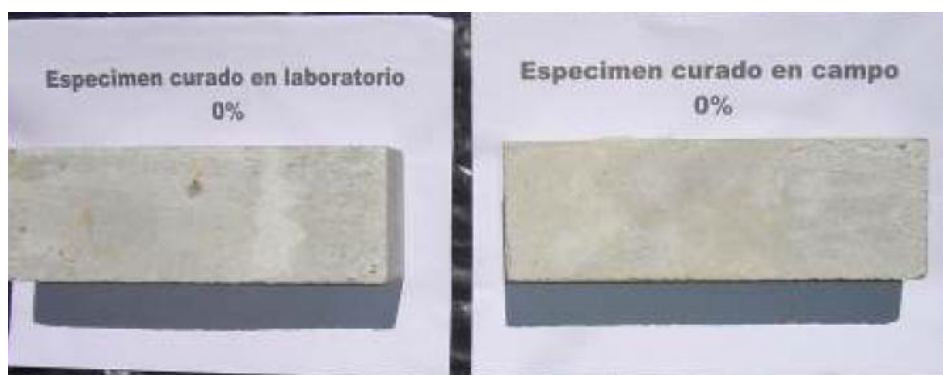


Figura 4.5. Diferencia entre especímenes de mortero al 0% de pigmento (mezcla de control), expuestos a diferentes condiciones de curado

FUENTE: Elaboración propia.

Como puede apreciarse, las tonalidades de los especímenes varían, a pesar de no tener pigmento colorante.

En lo referente al espécimen curado bajo condiciones de laboratorio (a la izquierda en la imagen anterior), no se ve afectado su color respecto al que mostraba en el inicio del proceso de curado; no así el espécimen curado en campo (a la derecha en la imagen) que presenta una leve y casi inapreciable decoloración superficial por la exposición a la luz solar.

▪ **Comparación de especímenes al 4% de pigmento con relación al peso del cemento.**

Al agregar un porcentaje de pigmento a un mortero fabricado con cemento blanco, en una cantidad igual al 4% del peso del cemento; el mortero presenta una variación casi inapreciable a simple vista en el color. Este mortero al 4% de pigmento, fue fabricado bajo las mismas condiciones que el mortero sin pigmento.

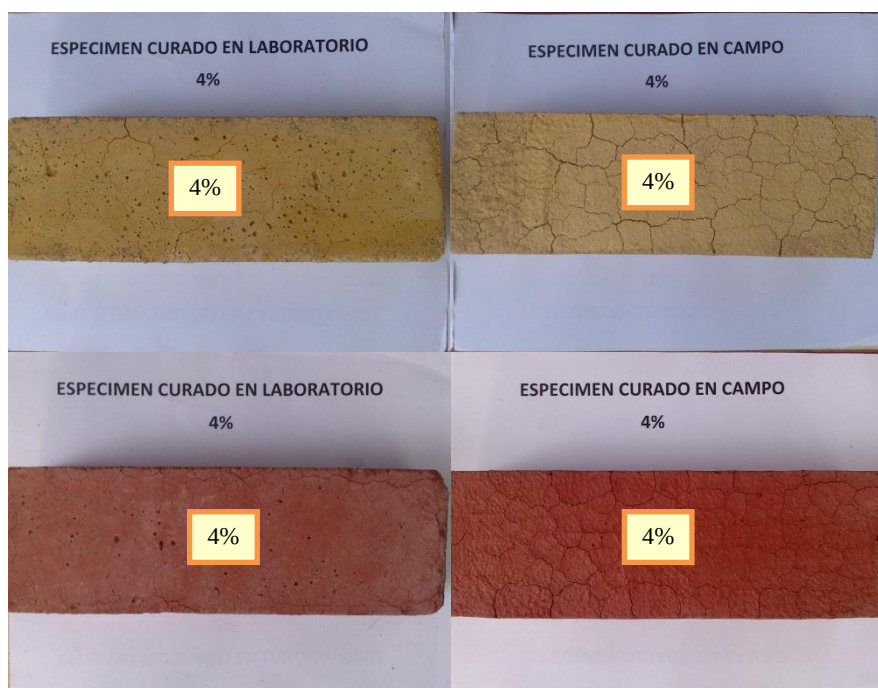


Figura 4.6. Comparación visual del color de especímenes pigmentados con una dosificación del 4% del peso del cemento.

FUENTE: Elaboración propia.

Al igual que los especímenes de control anteriores, se fabricó un espécimen pigmentado al 4% del peso del cemento para ser curado bajo condiciones de laboratorio y otro con la misma dosificación de pigmento para ser curado bajo condiciones de campo. Las variaciones que sufrieron son indistinguibles al ojo humano a simple vista, las diferencias no son tan grandes como para afirmar que el proceso de curado cambio drásticamente el color de los especímenes con respecto al otro. En la anterior imagen se puede apreciar la variación de color que sufrieron los especímenes de mortero al ser curados bajo diferentes condiciones.

- **Comparación de especímenes al 6% y 10% de pigmento con relación al peso del cemento.**

Según la norma ASTM C – 979, el ensayo de estabilidad de curado atmosférico debe incluir también especímenes pigmentados con el 6% del pigmento. Pero para poder hacer un análisis de los efectos del pigmento en una tasa de dosis máxima se fabricó también especímenes de mortero pigmentado con el 10% de pigmento. La mezcla de mortero se fabricó siempre en una bandeja metálica mezclando todos los componentes manualmente.

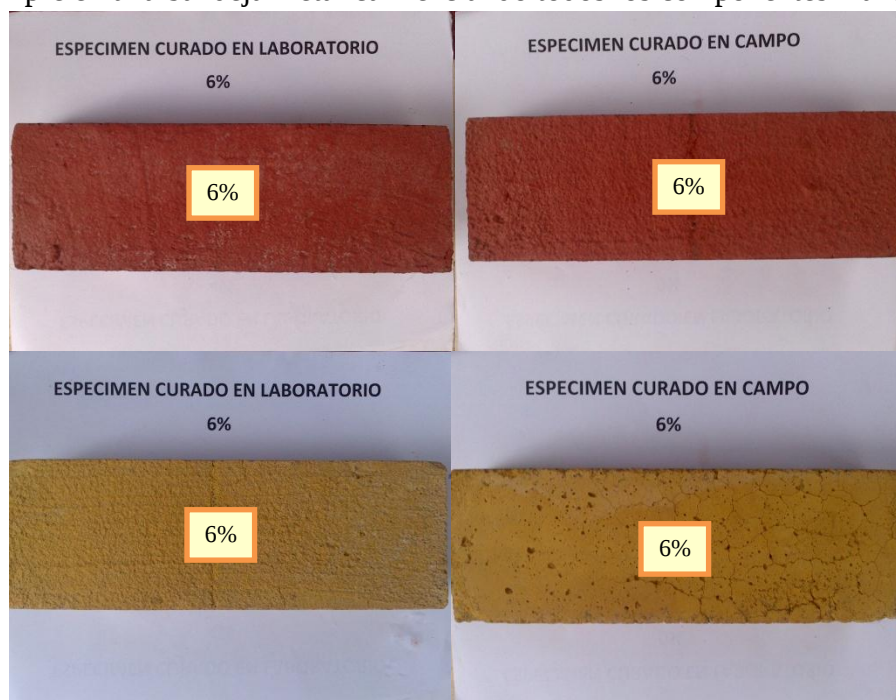


Figura 4.7. Comparación visual del color de especímenes pigmentados con una dosificación del 6% del peso del cemento.

FUENTE: Elaboración propia.

Con este mortero se elaboró un espécimen para estabilidad de curado atmosférico, que será curado bajo condiciones de campo; y del mismo modo se fabricó otro espécimen similar para ser curado bajo condiciones de laboratorio.

En las imágenes 4.7 y 4.8 se muestra la comparación visual entre ambos especímenes pigmentados con el 6% y 10% del pigmento.

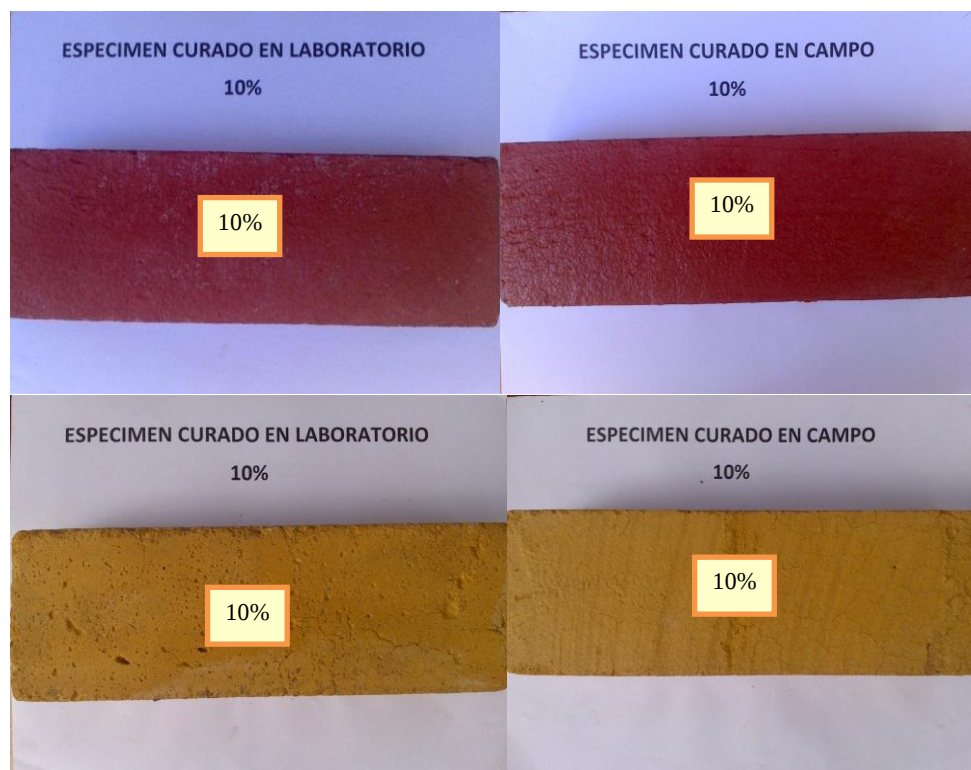


Figura 4.8. Comparación visual del color de especímenes pigmentados con una dosificación del 10% del peso del cemento.

FUENTE: Elaboración propia.

Como puede apreciarse en las imágenes anteriores, existe un cambio un poco más notorio en la tonalidad del color entre ambos especímenes, tanto para los de 6% como para los de 10% pues el espécimen curado bajo condiciones de campo, ha variado su tonalidad con respecto a su propio color inicial, y con respecto al espécimen curado bajo condiciones de laboratorio. Al igual que el espécimen que fue curado bajo condiciones de laboratorio presentó un cambio pequeño de color respecto a su propio color inicial.

Finalmente, con respecto al curado del mortero, éste es un factor muy importante que afectó el color del mismo, aunque en una magnitud inapreciable a simple vista, aun al mortero sin pigmentar. Esto se apreció en la variación que tuvieron los especímenes que fueron curados en campo, ya que fueron éstos especímenes los que cambiaron su color a uno levemente más claro, lo que quiere decir que el sol, la luz y el viento son los responsables del cambio que sufrieron los especímenes. No así con los especímenes que fueron curados bajo condiciones de laboratorio, pues estos presentaron cierta decoloración pero que fue mínima en comparación con los otros.

La magnitud de diferencia de color entre especímenes pigmentados sujetos a dos tipos de curado no es mayor que la magnitud de la diferencia de color entre dos especímenes no pigmentados curados bajo las mismas condiciones. Por lo que se establece la estabilidad de curado atmosférico de los pigmentos.

Ensayo de Resistencia a la luz de especímenes de mortero pigmentados:

El ensayo de resistencia a la luz de un espécimen de mortero pigmentado, tiene por objeto determinar la resistencia del pigmento a la exposición constante y severa de luz solar ó a los cambios de humedad y temperatura en los que se pueda ver afectada la tonalidad del color que se obtuvo al construir los elementos de mortero u hormigón pigmentado. La resistencia principal del pigmento a la luz, se logra determinar con la comparación visual de las dos partes de un espécimen, donde una de las mitades ha sido expuesta a la intemperie y la otra mitad ha estado cubierta por un periodo de tiempo determinado; de manera que al compararlas se pueda lograr determinar la influencia que ha tenido la exposición a la luz en el pigmento, por lo general la luz solar tiende a aclarar la tonalidad original de pigmento, pero eso dependerá de la resistencia y calidad del pigmento.

Para este caso se fabricó tres especímenes pigmentados con el 4%, 6% y 10% del peso del cemento.

Este ensayo originalmente consistía en exponer la mitad de un espécimen pigmentado, a un rayo de luz proveniente de un dispositivo o aparato tipo EH o E por 500 horas como menciona la norma ASTM G –23; por no contar con dicho aparato para esta investigación y por no estar a la disposición, solamente se expuso cada mitad de los especímenes a la luz

solar por el mismo periodo de tiempo de 500 horas. Se cubrió la mitad del espécimen, y seguidamente se ubicaron en un lugar donde recibieron la luz directa del sol y los cambios de humedades. Al finalizar el periodo de 500 horas de exposición solar, se les sustrajo el papel que cubría sus mitades y se compararon ambos al sol.

Al momento de la comparación visual de los especímenes, se pudo observar que el cambio de color sufrido en el lado del espécimen expuesto a la intemperie con respecto a la mitad cubierta es imperceptible a simple vista, como puede apreciarse en las siguientes imágenes.

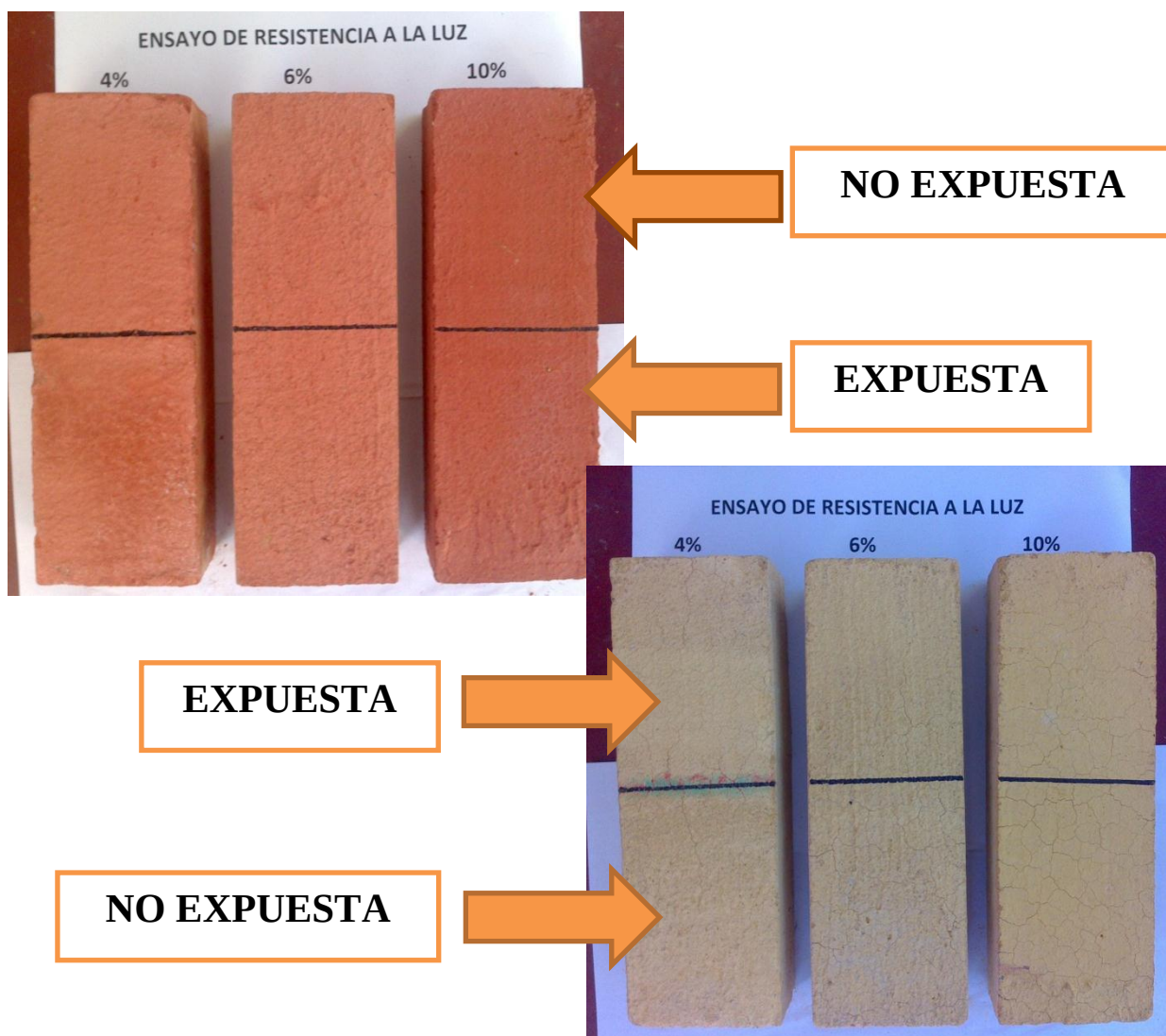


Figura 4.9. Diferencia en la tonalidad de color en especímenes ensayados a las 500 horas para la resistencia a la luz del mortero pigmentado hecho con cemento blanco

FUENTE: Elaboración propia.

Como puede apreciarse en las imágenes ninguno de los especímenes sufrió un cambio de color de una forma apreciable, es decir, no existen diferencias significativas con el color de las partes no expuestas. El contacto de la radiación solar con el mortero pigmentado ocasionó un descoloramiento, imperceptible a simple vista, del mortero, esto debido a los rayos ultravioleta.

Por lo tanto el pigmento es considerado resistente a luz, ya que como lo establece la norma, el pigmento tanto de óxido de hierro amarillo como rojo, pasaron la prueba.

4.3. Ensayo al hormigón en estado fresco

4.3.1. Ensayo estándar para el revenimiento del hormigón

De cada mezcla de hormigón fabricada, se fue haciendo la prueba de revenimiento, ya que esa era la condición primaria que se debía hacer con la mezcla. Siempre fue necesario alterar la cantidad de agua que era necesaria para producir el revenimiento requerido, debido a que con solo el agua de diseño no se producía el revenimiento de 4" que era el buscado. Es de notar que la norma ASTM C – 979 menciona que el revenimiento debe ser de $4 \pm \frac{1}{2}$ ".

Al concluir todos los ensayos y como se muestra en las tablas 3.7. y 3.8. todos los asentamientos, es decir para cada una de las mezclas fabricadas, cumplieron lo requerido por la norma.

4.4. Ensayo al hormigón en estado endurecido

4.4.1. Resistencia a la compresión.

Para el caso de la resistencia a compresión del hormigón se elaboraron graficas en donde se podrá analizar de manera más clara la incidencia del pigmento en esta propiedad del hormigón endurecido.

En el eje de las abscisas se ubican los porcentajes de pigmentos presentes en la mezcla; y los valores en el eje de las ordenadas, indican la resistencia a compresión correspondiente a cada porcentaje pigmento.

Hormigón pigmentado con óxido de hierro amarillo

- Edad del hormigón: 14 días

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN A LOS 14 DÍAS CON PIGMENTO AMARILLO				
Porcentaje de pigmento [%]	Resistencia a compresión [Kg/cm ²]	Resistencia a compresión proyectada a 28 días [Kg/cm ²]	Diferencial de resistencia [Kg/cm ²]	
[%]	[fc'k]	[fc'k]	[Δ fc'k]	[%]
0	166,06	195,37	0,00	0,00
4	137,43	161,68	33,68	-17,24
6	130,28	153,27	42,09	-21,55
10	94,28	110,91	84,45	-43,23

Tabla 4.1. Resistencia a la compresión a los 14 días con pigmento amarillo

FUENTE: Elaboración propia.

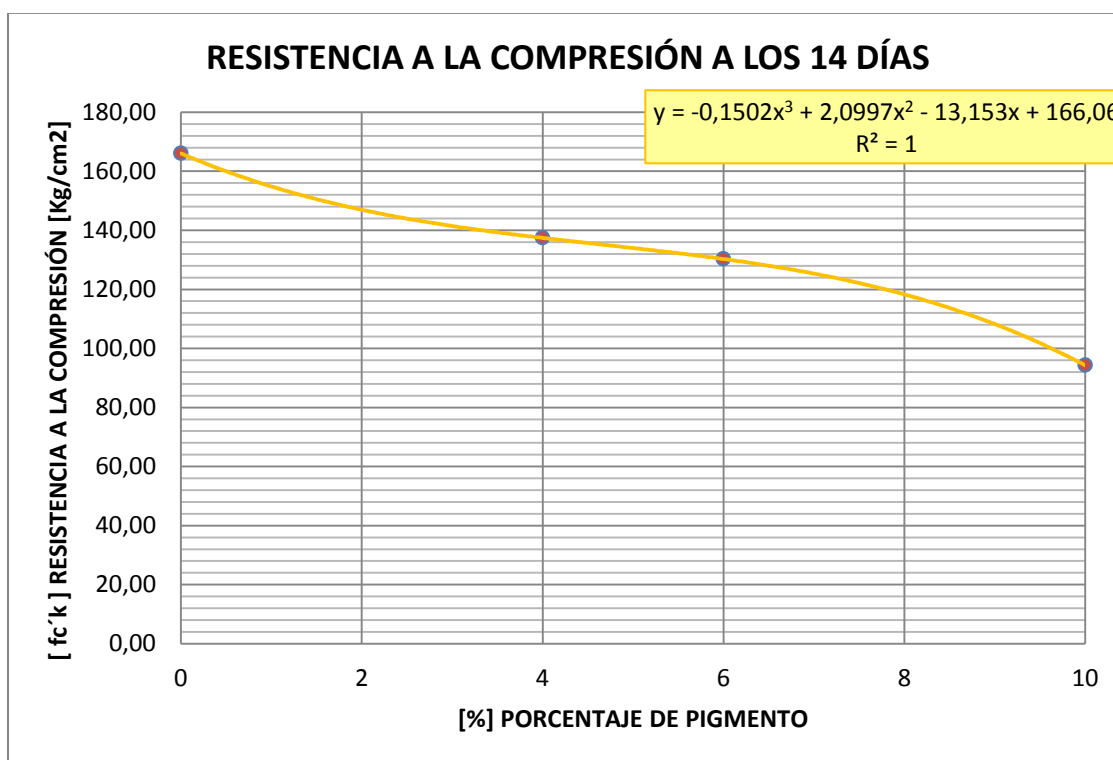


Figura 4.10 Porcentaje de pigmento amarillo Vs Resistencia a compresión a los 14 días

FUENTE: Elaboración propia

- Edad del hormigón: 28 días

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN A LOS 28 DÍAS CON PIGMENTO AMARILLO			
Porcentaje de pigmento [%]	Resistencia a compresión [Kg/cm ²]	Diferencial de resistencia [Kg/cm ²]	
[%]	[fc'k]	[Δ fc'k]	[%]
0	213,40	0,00	0,00
4	187,69	25,71	-12,05
6	180,01	33,39	-15,65
10	146,55	66,85	-31,32

Tabla 4.2. Resistencia a la compresión a los 28 días con pigmento amarillo

FUENTE: Elaboración propia.

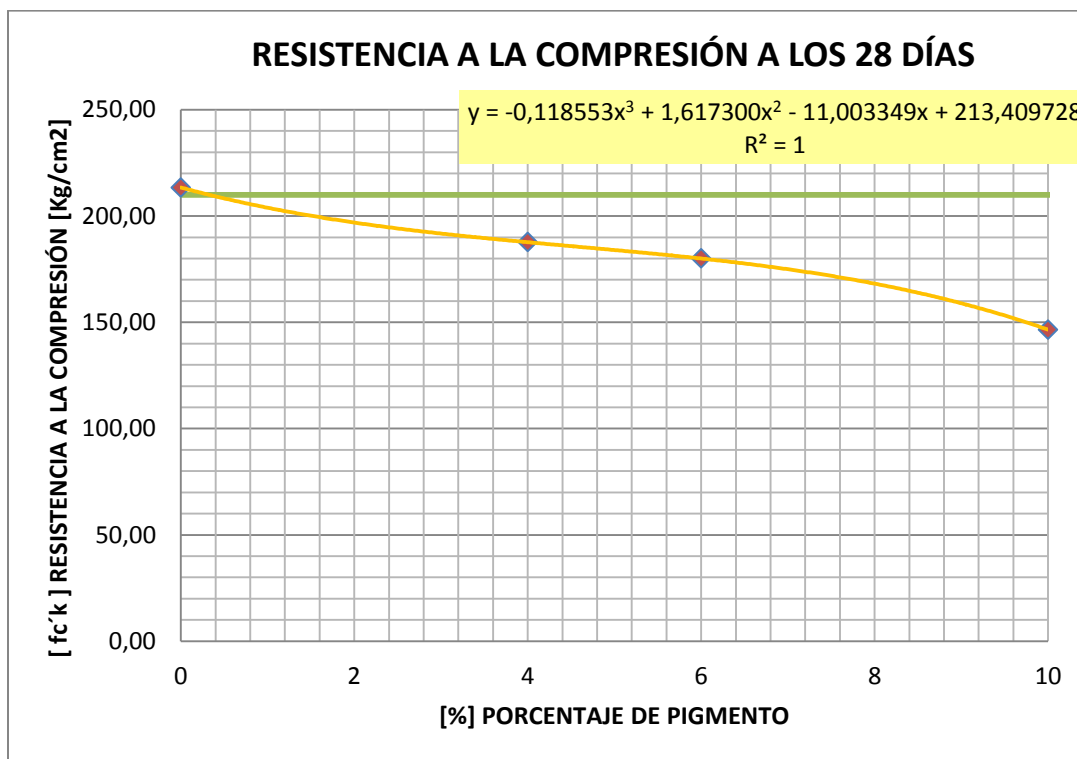


Figura 4.11 Porcentaje de pigmento amarillo Vs Resistencia a compresión a los 28 días

FUENTE: Elaboración propia

En las figuras 4.10 y 4.11 se hizo un ajuste de curva para cada gráfica, con la tendencia que se ajusta más los puntos obtenidos, otorgándonos una ecuación de aplicación empírica para calcular la resistencia del hormigón en función a un determinado porcentaje de pigmento tanto para los 14 días como para los 28 días

$$f'c'_{k_{14D}} = -0,1502 \cdot x^3 + 2,0997 \cdot x^2 - 13,153 \cdot x + 166,06 \quad (4.1)$$

$$f'c'_{k_{28D}} = -0,1186 \cdot x^3 + 1,6173 \cdot x^2 - 11,0033 \cdot x + 213,41 \quad (4.2)$$

Donde:

$f'c'_{k_{14D}}$: Resistencia a compresión a los 14 días

$f'c'_{k_{28D}}$: Resistencia a compresión a los 28 días

x : Porcentaje de pigmento aplicado

Se puede observar que la resistencia del hormigón decrece al incrementar el porcentaje de pigmento. Este punto será analizado más adelante en el acápite 4.4.2.

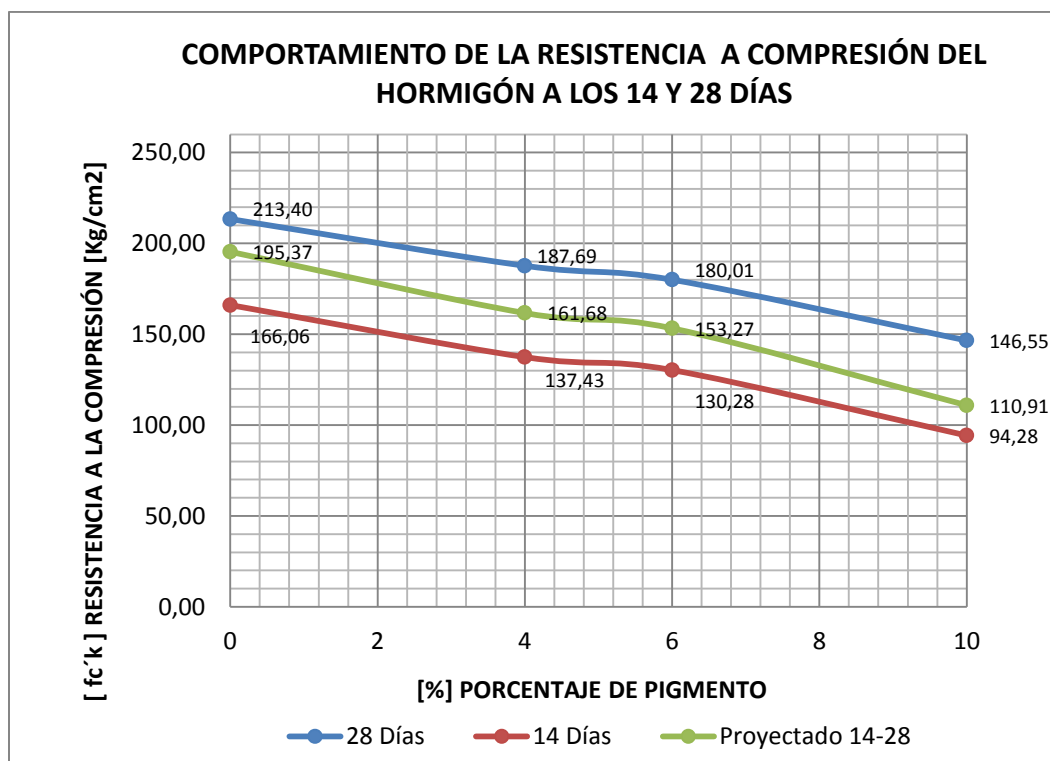


Figura 4.12. Comportamiento de la resistencia proyectada 14- 28 del hormigón con pigmento amarillo

FUENTE: Elaboración propia

Solapando las curvas de resistencia a la compresión correspondiente a los 14 y 28 días, y la resistencia proyectada a los 28 días; se puede ver que la curva de proyección, se encuentra por debajo de la curva real; por lo que se realizó una calibración de proyección para cada tipo de hormigón, a partir de la evolución de resistencia para cada porcentaje de pigmento presente en la mezcla, los valores de proyección se encuentran en anexos, en el informe de laboratorio.

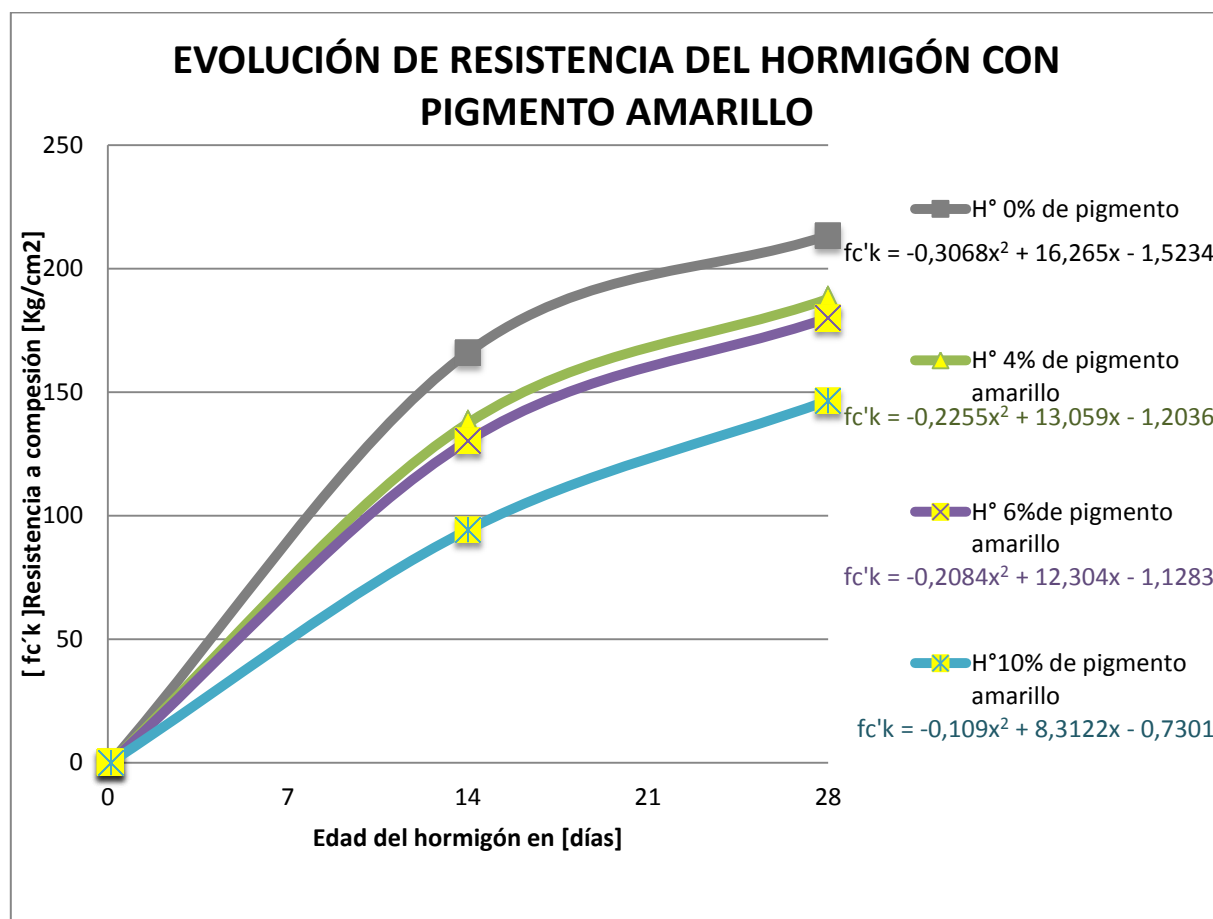


Figura 4.13. Evolución de resistencia del hormigón PIGMENTADO amarillo de 14 a 28 días

FUENTE: Elaboración propia

Cada ecuación está identificada, según el color de la curva de evolución, mismas tendrán aplicación siempre y cuando la rotura sea ejecutada a los 14 días de edad y los agregados tengan las mismas características que las del presente estudio.

Hormigón pigmentado con óxido de hierro rojo

- Edad del hormigón: 14 días

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN A LOS 14 DÍAS CON PIGMENTO ROJO				
Porcentaje de pigmento [%]	Resistencia a compresión [Kg/cm ²]	Resistencia a compresión proyectada a 28 días [Kg/cm ²]	Diferencial de resistencia [Kg/cm ²]	
[%]	[fc'k]	[fc'k]	[Δ fc'k]	[%]
0	166,06	195,37	0,00	0,00
4	153,90	181,06	14,30	-7,32
6	150,32	176,85	18,52	-9,48
10	136,25	160,29	35,08	-17,95

Tabla 4.3. Resistencia a la compresión a los 14 días con pigmento rojo

FUENTE: Elaboración propia.

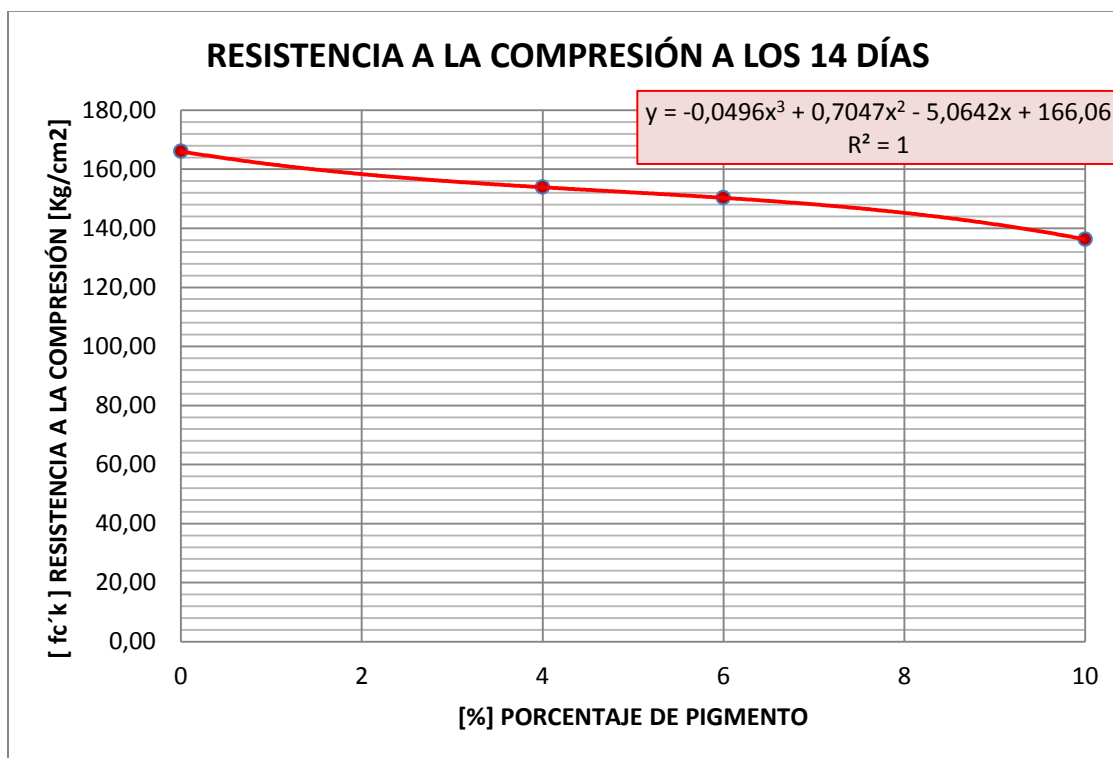


Figura 4.14 Porcentaje de pigmento rojo Vs Resistencia a compresión a los 14 días

FUENTE: Elaboración propia

- Edad del hormigón: 28 días

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN A LOS 28 DÍAS CON PIGMENTO ROJO			
Porcentaje de pigmento [%]	Resistencia a compresión [Kg/cm2]	Diferencial de resistencia [Kg/cm2]	
[%]	[fc'k]	[Δ fc'k]	[%]
0	213,40	0,00	0,00
4	205,49	7,91	-3,71
6	200,73	12,66	-5,93
10	191,37	22,03	-10,32

Tabla 4.4. Resistencia a la compresión a los 28 días con pigmento rojo

FUENTE: Elaboración propia.

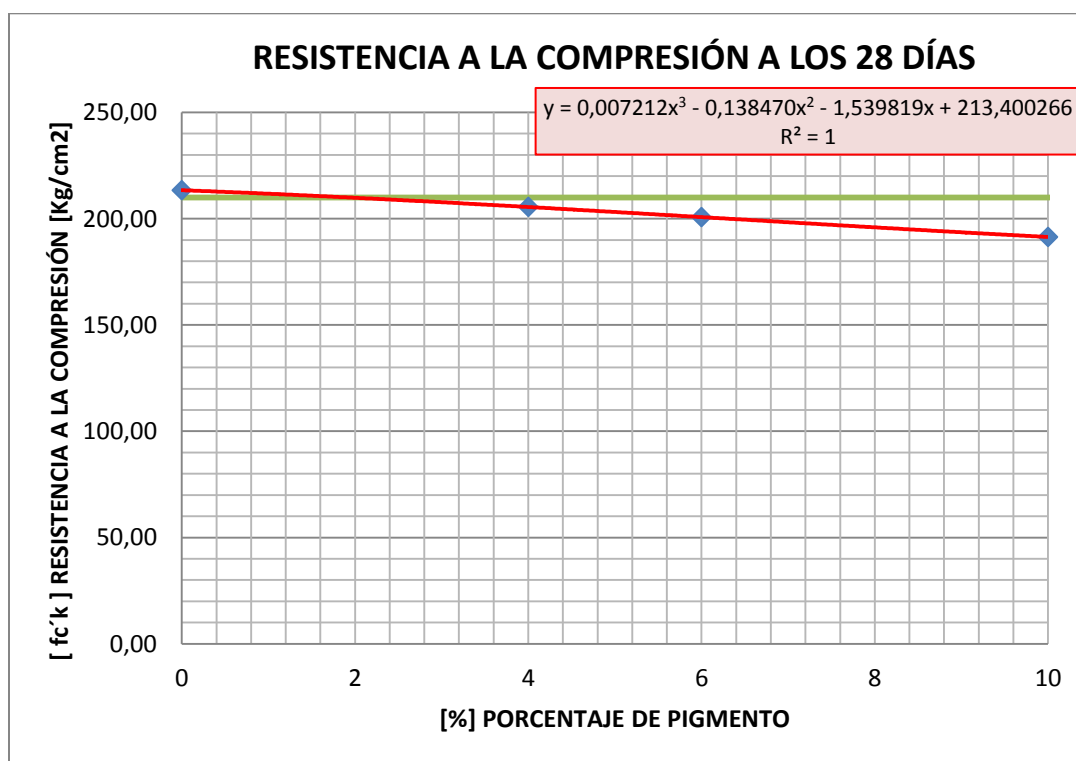


Figura 4.15 Porcentaje de pigmento rojo Vs Resistencia a compresión a los 28 días

FUENTE: Elaboración propia

En las figuras 4.14 y 4.15 se hizo un ajuste de curva para cada gráfica, con la tendencia que se ajusta más los puntos obtenidos, otorgándonos una ecuación de aplicación empírica para calcular la resistencia del hormigón en función a un determinado porcentaje de pigmento tanto para los 14 días como para los 28 días

$$f'c'_{k_{14D}} = -0,0496 \cdot x^3 + 0,7047 \cdot x^2 - 5,064 \cdot x + 166,06 \quad (4.3)$$

$$f'c'_{k_{28D}} = -0,00721 \cdot x^3 - 0,1385 \cdot x^2 - 1,5398 \cdot x + 213,4 \quad (4.4)$$

Donde:

$f'c'_{k_{14D}}$: Resistencia a compresión a los 14 días

$f'c'_{k_{28D}}$: Resistencia a compresión a los 28 días

x : Porcentaje de pigmento aplicado

Se puede observar que al igual que con el pigmento amarillo la resistencia del hormigón decrece al incrementar el porcentaje de pigmento. Este punto será analizado más adelante en el acápite 4.4.2.

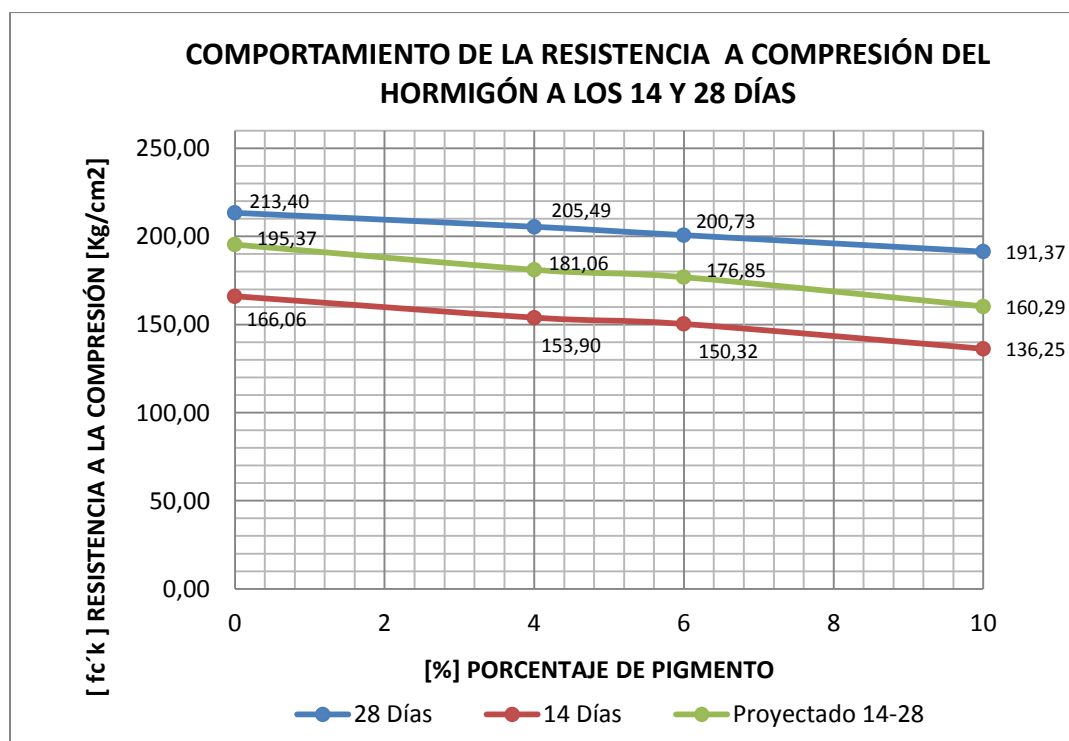


Figura 4.16. Comportamiento de la resistencia proyectada 14- 28 con pigmento rojo

FUENTE: Elaboración propia

Solapando las curvas de resistencia a la compresión correspondiente a los 14 y 28 días, y la resistencia proyectada a los 28 días; se puede ver que la curva de proyección, se encuentra por debajo de la curva real; por lo que se realizó una calibración de proyección para cada tipo de hormigón, a partir de la evolución de resistencia para cada porcentaje de pigmento presente en la mezcla, los valores de proyección se encuentran en anexos, en el informe de laboratorio.

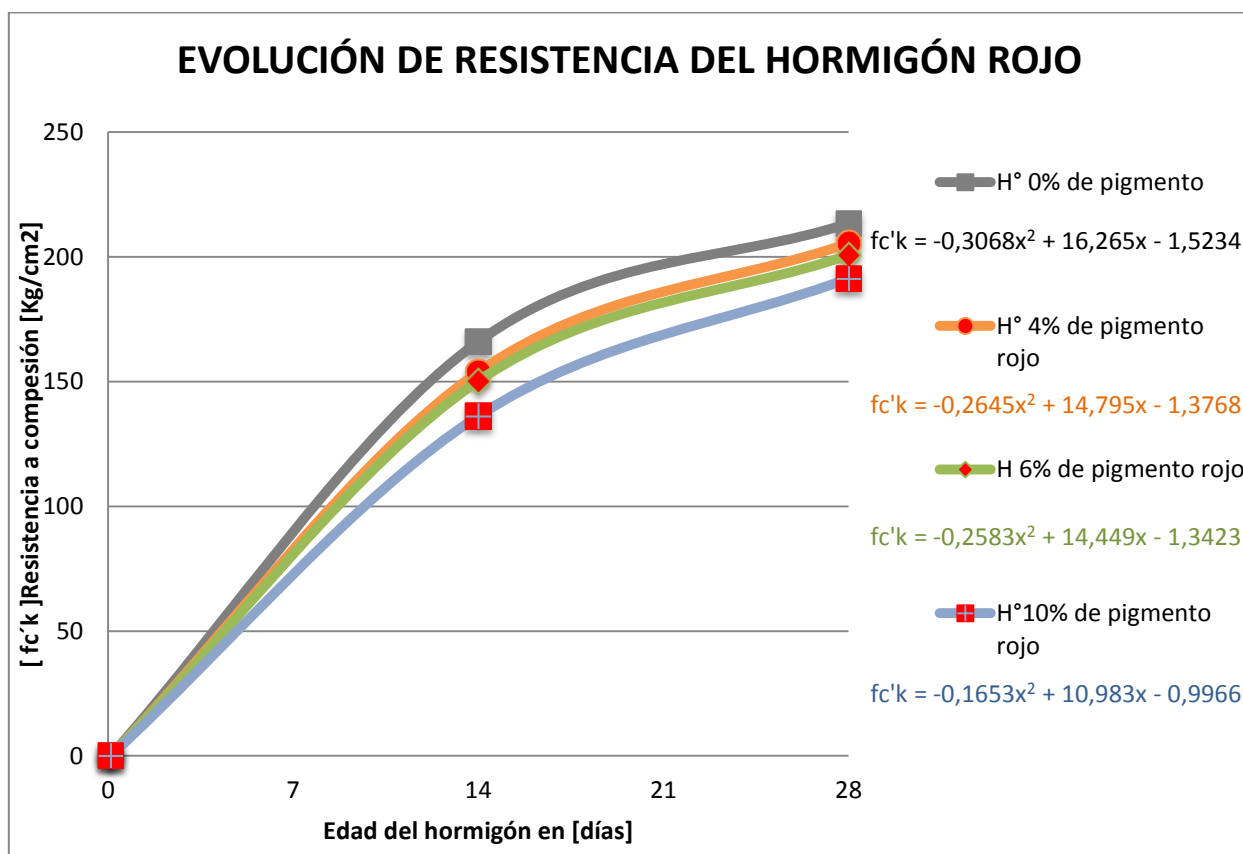


Figura 4.17. Evolución de resistencia del hormigón PIGMENTADO rojo de 14 a 28 días
FUENTE: Elaboración propia

Cada ecuación está identificada, según el color de la curva de evolución, mismas tendrán aplicación siempre y cuando la rotura sea ejecutada a los 14 días de edad y los agregados tengan las mismas características que las del presente estudio.

4.4.2. Disminución de la resistencia a compresión del hormigón pigmentado

Según la norma ASTM C – 979, la resistencia del hormigón pigmentado con la dosificación adoptada no debe ser menor que el 90% de la resistencia de un espécimen de control sin pigmentar. Para analizar si este requisito de resistencia se cumple en nuestra investigación se presentan las siguientes figuras:

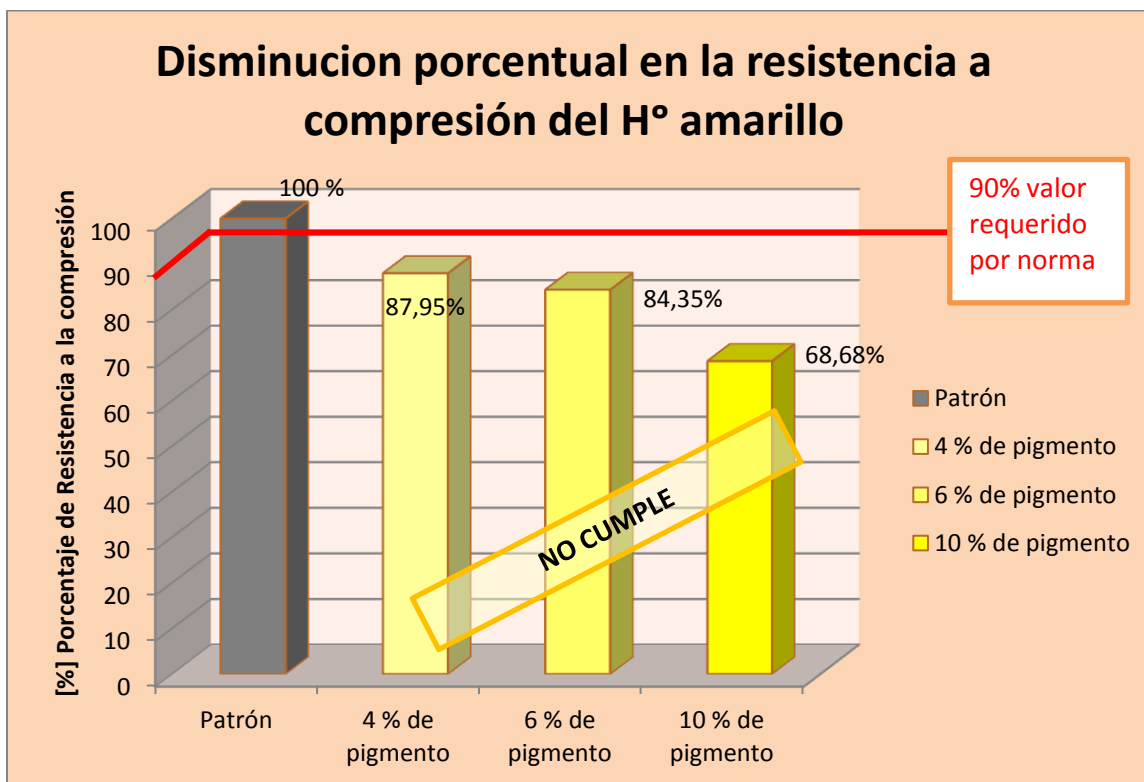


Figura 4.18. Disminución porcentual en la resistencia a compresión del hormigón con pigmento amarillo

FUENTE: Elaboración propia

Según resultados de especímenes hechos con pigmento amarillo, el pigmento no cumple con este requisito, pues la resistencia a la compresión a los 28 días del hormigón pigmentado con las tres diferentes dosis está por debajo de lo permitido por norma, es decir por debajo de la resistencia del hormigón sin pigmentar de la misma edad de fabricación.

Por tanto el hormigón pigmentado con óxido de hierro amarillo y hecho a base de cemento gris, no cumple con este requisito pedido por la norma.

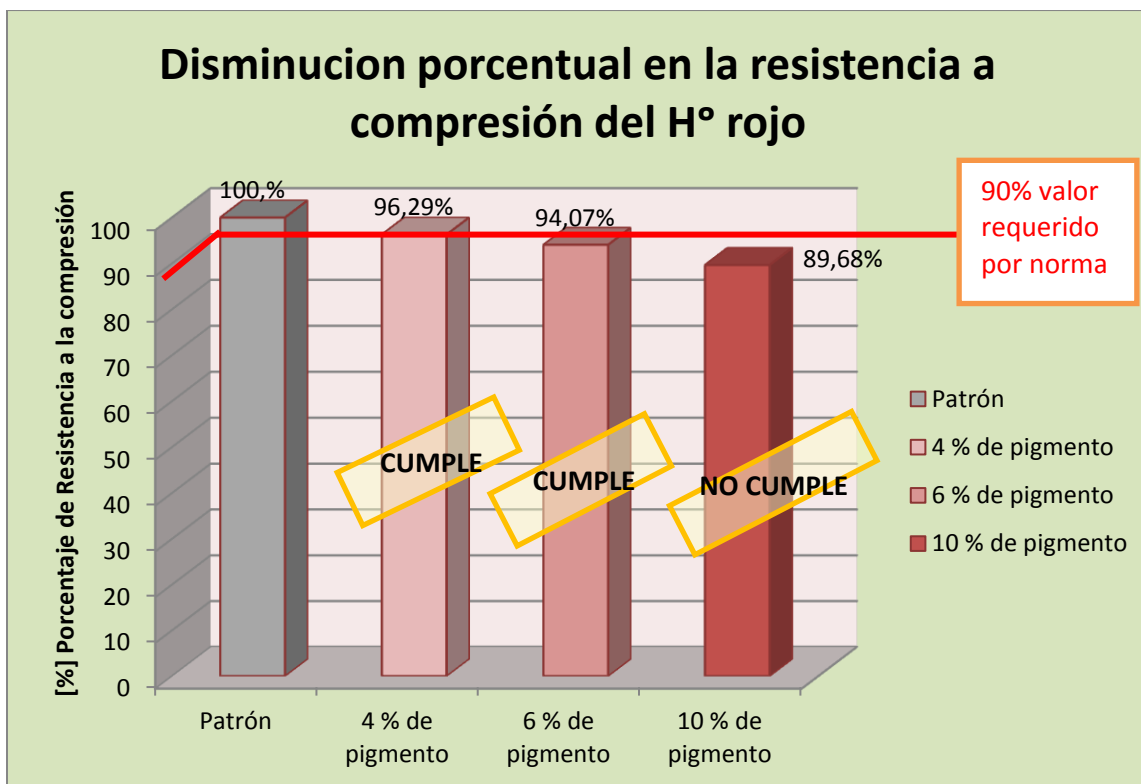


Figura 4.19. Disminución porcentual en la resistencia a compresión del hormigón con pigmento rojo

FUENTE: Elaboración propia

Según resultados de especímenes hechos con pigmento rojo, el pigmento cumple con este requisito en dos de las dosificaciones probadas, 4% y 6%, pues una dosificación de 10 % de pigmento conlleva a una resistencia a compresión del hormigón a los 28 días menor a la requerida por la norma.

Por tanto el hormigón pigmentado con óxido de hierro rojo y hecho a base de cemento gris, cumple con este requisito pedido por la norma, solo con una dosificación de 4% y 6%.

4.5. Contratación de hipótesis.

Partiendo de la hipótesis planteada para el desarrollo del presente estudio de investigación: “La adición de pigmento de óxido de hierro en polvo en una proporción que varía desde 4% hasta la tasa de dosis máxima establecida por norma de 10% por cantidad de cemento, generará un hormigón estructural de color integral que mantendrá un nivel de rendimiento comparable a la del hormigón de referencia en cuanto a su resistencia mecánica a

compresión”, se puede deducir que la misma ha sido demostrada, de acuerdo a los resultados obtenidos.

De acuerdo a todos los ensayos que se llevaron a cabo en el transcurso de esta investigación se establece que si bien el óxido de hierro rojo como el óxido de hierro amarillo cumplen con los requisitos para trabajar como un pigmento para dar color integral a la masa de hormigón, solo el óxido de hierro rojo al ser más estable, cumple con la hipótesis y con el principal requisito que es el de la resistencia a compresión, ya que estamos tratando con un hormigón estructural y no solo con fines arquitectónicos. El pigmento de óxido de hierro amarillo provoca un descenso en la resistencia a compresión del hormigón demasiado alto, tal que deja de tener un nivel de rendimiento comparable al del hormigón estructural de referencia.

Respecto a la dosis de pigmento para lograr un hormigón de color integral pero con fines estructurales, se recomienda una dosis de 6%, que es la suficiente con la que se garantiza el color y una reducción de resistencia a compresión dentro de los límites aceptables. Una dosis mayor se traduciría en un ligero aumento de color prácticamente inapreciable y una disminución de la resistencia a compresión mayor.

Por lo que se determina que una dosis mayor al 6% significa simplemente malgastar pigmento, y en consecuencia dinero, además de comprometer la propiedad de resistencia del hormigón.

4.6. Campo de Aplicación

El uso del hormigón de color tiene variadas aplicaciones y que cada día están siendo más utilizadas dentro del ámbito de la construcción y de la decoración. Entre sus aplicaciones podemos encontrar: Terrazas, estacionamientos, gradas, aceras públicas, plazas, soleras, muros, rampas, etc.

Con los cuales se han desarrollado proyectos tales como: Casas particulares, comercio, condominios, municipalidades, edificios, universidad, colegios, etc.

Afortunadamente, los tonos en el hormigón coloreado pueden ser tan durables como los que se encuentran en la naturaleza. Los pigmentos usados son los mismos responsables de la paleta de colores de la naturaleza. Disponibles en un amplio espectro de tonos, los óxidos minerales y otros pigmentos reconocidos usados en los aditivos del hormigón coloreado son económicos, resistentes al clima y de un color durable. Integralmente mezclados en el hormigón, los pigmentos se adhieren al cemento portland para llegar a formar parte permanente de la mezcla de hormigón. Combinado con la durabilidad intrínseca del hormigón, el color integral proporciona una belleza durable para complementar cualquier diseño.

El uso del color se está incrementando en casi todos los tipos de hormigón, desde el colado en obra, pasando por el pre moldeado hasta los productos manufacturados de hormigón tales como bloques para mampostería, muros de retención segmentados y adoquines entrelazados. No es sorprendente ver cuánta belleza y valor agrega el color al hormigón. La sorpresa está en los beneficios estéticos posibles cuando se consideran texturas, agregados expuestos, patrones estampados, revestimientos de forros arquitectónicos y otros acabados decorativos. En muchos proyectos, el hormigón coloreado es una alternativa económica a los materiales costosos de construcción, tales como la piedra o el azulejo.

- **Hormigón visto**

La construcción con hormigón visto muestra el material con que se compone el edificio y depende de un buen encofrado y del cuidado en el proceso, para que el acabado final de su superficie resulte de calidad y visualmente acorde con las necesidades del proyecto. El

hormigón, como envolvente expresiva, es entonces cerramiento y a la vez estructura, debiendo resolverse una serie de problemas técnicos que suelen aparecer en estos casos.

A continuación se presentan algunos ejemplos en los que el hormigón con color integral hubiese sido una forma de lograr un acabado definitivo con un mejor aspecto final.

- Mirador de La Loma de San Juan



Figura 4.20. Muros de Contención del Mirador y Pasarela de Hormigón Armado en la Loma de San Juan

FUENTE: Elaboración propia

La obra fue contemplada en tres componentes, la primera está referida a lo religioso; el segundo componente al turístico y el tercero al educativo, ese fue el objetivo del diseño, porque así lo planificaron los arquitectos y estará al servicio de la población.

Cuenta con una terraza mirador y la plaza del maestro en la parte inferior, donde en la misma instalación de la biblioteca, un sector servirá de auditorio para realizar eventos, se ha recuperado este espacio que estaba olvidado y que ahora la población tarijeña podrá apreciarlo y también valorarlo.

La inversión de la obra de La loma de San Juan, fue de siete millones de bolivianos, incluyendo la construcción del puente pasarela que conecta con la iglesia de San Juan, la biblioteca, las tres cruces, la entrada principal que contemplara el área administrativa, la remodelación de la plaza del maestro, la construcción de los muros de contención, los arreglos en jardines y toda la iluminación.

- Pasarela peatonal en la Av. Víctor Paz a la altura del Complejo Deportivo García Agreda



Figura 4.21. Pasarela peatonal de Hormigón

FUENTE: Elaboración propia

Según los aspectos técnicos, esta obra llegó a costar Bs 1.283.040, 17. Es una obra construida con gradas de hormigón tipo ‘A’, baranda metálica con tubo redondo cromado, rampas como medio de accesibilidad, apoyo central y lateral formando parte de la infraestructura y una superestructura conformada por vigas de hormigón tipo ‘P’, de 35M Pa, además de iluminación en los descansos de gradas.

Las autoridades municipales señalan que esta obra fue catalogada a nivel nacional como la más moderna en su tipo.



Figura 4.22. Gradas de hormigón en ingreso de pasarela

FUENTE: Elaboración propia

■ Puente Bicentenario



Figura 4.23. Puente de Hormigón Armado

FUENTE: Elaboración propia

Este proyecto se encuentra ubicado en la prolongación de la calle Sucre, uniendo los barrios El Molino y Germán Busch de los distritos 1 y 12. El puente permite la vinculación con diferentes barrios de la ciudad, desde el centro o Fuente de los Deseos hacia los barrios San Martín, Germán Buchs, Miraflores y viceversa; permitiendo así un descongestionamiento vehicular en el nudo Puente San Martín y Puente Bolívar.

El costo final del proyecto fue de Bs.16.633.868, este es un Puente vehicular tipo arco con una longitud total de 162 metros, incluidas losas de aproximadamente de H°A°, cables tensores cruzados para soporte de la superestructura. En la infraestructura tiene una fundación de Pilotes de 22 metros de profundidad aproximadamente. En la superestructura son Vigas postensadas de hormigón tipo PH-350 (vigas), diafragmas y tableros de hormigón tipo A H-250, arcos de H°A° hormigón tipo A H-280 (arcos y bloques), losa de H°A°, losa de aproximación H°A°, ancho de calzada de 10,32 metros y aceras de 1.40 metros.

▪ Prefabricados

Los bloques y adoquines de hormigón son dos tipos de prefabricados que han sido utilizados desde hace varias décadas en las obras civiles de nuestro país, pero su historia es bastante antigua y posee aplicaciones extranjeras.

Son elementos prefabricados que se fabrican cierto tiempo antes de ser utilizados en la obra. Los adoquines han sido utilizados para pavimentar vías vehiculares peatonales, y otros más que han dado muy buenos resultados. En cambio, los bloques de hormigón han sido utilizados para obras de edificación, muros de retención, decoración y otros usos más. De cada uno de ellos existe una gran variedad de tamaños formas, colores y texturas.

▪ Bloques de Hormigón

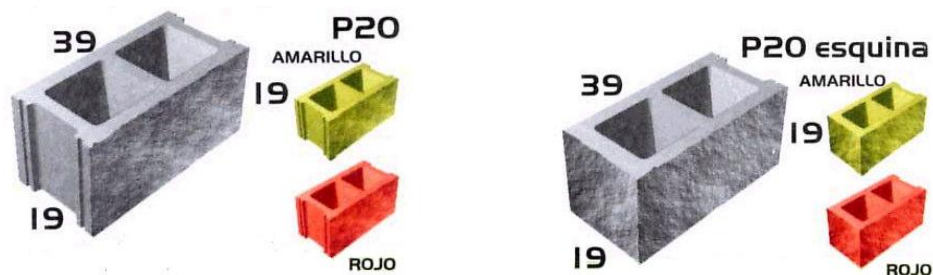




Figura 4.24. Vivienda fabricada con bloques de hormigón

FUENTE: Elaboración propia

■ Adoquines



Figura 4.25. Adoquines de hormigón

FUENTE: Elaboración propia



Figura 4.26. Adoquines en acceso vehicular

FUENTE: Elaboración propia

- **Pavimentos de Hormigón de Baja Intensidad de Tráfico**



Figura 4.27. Mezcla de Hormigón para Pavimento

FUENTE: Elaboración propia

Desde que se comenzó a utilizar el hormigón en lo que son los pavimentos, dando muy buenos resultados y al mismo tiempo se desarrollan nuevas técnicas que hacen más eficiente y menos costoso el trabajo del Ingeniero Civil o Constructor. En la actualidad existen métodos de diseño para poder construir pavimentos de hormigón y otros para reparación de los mismos. Según el tipo de tráfico y cargas en las carreteras, éstas han sido clasificadas en alta y baja intensidad de tráfico. Siendo los pavimentos de baja intensidad de tráfico aquellos tales como pasajes vehiculares, zonas residenciales y todas aquellas calzadas en las que no circulen vehículos demasiado pesados o que presenten flujos vehiculares muy intensos.

4.7. Análisis de Costos.

El uso del hormigón de color tiene variadas aplicaciones y que cada día están siendo más utilizadas dentro del ámbito de la construcción y de la decoración, entre sus aplicaciones podemos encontrar: Terrazas, estacionamientos, gradas aceras públicas, plazas, soleras, muros, rampas, etc.

Aunque debe tomarse en cuenta el costo extra de los aditivos de color, pueden aplicarse colores integrales y darles acabado en la mayoría de los diferentes tipos de obras de hormigón, usando técnicas similares a las requeridas para el hormigón simple, de modo que los costos de aplicación adicionales sean razonables. Además, la permanencia del coloreado integral del hormigón significa un ahorro significativo en los costos de ciclo de vida, en comparación con los gastos que implica aplicar y mantener capas de desgaste, recubrimientos, manchas o acabados pintados

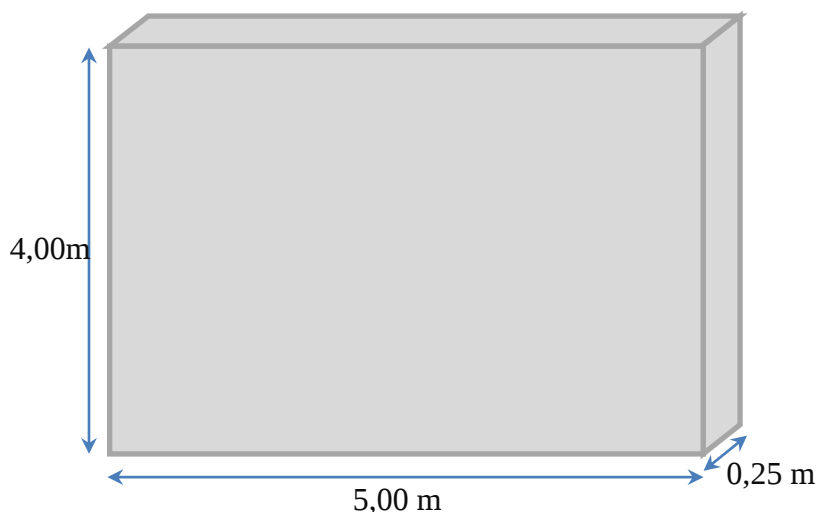
.

La evidencia de la durabilidad de los colores en el hormigón puede verse en proyectos de hormigón coloreado en todo el mundo que han mantenido su atracción durante 25 años o más.

4.7.1. Comparación de costos de fabricación de un elemento de hormigón pigmentado y uno de hormigón convencional pintado

La idea de realizar este análisis comparativo, es ver de alguna forma la diferencia económica que pudiera existir entre la utilización de un hormigón convencional pintado y un hormigón con pigmento de color.

Para este caso se utilizara como ejemplo un muro de hormigón de 5,00 x 0,25 x 4,00m, con dos manos de pintura.



▪ **Análisis de costos del muro de hormigón convencional pintado**

Superficie total a ser pintada: $5,00 \times 4,00 \times 2,00 + 5,00 \times 0,25 = 41,25 \text{ m}^2$

○ **Volumen de hormigón convencional en muro:** $5,00 \text{ m}^3$

DESCRIPCION		UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (Bs)	COSTO TOTAL (Bs)
1	Pintura látex exterior en muros	m2	41,25	22,67	935,14
2	Hormigón Convencional	m3	5,00	778,28	3891,40
TOTAL :					4826,54

Tabla 4.5. Costo de fabricación de un muro de hormigón convencional pintado

FUENTE: Elaboración propia.

▪ **Análisis de costos para un muro de hormigón con pigmento de color (6%)**

Para el volumen de hormigón del muro, se mostrara un ejemplo con el porcentaje de pigmento que se determinó como el más óptimo que es de 6%.

Según dosificación efectuada para los ensayos a compresión, nos arrojó como resultado para un m3 de hormigón 417,39 kg de cemento. Con este dato, se calcula la cantidad de pigmento que se necesita para lograr el porcentaje de pigmento requerido. (Ver análisis de precios unitarios)³⁰

³⁰Precios Unitarios. ANEXO 7

DESCRIPCION		UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (Bs)	COSTO TOTAL (Bs)
1	Hormigón pigmentado con óxido de hierro	m3	5,00	1524,89	7624,45
TOTAL :					7624,45

Tabla 4.6. Costo de fabricación de un muro de hormigón pigmentado con óxido de hierro

FUENTE: Elaboración propia.

- **Tabla resumen comparativa entre costo de fabricación de un muro de hormigón pintado y un muro de hormigón pigmentado con óxido de hierro**

DESCRIPCION		0% DE PIGMENTO	6% DE PIGMENTO
1	Hormigón convencional pintado	4826,54	
2	Hormigón pigmentado con óxido de hierro		7624,45

Tabla 4.7. Comparación de costos de fabricación de un muro pintado Vs. Un muro pigmentado

FUENTE: Elaboración propia.

Para el caso de usar un 6% de pigmento por cantidad de cemento, el costo del hormigón aumenta en un 36%. Lo que para este ejemplo se traduce en un incremento de costo inmediato de aproximadamente 2850 Bs. sobre el costo de un hormigón convencional pintado.

A simple vista se puede observar que la adición de pigmento al hormigón, encarece su costo de fabricación, pero se debe recordar y tomar en cuenta que la gran ventaja del método de colorear el hormigón es la largaduración y permanencia del color en el tiempo.

4.7.2. Costos a largo plazo de un elemento de hormigón pigmentado y uno de hormigón convencional pintado tomando en cuenta el trabajo de mantenimiento en su ciclo de vida útil

Como se mencionó, la gran ventaja del hormigón pigmentado es la larga duración y permanencia en el tiempo del color, por lo que es necesario tomar en cuenta los trabajos de mantenimiento que se deben realizar a la superficie de los elementos de hormigón no pigmentado.

Debido a que el hormigón pigmentado mantiene su color intenso pese a la incidencia de los rayos de sol, incluso, si la superficie se daña por agentes físicos y/químicos, creará éste una nueva superficie que mostrará exactamente el espectro del color original por lo cual el mantenimiento se hace prácticamente innecesario. Por el contrario la pintura puede desaparecer con el paso del tiempo debido a la exposición a las inclemencias climatológicas o el simple uso diario, pueden aparecer manchas grises sobre superficies pintadas debido a desprendimientos de la pintura, o colores degradados debido a la baja estabilidad frente a los rayos UV.

Para determinar el costo de mantenimiento se establecerá una vida útil del elemento estructural de 50 años, donde se realizara un mantenimiento de la pintura cada 4 años (Ver Pinturas para hormigón)³¹

- **Análisis de costos del muro de hormigón convencional pintado**

Para la vida útil establecida, se necesitara realizar un mantenimiento de la pintura original de la superficie del elemento, un total de doce veces. Realizando solo una mano de pintura por cada mantenimiento.

³¹ *Pinturas para hormigón. ANEXO 8*

DESCRIPCION		UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (Bs)	COSTO TOTAL (Bs)
1	Pintura látex exterior en muros	m2	41,25	22,67	935,14
2	Hormigón Convencional	m3	5,00	778,28	3891,40
3	Mantenimiento	m2	247,5	22,67	5610,82
TOTAL :					10437,36

Tabla 4.8. Costo de a largo plazo de un muro de hormigón convencional pintado

FUENTE: Elaboración propia.

▪ **Análisis de costos del muro de hormigón con pigmento de color (6%)**

Debido a que el hormigón pigmentado ya que no requiere del proceso de pintura, ni de terminaciones, no requiere más mantención que lavar la superficie.

DESCRIPCION		UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO (Bs)	COSTO TOTAL (Bs)
1	Hormigón pigmentado con óxido de hierro	m3	5,00	1524,89	7624,45
2	Mantenimiento	-	-	-	-
TOTAL :					7624,45

Tabla 4.9. Costo de a largo plazo de un muro de hormigón pigmentado con óxido de hierro

FUENTE: Elaboración propia.

▪ **Tabla resumen comparativa entre costo a largo plazo de un muro de hormigón pintado y un muro de hormigón pigmentado con óxido de hierro**

DESCRIPCION		0% DE PIGMENTO	6% DE PIGMENTO
1	Hormigón convencional pintado	10437,36 Bs.	
2	Hormigón pigmentado con óxido de hierro		7624,45 Bs.

Tabla 4.10. Comparación de costos a largo plazo de un muro pintado Vs. Un muro pigmentado

FUENTE: Elaboración propia.

AÑO	Hº CONVENCIONAL + MANTENIMIENTO			Hº PIGMENTADO (MANTENIMIENTO CERO)		
	Hº (Bs.)	MANT. (Bs.)	TOTAL (Bs)	Hº (Bs.)	MANT. (Bs.)	TOTAL (Bs)
0	4.826,54	0,00	4.826,54	7624,45	--	7.624,45
4	4.826,54	467,57	5.294,11	7624,45	--	7.624,45
8	4.826,54	935,14	5.761,68	7624,45	--	7.624,45
12	4.826,54	1.402,71	6.229,25	7624,45	--	7.624,45
16	4.826,54	1.870,28	6.696,82	7624,45	--	7.624,45
20	4.826,54	2.337,84	7.164,38	7624,45	--	7.624,45
24	4.826,54	2.805,41	7.631,95	7624,45	--	7.624,45
28	4.826,54	3.272,98	8.099,52	7624,45	--	7.624,45
32	4.826,54	3.740,55	8.567,09	7624,45	--	7.624,45
36	4.826,54	4.208,12	9.034,66	7624,45	--	7.624,45
40	4.826,54	4.675,69	9.502,23	7624,45	--	7.624,45
44	4.826,54	5.143,26	9.969,80	7624,45	--	7.624,45
48	4.826,54	5.610,83	10.437,37	7624,45	--	7.624,45

Tabla 4.11. Evolución del costo de mantenimiento durante la vida útil de una estructura para un muro de hormigón pintado

FUENTE: Elaboración propia.

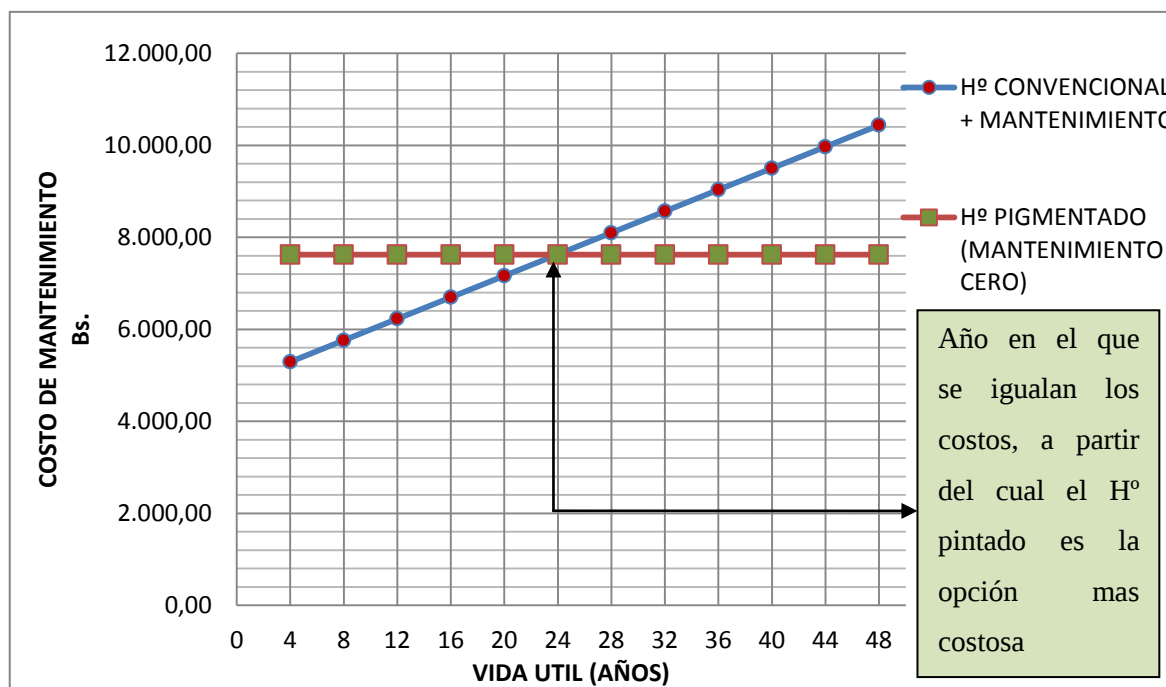


Figura 4.28. Comparación de los costos de mantenimiento

FUENTE: Elaboración propia

Tomando en cuenta los trabajos de mantenimiento que se deben realizar a un elemento fabricado con hormigón convencional pintado, a largo plazo el hormigón de color integral pigmentado con óxido de hierro en lo que respecta a costo es comparable e incluso más económico en casi un 30% menos que un hormigón convencional pintado.

De acuerdo a la Fig. 4.28. se observa la tendencia de los costos de mantenimiento de un muro de hormigón pintado de aumentar conforme pasan los años, mientras que los costos para un hormigón pigmentado se mantienen iguales.

Es por eso, que el hormigón coloreado es cada día el más usado en la construcción y las razones están dadas por las ventajas que ofrece, entre las que se encuentran, un ahorro en costos por metro cuadrado ya que no requiere del proceso de pintura, ni de terminaciones, por lo cual el mantenimiento es innecesario; y estéticamente tienen un valor agregado.

4.8. Conclusiones y recomendaciones

- Se analizó la incidencia del pigmento en el color y en la resistencia mecánica a compresión del hormigón, sobre un diseño de mezcla con una resistencia f'_{ck} de 210 kg/cm^2 , mediante los ensayos ASTM C39, cuyo resultado fue la reducción de la resistencia f'_{ck} .
- Se estableció la dosis óptima de pigmento que es de 6% respecto a la masa de cemento, la cual logra un equilibrio entre una buena coloración y una resistencia a la compresión que garantiza el cumplimiento de la norma.
- En la caracterización de los agregados se pudo evaluar: tamaño, peso, volumen, humedad, absorción, lo cual nos permitió identificar la compatibilidad de los agregados y trabajabilidad de cada uno en la mezcla en el proceso de cálculo.
- Se diseñó un hormigón convencional inalterado, para una resistencia f'_{ck} de 210 kg/cm^2 , mediante la aplicación de cálculo, basado en las normas de dosificación ACI 211, American Concrete Institute.
- Se comparó las mezclas de hormigón pigmentado Vs. hormigón convencional, verificando que el aumento de finos que provoca agregarle los pigmentos de óxido de hierro a la mezcla de hormigón convencional si bien le otorga un color integral también produce una disminución en cuanto a su resistencia a compresión.
- Se ha generado una ecuación empírica mediante un ajuste de curva para determinar la resistencia de un hormigón pigmentado en función al porcentaje de pigmento, expuesto en el acápite 4.4.1, siempre y cuando las características de los agregados sean semejantes a los del presente estudio de investigación
- El estudio revela, que los hormigones coloreados con óxido de hierro rojo fabricados con materiales locales, presentan un comportamiento similar a otros hormigones ensayados en otros países, es decir, no disminuyen mayormente la resistencia a la compresión. Esto permite afirmar que los hormigones realizados, no presentaran variaciones de las que pueda desprenderse que exista un riesgo para su utilización, ya que dichos resultados revelan una baja incidencia de la adición de

pigmento en la resistencia, ajustándose dichos valores a los márgenes establecidos por las normas. Y no así cuando se trata de hormigones coloreados con óxido de hierro amarillo.

- Tanto el cemento como los áridos influyen notablemente en la intensidad del color, mientras más gris sea el color del cemento, más oscuro y opaco será el resultado de la muestra con pigmento. Lo mismo sucede con el caso de los áridos, entre más oscuros sean, menos intensa será la tonalidad del hormigón. También influye en las tonalidades finales de cada color, el tipo de encofrado, vibrado y desmoldante utilizado.
- Uno de las ventajas del hormigón pigmentado es que se produce una coloración estable. Las estructuras no requieren de terminación de pinturas, ni morteros coloreados. Se produce una mayor rapidez de la obra, dado la eliminación de faenas de terminación.
- El hormigón con pigmento ha tenido un gran incremento dentro de la construcción, a modo de reducir los costos y mejorar o innovar la estética de una obra.
- Se recomienda respetar las proporciones de cálculo, ya que son determinadas bajo las características de los agregados, y se debe utilizar agua potable sin impurezas, ni sólidos en suspensión.
- Por último se puede decir que la producción de hormigón con color requiere de experiencia y una exigente supervisión.