



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA
TECNOLOGÍAS

**DESARROLLO DE MORTERO TERMOCRÓMICO DE REVESTIMIENTO:
APLICACIÓN EN FACHADAS ARQUITECTÓNICAS**

T E S I S

**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN ARQUITECTURA**

PRESENTA:

ARQ. FLOR IRENE SÁNCHEZ MORENO

Comité tutor:

Dr. en Arq. Maribel Jaimes Torres

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA, UNAM

Dr. Horacio López Sandoval

FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM

Mtro. en Arq. Ernesto Ocampo Ruiz

FACULTAD DE ARQUITECTURA, UNAM



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



DESARROLLO DE MORTERO TERMOCRÓMICO DE REVESTIMIENTO

APLICACIÓN EN FACHADAS ARQUITECTÓNICAS

TESIS QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRA EN ARQUITECTURA

PRESENTA:
FLOR IRENE SÁNCHEZ MORENO



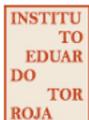
Agradecimientos

A mis padres por su apoyo absoluto.

A mi familia y amigos por su paciencia y comprensión

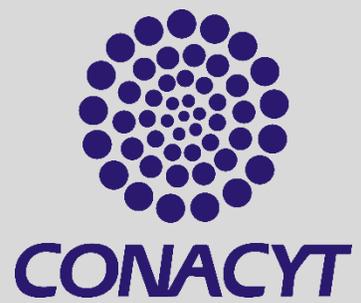


A la Universidad Nacional Autónoma de México por su constante apoyo durante mis estudios de Maestría a través de sus múltiples instancias.



Instituto de Ciencias de la Construcción
EDUARDO TORROJA

Al Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja por las facilidades para el uso de sus instalaciones, equipos y acervos.



Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico otorgado para la realización de esta investigación.

Resumen

El propósito de esta investigación fue el desarrollo de mortero de revestimiento con propiedades ópticas dinámicas en función al cambio de temperatura para su aplicación en fachadas, con la finalidad de disminuir la ganancia térmica en las envolventes arquitectónicas.

La composición empleada para la elaboración del mortero termocrómico reversible correspondiente a una matriz cementosa basada en CPO RB (Cemento Portland Ordinario Blanco), agregados y pigmentos termocrómicos con temperatura de transición de 28° c; para su elaboración se utilizaron las regulaciones establecidas por la norma UNE-EN 12878, la relación empleada cemento/agregado/agua con dosificación 2:6:1 con adición de 3% de pigmento termocrómico relación de la masa en sólido seco del agregado.

Las propiedades ópticas del mortero muestran un aumento significativo de reflectancia en un rango 22° c-26° c a una longitud de onda en el rango visible (400-700nm), lo que deriva en una diferencia de coloración. Para temperaturas más altas, el material muestra un color claro y alta reflectancia en el rango visible, mientras que para temperaturas más bajas muestra la coloración base del pigmento agregado asociado a una baja reflectancia, este cambio se realiza de manera reversible derivado a los cambios de temperatura.

Índice

Introducción	11
01 Planteamiento de la Investigación	14
1.1 Objetivo General	15
1.2 Objetivos Específicos	16
1.3 Hipótesis de la investigación	16
02 Envolvertes Arquitectónicas	18
2.1 Fachadas Prefabricadas	19
2.2 Clasificación	21
2.3 Propiedades y Características	23
2.4 Aspectos generales de producción	24
2.5 Acabados	28
2.5.1 Acabados de concreto fresco dentro del molde	28
2.5.2 Tratamientos del concreto endurecido fuera del molde	29
2.5.3 Acabados con grano expuesto	31
03 Propiedades de los materiales	34
3.1 Propiedades ópticas	35
3.1.1 Radiación Electromagnética. Espectro	36
3.2 Interacción de la luz con los sólidos	37
3.2.1 Refracción	39
3.2.2 Reflexión	39

3.2.3 Absorción (óptica)	40
3.3 El color	41
3.3.1 Espectroscopia de UV-Vis	43
3.3.2 El Espacio de Color CIE L*a*b*	44
3.4 Propiedades térmicas	46
3.4.1 Calentamiento por energía radiante	46

04 Clasificación de los Materiales

49

4.1 Materiales Inteligentes	50
4.2 Materiales Cromoactivos	51
4.3 Materiales Termocrómicos	53
4.3.1 Cristales líquidos termocrómicos	53
4.3.2 Mezclas termocrómicas orgánicas	55
4.3.3 Aplicaciones	56

05 Desarrollo Experimental

61

5.1 Método Experimental	61
5.2 Materiales	63
5.2.1 Pigmentos	63
5.2.2 Cemento	63
5.2.3 Agregados	64
5.2.4 Agua	64
5.3 Normatividad	64
5.4 Variables de experimentación	62

06 Resultados y discusión de la etapa experimental

68

6.1 Caracterización de los pigmentos termocrómicos	68
6.1.1 Microscopía electrónica de barrido (MEB) / Espectrometría de dispersión de energía de rayos X (SEM-EDX)	69

6.1.2 Difracción de Rayos X (DRX)	72
6.1.3 Espectrometría Infrarroja con Transformada de Fourier (FT-IR)	74
6.1.4 Espectroscopia de UV-Vis	77
6.1.5 Resultados generales las técnicas de caracterización	81
6.2 Caracterización óptica (reflectancia difusa)	82
6.2.1 OP-F1	83
6.2.2 OP-F2	84
6.3 Caracterización térmica (temperatura superficial)	87
6.3.1 Ubicación	88
6.3.2 Desarrollo experimental	89
6.3.3 Resultados	90
Conclusiones	98
Bibliografía	100
Índice de Imágenes	104
Índice de Tablas	106

Introducción

Actualmente el empleo de los materiales está en auge, con el paso del tiempo los avances científicos y tecnológicos buscan mejorar su funcionamiento, así como su viabilidad de respuestas, por lo cual se convierte en requisito indispensable conocer cada una de sus cualidades y propiedades para que sean utilizados de la mejor forma.

Es de suma importancia apostar por la innovación de nuevos materiales partiendo que es la industria de la construcción es la responsable de consumir el 50% de los recursos naturales y el 40% de energía (Anink & Boonstra, 1996). En la actualidad, se dedican importantes esfuerzos en diferentes campos de investigación al desarrollo de materiales inteligentes con propiedades controladas por estímulos externos.

Gran parte de las nuevas tecnologías enfocadas en el ámbito de la construcción tiene su mayor auge en los materiales estructurales, dejando de lado el desempeño de los materiales de recubrimiento de las

edificaciones, siendo estas las que se encuentran en mayor contacto con los factores externos del medio en el que se localiza el objeto arquitectónico. Los recubrimientos han ido evolucionando gracias al avance tecnológico, sin embargo, las necesidades van en aumento día con día es por ello que se debe continuar con la búsqueda de obtener materiales con mejores propiedades que brinden mayores beneficios en su aplicación a elementos arquitectónicos.

Como respuesta al aprovechamiento de las nuevas tecnologías como materiales aplicados a la arquitectura surge la iniciativa de generar un material de recubrimiento que no solo genere un aspecto estético variable, si no también cuente con características que permitan tener un estrecho vínculo con las condiciones únicas del lugar y sus necesidades, ofreciendo mejores propiedades en su aplicación.

En la presente investigación se estará enfocando en el desarrollo de mortero termocrómico reversible mediante la incorporación de pigmentos

orgánicos, para su aplicación en fachadas arquitectónicas, dividida a través de los siguientes capítulos.

En el Capítulo 01, es la introducción que da pie al desarrollo de la investigación, partiendo de la problemática observada del cual deriva los objetivos y alcances plantados para esta investigación

En el Capítulo 02, se describe la importancia que juega las envolventes arquitectónicas en las edificaciones, así como las ventajas que ofrece el sistema constructivo enfocado a fachadas arquitectónicas, también se mencionan los tipos de recubrimientos utilizados actualmente y su importancia.

Posteriormente en el Capítulo 03, se aborda la definición y comportamiento de los materiales denominados inteligentes. Se pone particular atención a los que competen a esta investigación que son los materiales termocrómicos, se describen de manera breve los efectos asociados al efecto termocrómico y sus características particulares.

Adicionalmente se hace una breve descripción de las recientes

investigaciones y aplicaciones de los materiales termocrómicos desarrolladas en el ámbito de la arquitectura.

En el Capítulo 04, se describe el método experimental, así como los parámetros utilizados para la elaboración del mortero. Se presenta las consideraciones utilizadas para la realización de la caracterización química y óptica del material.

En base a los resultados obtenidos en el anterior capítulo, en el Capítulo 05 se presentan los resultados obtenidos de las diferentes etapas de desarrollo del proyecto y se plantean las conclusiones finales obtenidas y su aplicación en el ámbito de la arquitectura.



Muestras de Mortero
Termocrómico

Flor Sánchez

Planteamiento de la Investigación

01

La arquitectura tiene como objetivo dar solución a las necesidades del usuario a través de espacios habitables que satisfaga los requerimientos básicos para el óptimo desarrollo de sus actividades, así como adaptarse al entorno en el que el objeto creado se emplaza, razón por la cual un “espacio habitable” debe generar un equilibrio entre el usuario y el medio ambiente, así como los factores que el intervienen.

Como creadores de espacios habitables, los arquitectos podemos apostar por aportar soluciones u alternativas que promuevan el desarrollo de nuevos materiales eficientes en los espacios arquitectónicos que permitan una sinergia con el medio ambiente y el entorno que lo rodea.

La desmedida actividad humana, ha provocado que hoy en día el calentamiento global sea una de las preocupaciones más importantes a nivel mundial, inmersos en esta problemática, aproximadamente la mitad de las emisiones de gases de efecto invernadero es producto de los edificios. El consumo de energía consumida para el acondicionamiento del ambiente interior (calefacción, refrigeración e iluminación) es directa o indirectamente la fuente más importante de dióxido de carbono CO₂, uno de los principales gases del efecto invernadero. (Edwards & Hyett, 2004).

Por otra parte, las fachadas arquitectónicas juegan un papel importante en las condiciones de confort térmico dentro de las edificaciones debido a que junto con las cubiertas cuentan con el mayor porcentaje de área construida expuesta al ambiente exterior.

Así como la piel en los seres vivos, las superficies envolventes de los edificios regulan las relaciones con el medio dentro de ellas, actualmente son de especial importancia aquellas relaciones que corresponden a intercambios energéticos. La envolvente actúa como una pantalla a través de la cual el aire y el calor son absorbidos y disipados, debe ser una

membrana flexible que se adapte al clima local y minimice el intercambio de energía.

Cuando los elementos de cerramiento exterior, cuentan con temperaturas superficiales más bajas, estas disminuyen la penetración de calor en el edificio y con ello mejora considerablemente la temperatura al interior de la edificación, disminuyendo el consumo energético utilizado en sistemas de enfriamiento o calentamiento.

De acuerdo con el con la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE), las mejores prácticas de diseño de la envolvente y la iluminación pueden ahorrar, al menos 40% del uso total de energía de un inmueble, mientras que las malas prácticas lo pueden aumentar un 90%.

Actualmente el sector de la construcción ha tomado gran importancia sobre la eficiencia energética de los edificios, debido a que juega un importante papel ambiental; una edificación eficiente aporta el máximo confort para sus ocupantes, con unos requisitos mínimos o nulos de refrigeración o calefacción activa.

La búsqueda de nuevos materiales que puedan resolver con mayor eficiencia las problemáticas antes mencionadas, se vuelven el punto de partida de esta investigación mediante la incorporación de materiales termocrómicos en fachadas arquitectónicas, a través de un control adecuado del flujo de luz visible y energía solar a través de la envolvente.

11

Objetivo General

Desarrollo de un mortero termocrómico mediante la incorporación de pigmentos comerciales para mejorar su comportamiento óptico-térmico en fachadas arquitectónicas.

12

Objetivos Específicos

- Identificar composición, estructura, morfología y comportamiento óptico de los pigmentos termocrómicos, mediante técnicas de caracterización.
- Elaborar un mortero mediante la incorporación de los pigmentos capaz de conservar el comportamiento termocrómico en la mezcla cementante.
- Evaluar las propiedades ópticas de material condición reflectancia difusa.
- Evaluar el comportamiento térmico superficial del elemento en el ambiente exterior

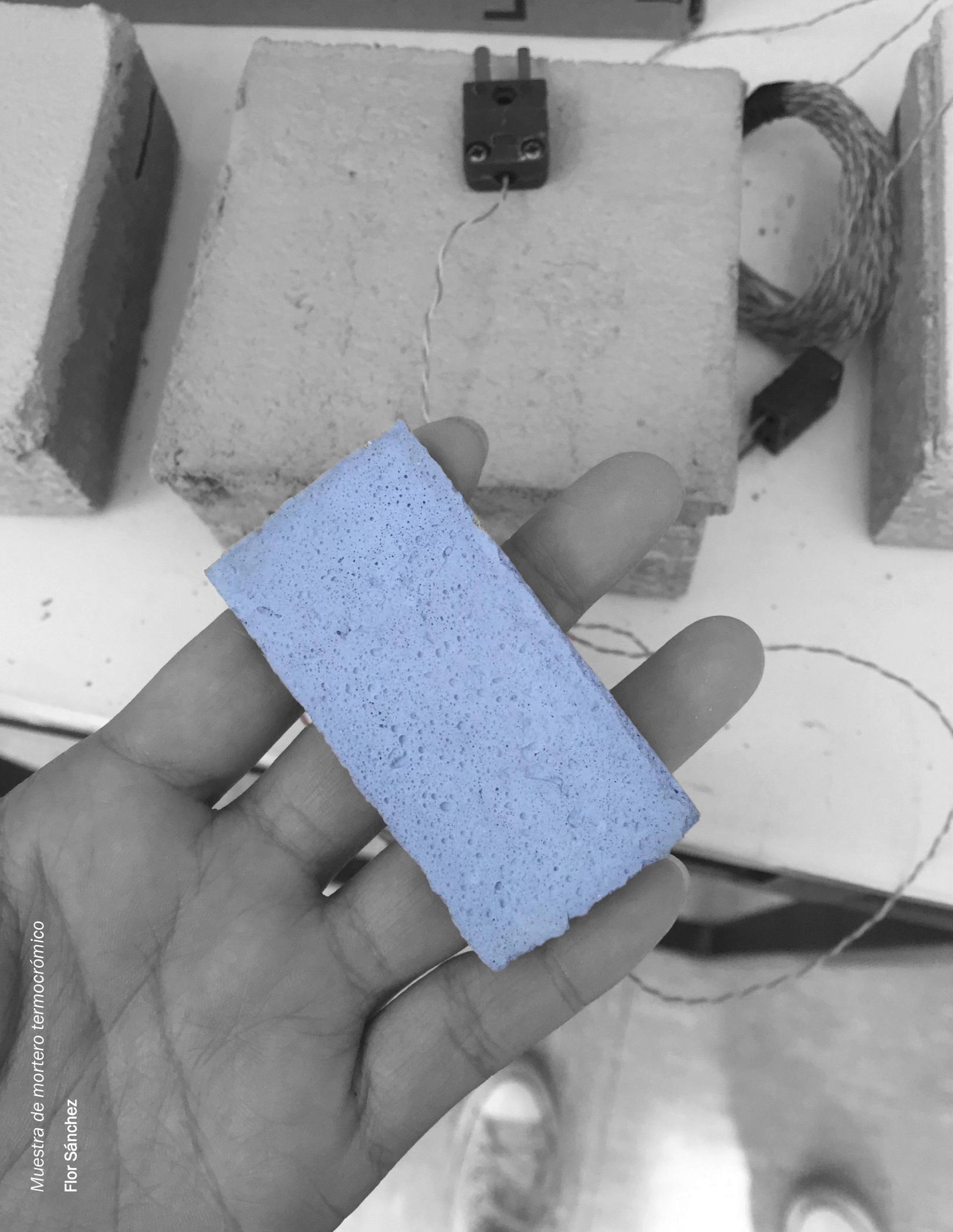
13

Hipótesis de la Investigación

El desarrollo de un mortero termocrómico mediante la incorporación de pigmentos orgánicos y su aplicación en fachadas arquitectónicas, resultará en un material con propiedades ópticas dinámicas en función de la temperatura, contribuyendo al mejoramiento térmico superficial.

Muestra de mortero termocrómico

Flor Sánchez



Envolventes Arquitectónicas



La premisa principal de la arquitectura es sin duda el crear espacios destinados a satisfacer las necesidades humanas, así como del entorno y las especies que en lo rodea, por ello, para generar un espacio habitable es esencial lograr al equilibrio con el medio ambiente.

En el ámbito de la arquitectura podemos definir a las envolventes como aquel “elemento físico” que delimita dos entornos: el exterior y el interior, en el cual el primero es aquel determinado por las condiciones climáticas naturales propias del lugar, las cuales controlan el ambiente interior el cual deberá de responder a las condiciones de confort y habitabilidad para los usuarios.

En el aspecto estético podemos definir a la envolvente como aquel elemento que es la imagen de todo espacio arquitectónico, en donde cada uno de sus componentes están sometido a las condiciones exteriores, por lo que su elección tiene que dar respuesta a cada una de ellas.

Actualmente la envolvente se visualiza como aquel elemento que sufre las acciones provenientes del medio, así como la piel de los seres vivos las superficies envolventes de los edificios regulan las relaciones interior-exterior. Hoy en día son de especial importancia aquellas relaciones que corresponden a intercambios energéticos de las edificaciones.

Debido a lo cual es fundamental que implementar el diseño adecuado de estos elementos en cada proyecto, generan espacios arquitectónicos que reduzcan el uso desmedido de energías no renovables, recurriendo al desarrollo de nuevos materiales y sistemas constructivos.

Fachadas Prefabricadas

Podemos definir a la fachada como algo tan simple como la parte exterior de un edificio la cual está constituida por un conjunto de elementos que aportan soluciones a las necesidades externas e internas de la edificación.

A través de ella se representa el rostro del edificio en su superficie y diseño derivan de la función de la construcción, de sus materiales, ubicación, clima, momento histórico; a la par que cumplen funciones formales y estéticas.

A lo largo de la historia las fachadas han experimentado una serie de transformaciones para los distintos estilos arquitectónico, sin embargo, la evolución más considerable surgió a consecuencia de la evolución de las nuevas técnicas constructivas y el desarrollo de nuevos materiales como consecuencia de la revolución industrial.

Las fachadas prefabricadas o paneles prefabricados comenzaron su desarrollo recientemente, sin embargo, fue una idea planteada a finales del siglo XIX por los ingleses que reaparece con fuerza a principios de los años 50. A consecuencia de la corriente Modernista, el uso de concreto como material para fachadas prefabricadas toma gran importancia.

El racionalismo y la expresividad fueron los motivos que guiaron los diseños de la arquitectura modernista cuyos principales impulsores fueron grandes arquitectos entre los que destacan las obras de Le Corbusier, Walter Gropiu, Alvar Aalto. Un ejemplo destacado del uso de del concreto en fachadas prefabricadas son las unidades de vivienda de Marsella, Francia obra del arquitecto Le Corbusier. **Figura 1.**



Figura 1. Unidad habitacional en Marsella, Francia. Le Corbusier 1952

A partir de esa época, el auge de los paneles como elementos prefabricados para fachada ha tenido un desarrollo considerable, aunque un principio estos generalmente eran elementos simples y racionales del elemento que los conformaba, el desarrollo de la prefabricación apuntó hacia la elaboración de elementos de mayores dimensiones, con diversos tipos de acabados en la búsqueda un diseño de fachadas más expresivo.

A consecuencia de ello, se han desarrollado gran variedad de diseño tanto en formas, colores y texturas del concreto incorporado a las fachadas, dotando al diseñador de una libertad más amplia del diseño, a través de construcciones más expresivas e individuales.

Las características propias del material y el amplio desarrollo en la construcción, hicieron que los elementos de concreto prefabricado tuvieran un auge importante a consecuencia de las amplias posibilidades de diseño, colores, texturas que este brindaba para su uso en fachadas.

El desarrollo de nuevos materiales como concretos ligeros, concreto reforzado con fibras, han permitido que actualmente podamos diseñar paneles prefabricados con formas complicadas y con gran variedad de acabados superficiales en respuesta a las necesidades proyecto arquitectónico.

2.2

Clasificación

Se pueden clasificar en tres tipos de fachada según su composición material, fachada in situ, fachada mixta y fachada prefabricada. (Sanchez, 2010)

- Fachada in situ¹: Son cerramientos constituidos por elementos pequeños (ladrillos, bloques de concreto, concreto armados etcétera), se colocan en obra sin necesidad de una modulación previa.
- Fachadas mixtas: Aquellas que, aunque basándose en el tipo de cerramiento anterior, incorporan elementos prefabricados.
- Fachadas prefabricadas: Son cerramientos constituidos por elementos prefabricados, que llevan incluidas las partes o componentes para la sujeción del panel en la obra, el acabado al exterior, y que solamente sufren el proceso de montaje mecanizado.

Dependiendo de su función dentro del edificio, la fachada prefabricada, puede ser diseñada como estructural o simplemente armada. Por ello se requiere un análisis adecuado para comprobar que la flexión y compresión combinadas son admisibles para el elemento.

Las fachadas portantes o paneles portantes soportan y transmiten las cargas verticales de los pisos y la estructura. **Figura 2.**

¹ In situ: Designa un método o técnica que se utiliza o tiene lugar en el mismo emplazamiento de la obra



Figura 2. Museo Internacional del Barroco, Puebla México.

Mientras que las fachadas o paneles auto portantes solamente soportan las cargas del viento, la estabilidad horizontal. También puede recibir las cargas de los elementos de carpintería que puedan soportar y las acciones exteriores sobre los mismos.

Estos elementos pueden suprimirse sin afectar a la estabilidad del conjunto ni a la estructura. Este tipo de paneles prefabricados solo cumplen la función de envolvente, y se limitan a una función de cerramiento en cuyo caso soportan solo su propio peso. **Figura 3.**

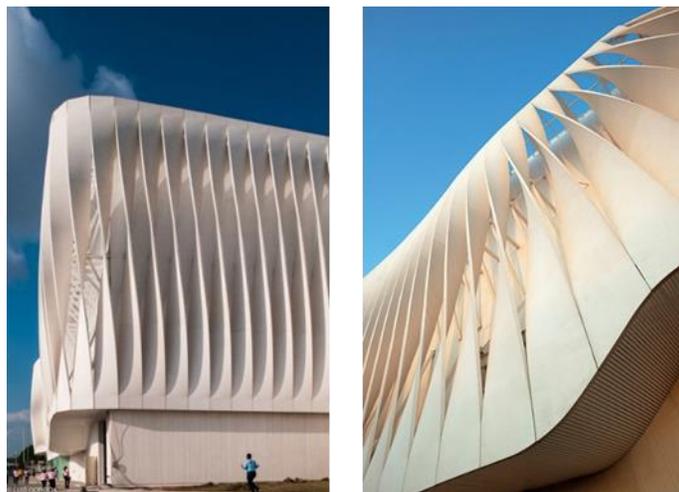


Figura 3. Fachada Liverpool Altabrisa, Tabasco, México

Propiedades

Los paneles prefabricados que conforman las fachadas de concreto, poseen las ventajas que el material del que se fabrican “concreto”, el cual además de ofrecer una gran adaptabilidad en cuanto formas y dimensiones, reúne una serie de propiedades. El IMCYC (2004) considera como principales propiedades:

1. **Trabajabilidad:** La facilidad con la cual pueden mezclarse los ingredientes y la mezcla resultante puede manejarse, transportarse y colocarse con poca pérdida de la homogeneidad.
2. **Cohesividad:** La capacidad del concreto de mantenerse unido en estado fresco, esta puede verse afectada por la granulometría del agregado y la dosificación de agua.
3. **Resistencia:** Es la capacidad de soportar cargas y esfuerzos, siendo su mejor comportamiento en compresión en comparación con la tracción, debido a las propiedades adherentes de la pasta de cemento.
4. **Durabilidad:** El concreto debe ser capaz de resistir la intemperie, acción de productos químicos y desgastes, a los cuales estará sometido.

Debido a sus propiedades anteriormente descritas, las fachadas prefabricadas de concreto pueden utilizarse en diferentes tipos de edificaciones sin importar el uso que estas desempeñen por lo cual deben considerarse las siguientes características para su diseño y fabricación:

Dimesión	Las dimensiones máximas son limitadas a cada fabricante y dependen directamente del medio de transporte en el que serán trasladadas para su montaje.
Modulación	La coordinación modular proporciona una relación entre el diseño, la planificación, la fabricación de los

	elementos y la instalación de estos en la obra. Optimizando recursos, reduciendo costos y plazos de ejecución
Acabados	Dado los requerimientos del proyecto, la prefabricación ha desarrollado técnicas y acabado de superficies que permitan dar un aspecto diferente al del concreto gris tradicional, existe una gran variedad en acabados.
Colores	La variedad de utilizados en los elementos prefabricados se logra tanto en los componentes propios del concreto, o con la inclusión de aditivos colorantes y pigmentos de óxidos minerales que se mezclan con el concreto fresco

24

Aspectos generales de producción

Las fachadas de concreto arquitectónico son elaboradas mediante un proceso de industrialización compuesto por un sistema lineal de producción, al contrario de la construcción tradicional en la que cada etapa suele ser independiente del resto, la prefabricación es un concepto amplio que tiene en consideración y compatibilidad entre cada una de ellas con lo que el resultado final debe adecuarse a las exigencias establecidas en proyecto.

Para profundizar sobre los aspectos generales de producción basado en las normas dictadas por la Asociación Nacional de Industriales del Presfuerzo y la Prefabricación A.C(Rodríguez, Ribotta, & Reinoso, n.d.). **Figura 4.**

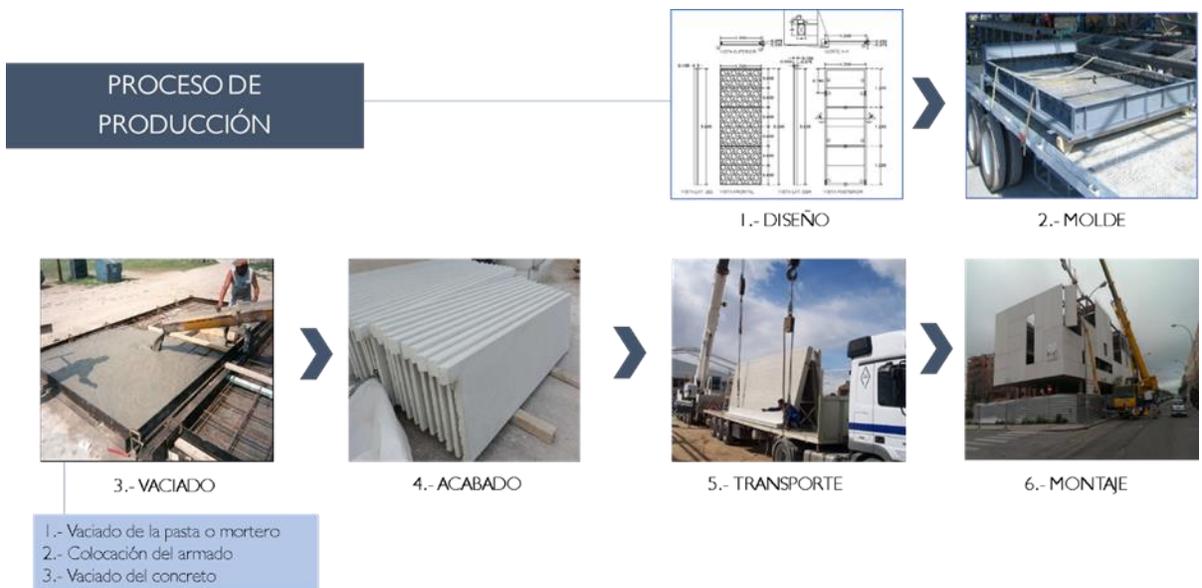


Figura 4. Proceso de producción de fachadas prefabricadas. (ANIPPAC)

Diseño

Para iniciar cualquier proceso de producción se requiere una planeación y diseño de las piezas que serán fabricadas las cuales deberán cumplir con los criterios requeridos para el proyecto en específico. El procedimiento de diseño inicial de las fachadas arquitectónicas son las siguientes:

1. Establecer la apariencia arquitectónica determinando las posibles posiciones de juntas, cambios en material de revestimiento y detalles arquitectónicos específicos.
2. Para dar orden a su fabricación la fachada se divide en piezas individuales las cuales deberán considerar la relación entre la estructura interna de la edificación, así como el método de fijación de paneles.
3. Para lograr la optimización de diseño es importante considerar la repetición de los módulos, de ello dependerá la cantidad de moldes que habrá que fabricarse. Así también las dimensiones la superficie elevada, en tanto mayor sea las dimensiones de los paneles menor se emplearán menor número de moldes y lo cual optimizará los tiempos de fabricación.

Molde

Estos elementos son en gran medida los responsables del resultado final de los elementos prefabricados y su diseño responde a las características específicas del elemento arquitectónico. Estos pueden ser elaborados de materiales como madera, concreto, acero, plástico, fibra de vidrio con resinas de poliéster, yeso o una combinación de varios materiales (Rodríguez et al., n.d.). Si bien existe una variedad de acabados finales, la apariencia superficial de cualquier elemento prefabricado se encuentra relacionada directamente con el material y la calidad de los moldes en los que se realizan.

Vaciado

Se inicia mediante la preparación de molde iniciando con un desmoldante adecuado al tipo de material del cual fue elaborado el molde, para posteriormente verter la pasta, mortero u aquel elemento que conformara el acabado superficial del elemento, seguido por la colocación de acero de refuerzo y los elementos de anclaje para su posterior manipulación. Es de suma importancia que todos elementos de refuerzo mantengan su posición mientras se extiende la siguiente capa de concreto y se compacta, cuidando que estos no queden expuestos. Finalmente, el concreto se vibra para asegurar su compactación y eliminar el aire que pudiese quedar atrapado y el causante de oquedades en el elemento.

Con el objetivo de dotar de hidratación al concreto e impedir la formación de fisuras superficiales debido a la pérdida de agua mientras este se encuentra en estado plástico, se lleva a cabo el proceso de curado mediante método de fraguado natural o por un periodo menor a través de la utilización de métodos de calentamiento del molde o vaporización del concreto, para posteriormente desmoldarse mediante eslingas y puente grúa o por mesas y trasladarla a la zona de almacenamiento o tratamiento.

Acabado

Desmoldado el elemento prefabricado se procede a limpiar su superficie mediante agua a presión permitiendo observar la apariencia superficial, el

terminado puede ser muy diferente únicamente por el tratamiento posterior que se le dé a la pieza como: aparente, graneado, martelinado, picoleteado, pulido, pulido brillado, sanblastado.

Los acabados también pueden realizarse directamente desde su fabricación mediante el molde, podemos obtener: acabados lisos, con relieves mediante patrones y formas, recubrimientos integrales, en superficies horizontales, con llana y alisado, estampado y con diseños incrustados (Gómez, 2018).

Transporte

Al ser elementos prefabricados fuera de obra en su mayoría, los prefabricados deberán ser trasladados de la planta de producción hacia donde será colocado, de la buena realización de este proceso dependerá en gran medida las condiciones en que los elementos sean colocados en obra. Es importante que en este proceso se tengan en cuenta las siguientes condiciones; el transporte de los prefabricados se realice en vertical, apoyados lateralmente en un caballete metálico y su borde inferior en madera o rastreles, con protecciones de goma o similar (Caz, 2008).

Montaje

Para la ejecución de esta etapa es necesario la revisión planos para la colocación correcta de los elementos conforme a la nomenclatura designada a cada módulo, de ello dependerá reducir los tiempos de ejecución y evitar retrasos en obra. Debido al peso de los paneles el montaje se realiza generalmente con grúa autopropulsada, en este proceso el uso de equipos especializados y personal cualificado resulta indispensable para la precisión y velocidad con la que se efectuó el montaje.

Los elementos prefabricados se deberán montar a nivel, plomo, escuadra, se alinearán correctamente a las juntas verticales y horizontales y se mantendrá una junta de anchura uniforme.

Acabados

Las fachadas prefabricadas de concreto han evolucionado de tener un acabado monótono a convertirse una nueva expresión arquitectónica, actualmente los procesos de producción se encuentran enfocados a crear fachadas creativas e innovadoras que den respuesta a la arquitectura contemporánea.

El avance tecnológico ha permitido dejar de considerar al concreto un anodino, el desarrollo de nuevos materiales, la mejora de sus propiedades ha logrado que el concreto arquitectónico brinde actualmente una solución más flexible para la construcción de fachadas.

Debido a su versatilidad el concreto puede utilizarse en la construcción tanto estructuralmente como estéticamente, los efectos visuales que pueden crearse agregando color o textura son innumerables. Así mismo, es importante considerar que los agregados influyen en la apariencia final del concreto, por lo que se debe prestar atención especial a su selección.

Podemos clasificar los tipos de acabados partiendo de si se realizan en concreto fresco o endurecido y si este se encuentra dentro o fuera del molde.

2.5.1 Acabados de concreto fresco dentro del molde

- Acabado directo:

Es el aspecto que la superficie del concreto adquiere por medio del molde en el que fue elaborado, al cual no se le da ningún tratamiento posterior.

- Acabado con relieves mediante patrones y forros:

A través de moldes con textura o relieve se pueden lograr gran variedad de efectos, según los requerimientos específicos del proyecto, estos acabados se logran mediante laminados plásticos que son colocados en el molde antes de realizar el vaciado del concreto. **Figura 5.**



Figura 5. Panel prefabricado Senado de la República y Plaza Mariana Ciudad de México

- Acabado con recubrimientos integrales:

Los elementos prefabricados pueden fabricarse con recubrimientos de un material diferente, por ejemplo, azulejos, piedra natural, etc. Comúnmente son fijados al molde mediante una técnica que permite incorporarlos elemento durante el vaciado y la compactación del concreto.

- Acabado estampado:

Mediante el método del estampado brinda la posibilidad de añadir texturas o patrones sobre la superficie de concreto arquitectónico de diversos diseños como por ejemplo ladrillo, piedra naturales o mosaicos.

2.5.2 Tratamientos del concreto endurecido fuera del molde

Entre los métodos más comunes para realizar los acabados del concreto endurecido se encuentra la materlina, chiflon de agua o de arena, en los cuales se caracterizan por remover la capa exterior de la pasta de cemento, cada tratamiento brinda una textura y acabado distinto según el método empleado.

- Acabados por medios manuales:

Para la obtención de texturas que muestren el agregado expuesto de la superficie de concreto, se utilizan diversos métodos como el martelinado, picoteado, cincelado, decascarado, entre otros. La apariencia final del concreto dependerá del método, el tamaño y forma del agregado, así como de las herramientas que se utilice para su elaboración.

- Estrías fracturadas:

Las estrías martilladas se obtienen superficies muy atractivas y se logran mediante el fracturado manual de manera uniforme de la superficie de concreto dejando expuesto el agregado, conforme al aspecto requerido es importante seleccionar los agregados específicos que se utilizarán en la pasta de concreto para obtener el acabado deseado. **Figura 6.**



Figura 6. Panel prefabricado. Aquario EXPO 2008 Zaragoza

- Sand-blas (chorro de arena):

Sand-blast es una técnica que consiste en el lanzamiento de materiales abrasivos con aire a presión sobre la superficie de concreto dotando de una textura diferente dependiendo el tiempo de exposición al chorro. El acabado superficial puede variar desde una revelación superficial del concreto (**Figura 7a**), hasta un corte profundo la cual crea textura pronunciada de los granos agregados (**Figura 7b**).

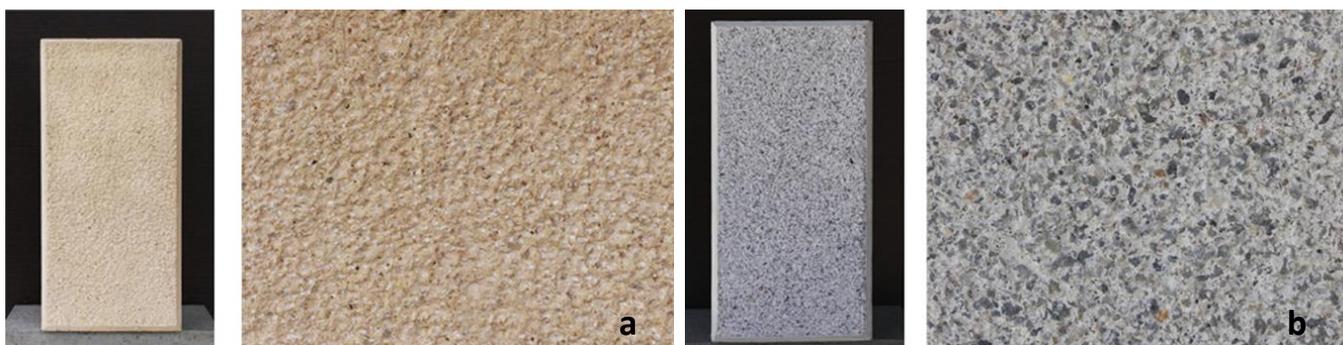


Figura 7. (a) Superficie tratada con chorro de arena ligero. (b) Superficie tratada con chorro de arena intenso.

- Acabado esmerilado, pulido y brillado:

La apariencia que brindan los acabados pulidos sobre el concreto es semejante con el que se puede obtener de una piedra natural pulida, granito o mármol, a menor costo. Dependiendo de las piedras de esmerilar utilizadas sobre la superficie, es posible obtener diversos grados de pulido.

Si bien el método esmerilado no resalta el potencial del color agregado, este puede abrillantarse mediante ácido oxálico y posteriormente encerarse o barnizarse. Gracias al desarrollo en la automatización de técnicas de pulido los elementos de concreto arquitectónico ofrecen posibilidades más amplias que el mármol natural y tanto en costo como en la libertad de diseños.

2.5.3 Acabados con grano expuesto

Para obtener mejores resultados de este acabado es importante seleccionar la dosificación de la mezcla y los agregados que la conforman, estos pueden ser de tamaños y colores diferentes que proporcionen un contraste sutil o más pronunciado.

Los dos métodos más comunes de lograr un acabado con grano expuesto son la remoción de la pata de cemento superficial en su estado plástico y el tratamiento mecánico después de endurecido. A continuación, se describen varios tipos de acabados de grano expuesto:

- Cepillado y lavado.

Este acabado superficial se obtiene al quitar la pasta de cemento superficial mientras aun es plástica lo que permite dejar expuesto el agregado grueso. Comúnmente suele emplearse en superficies horizontales, aunque también puede ser utilizado en superficies horizontales. **Figura 8.**



Figura 8. Acabado de concreto arquitectónico con la técnica de cepillado

- Acabado grabado con ácido.

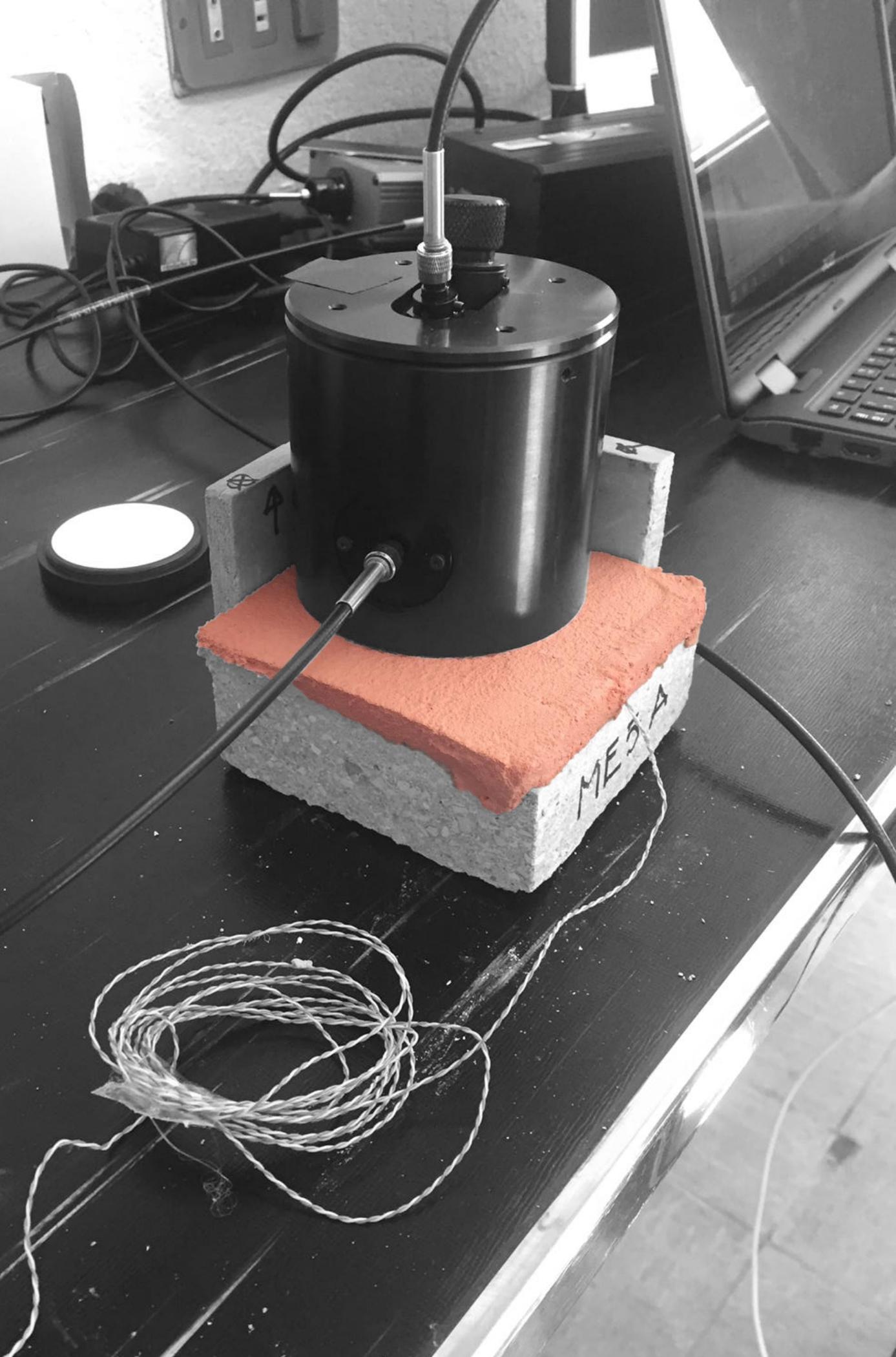
El lavado con ácido es un tratamiento químico al que se somete una superficie de concreto para lograr un acabado de tipo indirecto, los materiales expuestos son principalmente cemento, arena y un pequeño porcentaje de agregados gruesos visibles.

El lavado con ácido disuelve la pasta superficial de cemento exponiendo la arena y un mínimo porcentaje del agregado grueso. Generalmente, se emplea para exposiciones ligeras o medianas, logrando un aspecto arenoso parecido al de la piedra caliza. **Figura 9.**



Figura 9. Superficie tratada con ácido muriático.

Medición de reflectancia difusa.
Espectrómetro StellarNet y Esfera
integrador Ocean Optics
Flor Sánchez



Propiedades de los materiales

03

La RAE², define a un material como “f. materia física diferenciada de las demás por una serie de propiedades determinadas” y a propiedad como “f. Atributo o cualidad esencial de alguien o algo”.

Por otra parte, la ciencia en ingeniería de materiales define que un material las propiedades de un material son sus características particulares en términos de tipo y magnitud de respuesta a un estímulo específico impuesto, estas suelen ser independientes de la forma y tamaño del material (William & Callister, 1995).

Según Callister, las propiedades de los materiales sólidos más importantes se pueden categorizar en seis: Mecánicas, Eléctricas, Térmicas, Magnéticas, Ópticas y Químicas, cada una de estas propiedades se pondrán en manifiesto ante un estímulo en específico.

1. Propiedades Mecánicas: describen la forma en que el material responde a una fuerza aplicada. (ej. Modulo elástico, resistencia)
2. Propiedades Eléctricas: son las que determinan el comportamiento de un material ante un campo eléctrico. (ej. Conductividad eléctrica, constante dieléctrica)
3. Propiedades Térmicas: se manifiestan en función a flujos de calor, o a cambios de temperatura. (ej. Conductividad térmica, capacidad calorífica)
4. Propiedades Magnéticas: corresponden a la respuesta del material frente a la influencia de un campo magnético.

² La Real Academia Española. Institución lingüística dedicada a la regularización y promulgación de normativas.

5. Propiedades Ópticas: son la respuesta a campos electromagnéticos, el estímulo es la radiación electromagnética. (ej. Índice de refracción, reflectividad)
6. Propiedades Químicas: son la respuesta a la presencia de reactivos en determinadas condiciones ambientales y las propiedades de dispersión de partículas son la respuesta al impacto en función de la estructura del material.

Debido a la naturaleza de la investigación se basa en materiales termocrómicos en donde interactúan la radiación electromagnética y flujos de calor para producir el fenómeno, a continuación, se profundizarán en las propiedades ópticas.

3.1

Propiedades Ópticas

Se relacionan con la interrelación entre un material y las radiaciones electromagnéticas en forma de ondas o partículas de energía, conocidas como fotones. Estas radiaciones pueden tener características que entren en nuestro espectro de luz visible, o ser invisibles para el ojo humano.

Es importante mencionar que para el estudio de estas propiedades es la rama de la física denominada óptica la encargada de estudiar los fenómenos relacionados con la propagación de la radiación electromagnética en un rango determinado del espectro, denominado rango de frecuencias ópticas (González Gómez, 2006).

Para poder comprender estos fenómenos es importante comenzar con definir conceptos básicos que habrán de mencionarse reiteradas veces a lo largo de la investigación, como lo es el espectro electromagnético y rangos que en él intervienen.

3.1.1 Radiación Electromagnética. Espectro

La luz es una manifestación de la energía y está asociada a la radiación electromagnética que se encuentra en todo el universo y se describe como un campo electromagnético (con descripción ondulatoria) o como fotones (con descripción como partícula), tanto ondas como fotones se desplazan en el espacio a la velocidad de la luz.

Todos estamos familiarizados y estamos en continuo contacto con la radiación electromagnética: cuando observamos una noche estrellada o caminamos durante el día, todo lo que vemos con nuestros ojos, el calor del sol en nuestra piel, la comunicación con nuestros amigos por el celular, cuando escuchamos la radio FM o cuando calentamos la comida en el horno de microondas, son situaciones donde la radiación electromagnética está jugando una parte importante y afectando nuestras vidas.

Las radiaciones electromagnéticas son aquellas que no implican el desplazamiento de ninguna masa, ya que lo que transportan son fotones. Se trata de fenómenos ondulatorios, y todos ellos obedecen las mismas leyes físicas, pudiendo describirse en función de dos parámetros: longitud de onda (λ) y frecuencia (ν). Cuanto menor es la longitud de onda, mayor es la frecuencia, y con ella, la energía de la radiación (Fontal et al., 2005).

Las radiaciones electromagnéticas pueden clasificarse, de mayor a menor energía, en tres grandes grupos: radiaciones ionizantes, radiaciones ópticas y campos electromagnéticos (Pérez Calvo, 2002). Cada una de estas zonas del espectro, se divide a su vez en otras menores, ver Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación del espectro electromagnético en zonas.

Campos electromagnéticos			Radiación óptica			Radiación ionizante		
Por debajo de RF	Radio frecuencia	Microondas	Ultra violeta	Visible	Infrarrojo	Rayos X	Rayos γ	Rayos cósmicos

La luz y radiación que hemos mencionado forman parte de un rango muy amplio, que no tiene límite inferior o superior, denominado el Espectro Electromagnético. Este espectro se ha dividido en diferentes regiones, en

el cual se utilizan dos parámetros comunes para referirse al espectro electromagnético: frecuencia y longitud de onda. **Figura 10.**



Figura 10. Espectro electromagnético.

3.2

Interacción de la luz con los sólidos

Cuando la luz pasa de un medio a otro pueden ocurrir varios fenómenos, una parte de ella se transmite a través del medio, parte es absorbida y parte se refleja, la intensidad de la luz (I_0) que incide sobre la superficie del medio sólido debe ser igual a la suma de las intensidades de los haces transmitidos (I_t), absorbidos (I_A) y reflejados (I_R) (William & Callister, 1995). **Figura 11.**

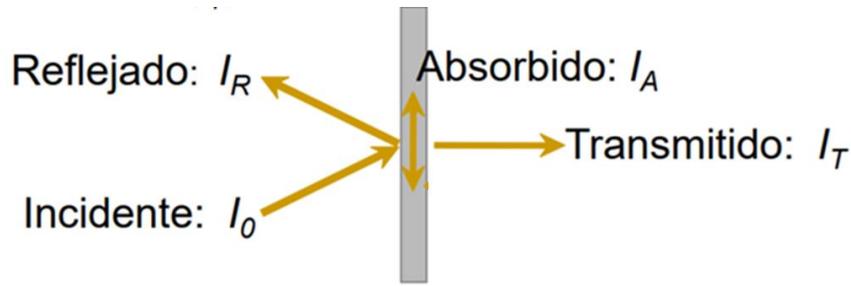


Figura 11. Interacción de la luz con la materia. Propiedades ópticas

De forma general podemos explicar estos fenómenos mediante el aspecto que nosotros podemos observar los diferentes materiales; los materiales capaces de transmitir la luz con relativamente poca absorción y reflexión se denominan transparentes, razón por la cual podemos ver a través de ellos.

Mientras tanto aquellos que si dejan pasar parcialmente la luz y esta se dispersa en su interior se denomina translúcidos, en este material los objetos no se distinguen claramente, sin embargo, aquellos materiales en el que no se transmiten la luz visible se denominan opacos. **Figura 12.**

Las apariencias observadas suceden a consecuencia de los fenómenos de refracción, reflexión y absorción, los cuales se describirán a continuación.



Figura 12. Clasificación de cuerpos iluminados

3.2.1 Refracción

La refracción de una onda es la flexión que sufre cuando entra en un medio con velocidad de propagación diferente, la refracción de la luz, cuando pasa de un medio de propagación rápido a otro más lento, dobla el rayo de luz en dirección a la normal a la superficie de contacto entre ambos medios. **Figura 12.**

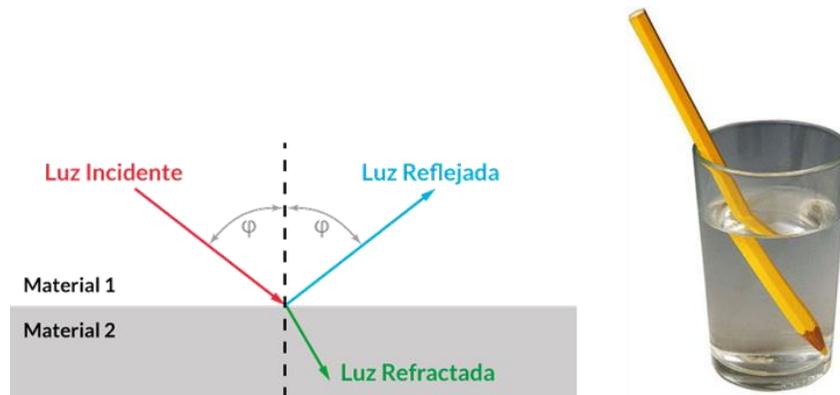


Figura 13. Refracción de la luz

La cantidad de difracción depende de los índices de refracción de los dos medios y se describe cuantitativamente por la ley de Snell.

3.2.1 Reflexión

Reflexión de la luz es el cambio de dirección que experimenta la luz cuando choca con un objeto y "rebota", este efecto hace posible que veamos objetos que no emiten luz propia. Según las superficies en que incidan los rayos luminosos, la reflexión puede ser especular o difusa. **Figura 13.**

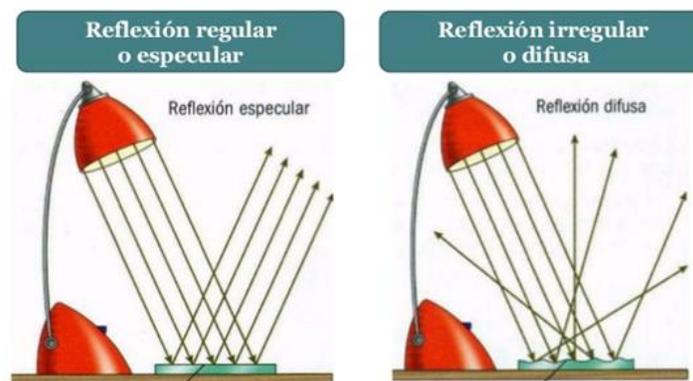


Figura 14. Reflexión especular y difusa

- Reflexión especular: “especular” significa como espejo, cuando los rayos inciden sobre una superficie lisa, los rayos serán paralelos entre sí, el resultado de la reflexión especular es la formación de una imagen clara del objeto.
- Reflexión difusa: cuando los rayos inciden sobre una superficie irregular, los rayos reflejados por la superficie no serán paralelos, el resultado será una imagen borrosa.

3.2.1 Absorción (óptica)

Este fenómeno se realiza cuando la luz incide sobre un cuerpo, el cual absorbe total o parcialmente una parte de la radiación en el espectro electromagnético y refleja una determinada longitud de onda, que constituye el color.

Todos los materiales absorben en algún rango de frecuencia electromagnética, cuando la absorción se produce en el espectro visible³, se denomina radiación óptica. La radiación recibida por el material al ser absorbida, puede ser reemitida o bien transformarse en otro tipo de energía, como calor o energía eléctrica.

La absorción parcial es uno de los factores que determinan si el objeto que vemos es negro, blanco, rojo o verde; mientras que la absorción selectiva determina los colores de objeto en función de que longitudes de onda absorbe y cuáles no. **Figura 15.**

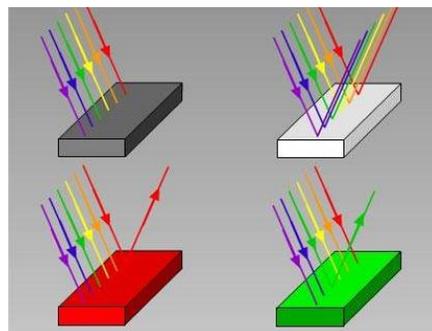


Figura 15. Fenómeno de absorción y reflexión, el color de los materiales

³ El espectro visible de luz es el espectro de radiación electromagnética que es visible para el ojo humano. Va desde una longitud de onda de 400 nm hasta 700 nm.

Las componentes reflejadas son las que determinan el color que percibimos. Los objetos negros absorben todas las longitudes de onda visible (convertidas en calor) mientras que un material blanco las reflejará todos los rayos de luz que llegan, es decir no absorben energía.

3.3

El color

El color de los objetos se transmite por el espacio mediante ondas, al igual que el sonido o el calor. Estas ondas lumínicas son recibidas por el ojo, que es el encargado de traducir el estímulo para que el cerebro procese la información y la identifique como sensación de color.

Los objetos o cuerpos transmiten la sensación de color debido a las propiedades químicas y físicas de su superficie. Lo que determina el color de un objeto es el resultado de las longitudes de onda que rebotan en este, en otras palabras, es el color que no es capaz de absorber.

Se ve blanco cuando un objeto refleja toda la luz, negro cuando la absorbe toda y, por ejemplo, se percibe azul cuando absorbe todas las longitudes de onda excepto la corta (que corresponde al color azul). **Figura 16.**



Figura 16. La óptica de color

Como hemos señalado, el ojo humano solo es sensible a una estrecha gama de frecuencias de espectro electromagnético correspondientes a las ondas comprendidas en rango o espectro visible que va de 400 a 700 nm.

A pesar que el espectro es continuo y por lo tanto no hay cantidades vacías entre uno y otro color, los rangos anteriores podrían ser usados como una aproximación son los siguientes. **Figura 17.**

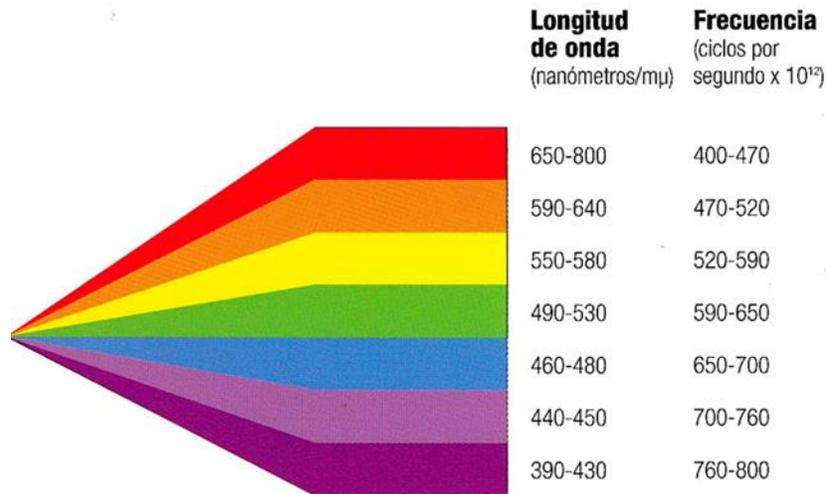


Figura 17. Colores del espectro

Aunque la sensibilidad a la luz varía de una persona a otra, en el espectro de frecuencias visibles tenemos una gran capacidad de discriminación, en este rango podemos distinguir unos 10 millones de colores distintos (Lossada, 2012).

En realidad, el ojo tiene una mayor sensibilidad cromática para los colores extremos del espectro (especialmente rojos, azules y morados), de forma que tiene más capacidad para distinguir diferencias de color en estos que en los centrales, sin embargo, estos últimos (verdes y amarillos) tienen valores máximos de saturación, es decir, son percibidos como más brillantes y luminosos.

La comunicación del color puede ser algo muy subjetivo, como solución a este problema se crearon los sistemas de medición de color; los sistemas colorimétricos de evaluación usados tradicionalmente, se apoyan en catálogos de colores derivados del sólido de color por subdivisión de sus escalas (catálogo de Munsell, cartas de colores como el RAL, escalas cromáticas, etc) y su fundamento es la comparación de colores por medio de la percepción visual (Gárate Rojas, 1994).

Debido a las limitaciones que los sistemas colorimétricos enfrentan, la utilización de la espectrofotometría como técnica de estudio del color, permite la obtención de espectros únicos característicos de cada muestra.

3.3.1 Espectroscopia de UV-Vis

Espectroscopia ultravioleta-visible (UV-Vis) es uno de las más populares técnicas analíticas porque es muy versátil, mide la cantidad de luz reflejada por una superficie en función de las longitudes de onda para crear un espectro característico.

El funcionamiento de un espectrofotómetro de reflectancia se basa en iluminar la muestra con luz blanca y analizar la cantidad de luz que la muestra refleja en una serie de intervalos de longitudes de onda. **Figura 18.** Los datos frecuentemente se muestran en forma de gráfica de la longitud de onda (nm o cm^{-1}) en función de la reflectancia expresada en fracción entre 0 y 1, o como un porcentaje entre 0 y 100.

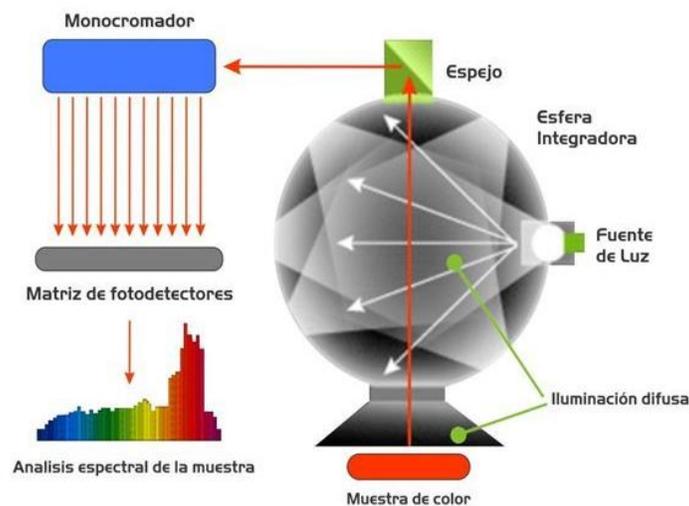


Figura 18. Funcionamiento de un espectrofotómetro de reflectancia

El color que presenta un material es el resultado de la combinación de la absorción (o reflexión) de radiación en cada una de las bandas de color del espectro visible, así, cualquier material tiene un espectro característico que nos indica la radiación que absorbe o refleja a una determinada longitud de onda de la radiación incidente.

3.3.1 El Espacio de Color CIE $L^*a^*b^*$

La organización internacional de luz y color CIE (Commission Internationale de L'Eclairage) desarrolló dos importantes sistemas para la evaluación de color en términos de números basados en la medición de reflectancia espectral de la muestra.

El primer sistema de medición CIE 1931, se basaba en el concepto de los valores triestímulo está basado en la teoría de los tres componentes de color que establece que el ojo humano posee receptores de los tres colores primarios: rojo, azul y verde; y todos los colores son mezclas que se derivan de ellos.

Más tarde en 1976, se estableció el sistema de espacio de color CIE $L^*a^*b^*$, para comunicar y expresar el color objetivamente, cuando se clasifican los colores, se los puede expresar en términos de matiz (color), luminosidad (brillo) y saturación (vividez). Al crear escalas para éstos atributos, podemos expresar en forma precisa el color.

El espacio de color $L^*a^*b^*$ fue modelado en base a una teoría de color oponente que establece que dos colores no pueden ser rojo y verde al mismo tiempo o amarillo y azul al mismo tiempo. Como se muestra a continuación, L^* indica la luminosidad y a^* y b^* son las coordenadas cromáticas. **Figura 19.**

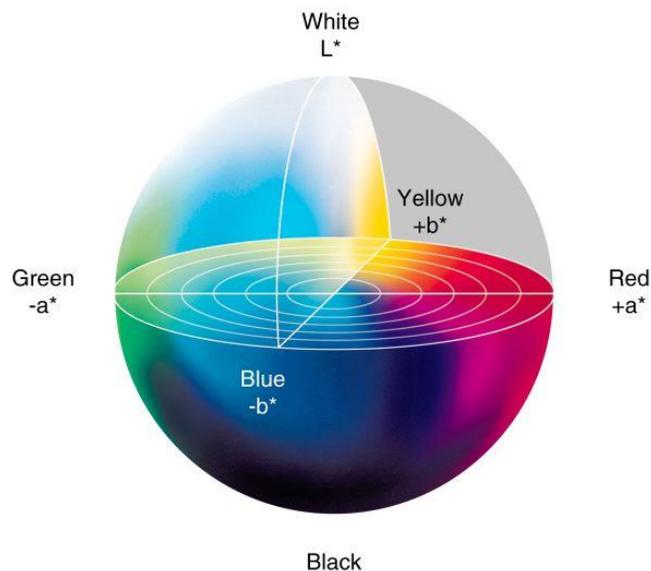


Figura 19. Diagrama de espacios de color (L^* , a^* , b^*).

En donde:

L^* =luminosidad

a^* = coordenadas rojo/verde (+a indica rojo, -a indica verde)

b^* = coordenadas amarillo/azul (+b indica amarillo, -b indica azul)

Para la aplicación de estos sistemas de medición de color la CIE se consideró diferentes tipos de iluminantes ya que cada fuente de luz viene caracterizada por la energía que emite en las diferentes longitudes de onda, los más comunes son:

- Iluminante A: Luz incandescente con una temperatura de color de 2 854 K (kelvin). (lámpara de tungsteno).
- Iluminante C: Luz solar de día (promedio) con una temperatura de color de 6 774 K, no incluye la radiación ultravioleta.
- Iluminante D65: Luz solar de día (promedio) con una temperatura de color de 6 504 K, incluye la radiación ultravioleta.

El espacio CIELab es actualmente uno de los espacios de color más populares y uniformes usado para evaluar el color de un objeto. Este espacio de color es ampliamente usado porque correlaciona los valores numéricos de color consistentemente con la percepción visual humana. Investigadores y fabricantes lo usan para evaluar los atributos de color, identificar inconsistencias, y expresar precisamente sus resultados a otros en términos numéricos.

3.4

Propiedades térmicas

La propiedad térmica de un material se define como la respuesta que este presenta a la aplicación de calor, cuando un sólido recibe energía en forma de calor, el material absorbe calor, lo transmite y se expande. A esto se le denomina principios de transferencia de calor, en el que la energía calorífica es transferida a través de tres modelos: conducción, convección y radiación.

- **Conducción:** es la transferencia de calor a través de un material sólido.
- **Convección:** es la transferencia de energía calorífica mediante la circulación y difusión del medio calentado.
- **Radiación:** es la transferencia de energía calorífica por ondas electromagnéticas (infrarrojas) y es muy diferente a la conducción y a la convección.

Tanto en la conducción como en la convección se requiere tener un contacto directo con el material para ser calentado, a diferencia en la radiación el calentamiento infrarrojo no hay contacto directo con la fuente de calor.

3.4.1 Calentamiento por energía radiante

El término radiación se refiere a la emisión continua de energía desde la superficie de cualquier cuerpo, esta energía se denomina radiante y es transportada por las ondas electromagnéticas que viajan en el vacío a la velocidad de $3 \cdot 10^8$ m/s.

Esta energía es producida por los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas constitutivos y transportada por ondas electromagnéticas o fotones, por lo recibe el nombre de radiación electromagnética.

Todos los cuerpos con temperatura por encima del “cero absoluto” irradian energía infrarroja; los cuerpos más calientes irradian más energía que los más fríos. La radiación de energía infrarroja proveniente de un cuerpo caliente (elemento calentador) que golpea la superficie de un cuerpo más frío (pieza de trabajo), es absorbida y convertida en energía calorífica. **Figura 20.**

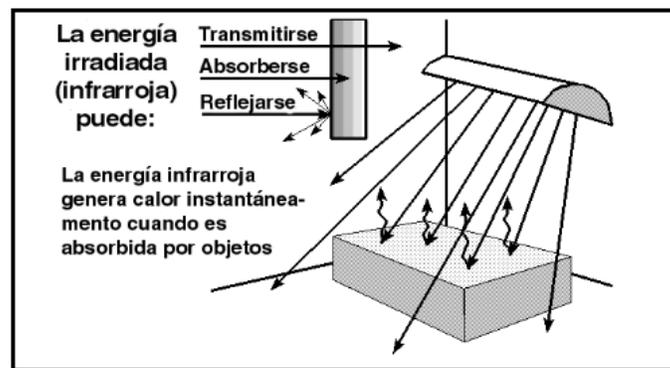
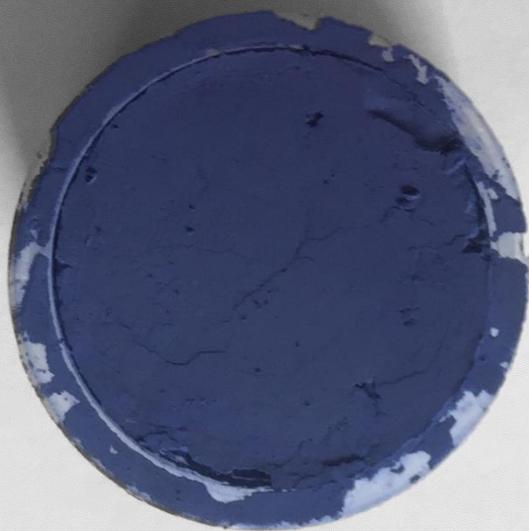
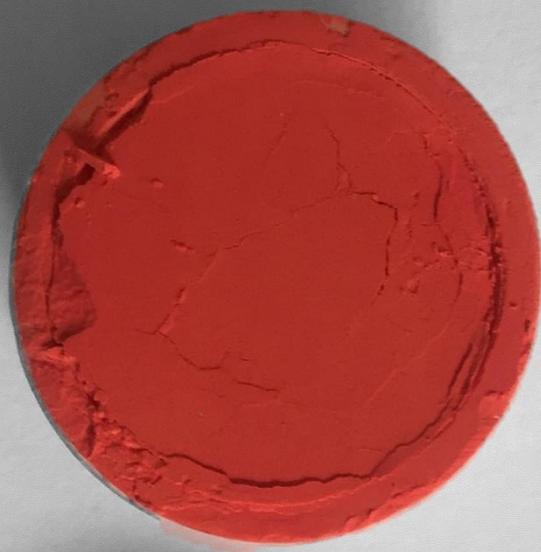


Figura 20. Transferencia de calor por radiación.

La cantidad de energía transmitida, reflejada o absorbida por un cuerpo, depende de la naturaleza del material, de la superficie y de la longitud de onda de la radiación. En realidad, no existen cuerpos totalmente permeables o impermeables. Por ejemplo, el vidrio es permeable a las radiaciones visibles, pero absorbe las infrarrojas.



Pigmentos termocrómicos comerciales

Flor Sánchez

Clasificación de los Materiales

04

Las propiedades de los materiales son el conjunto de características que hacen que el material se comporte de una manera determinada ante estímulos externos, por lo tanto, los materiales sólidos se clasifican según su estructura y propiedades en tres grandes grupos: metálicos, cerámicos, poliméricos, además existen otros dos grupos de importantes materiales técnicos: materiales compuestos y semiconductores (William & Callister, 1995). Los materiales de cada uno de estos grupos poseen distintas estructuras, propiedades y características determinadas.

Sin embargo, existen otras particularidades por las que se pueden realizar otras clasificaciones, según sus componentes, enlace, disposición de componentes o funcionalidad. Una clasificación funcional de los materiales puede ser de gran utilidad; estos pueden dividirse si su función más importante es mecánica, biológica, eléctrica, magnética u óptica (Askeland, 2005). Según Askeland la clasificación funcional se divide en las siguientes categorías. **Figura 21.**

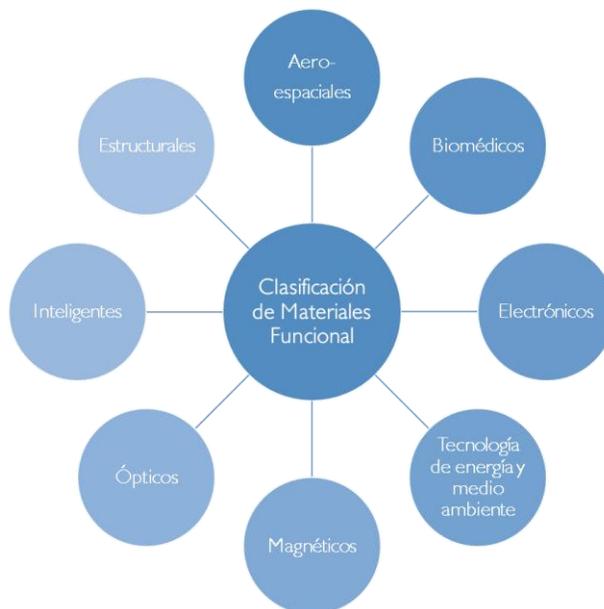


Figura 21. Clasificación funcional de materiales. Askeland 2005

4.1

Materiales Inteligentes

Todos nosotros reaccionamos ante el mundo que nos rodea como “sensores” cuando oímos, vemos o sentimos, y como “actuadores” cuando reaccionamos a esos estímulos. Con el devenir de los años, la investigación tomó el camino de intentar dotar de una capacidad de reacción similar a los materiales, convirtiéndolos en “inteligentes”.

Los materiales inteligentes, también denominados materiales activos o materiales multifuncionales, son aquellos que manifiestan un cambio en sus propiedades o en su forma como respuesta a los estímulos del entorno en el que se encuentran. Estos estímulos externos (físicos o químicos) pueden ser tales como la presión, temperatura, humedad, pH, campos eléctricos o magnéticos, etc.

Los materiales inteligentes y sobre todo las estructuras inteligentes son sistemas complejos que contienen tanto componentes activos como pasivos. La respuesta del sistema normalmente es una combinación de las características de los componentes activos y pasivos (Lopez, Carnicero, & Ruíz, 2004).

Si bien es complejo definirlos, más complejo es intentar clasificarlos; ya que la línea que separa las diversas familias de materiales no siempre tiene el mismo grosor y no todos los expertos coinciden en cuáles deben ser los materiales que se incluyen en la clase de los inteligentes. En la tabla 2 se muestra su clasificación de los mismos, diferenciando entre sensores.

Tabla 2. Clasificación de materiales inteligentes en función de estímulo y respuesta (sensores)

	MATERIALES	ESTÍMULO	RESPUESTA	
SENSORES	Fotoactivos	Electroluminiscentes	Campo Eléctrico	
		Fotoluminiscentes	Luz	
		Quimioluminiscentes	Estímulo químico	
		Termoluminiscentes	Temperatura	
	Cromoactivos	Electrocromicos	Campo Eléctrico	
		Termocrómico	Temperatura	
		Fotocrómico	Luz	
		Quimiocromicos	Estímulo químico	
	Materiales bioactivos		Temperatura, luz, campo eléctrico	Varias
	Magnetostrictivos		Deformación mecánica Campo Magnético/Eléctrico	Campo Magnético/Eléctrico Deformación mecánica
Electrostrictivos		Deformación mecánica	Polarización eléctrica	
Electrocerámicas		Deformación mecánica Corriente eléctrica	Corriente eléctrica Deformación mecánica	
Polímeros electroactivos		Deformación mecánica	Polarización eléctrica	
Piroeléctricos		Temperatura	Polarización eléctrica	

4.2

Materiales Cromoactivos

Los materiales cromoactivos responden con un cambio de color ante un estímulo externo. El fenómeno de esta transformación se clasifica y se nombra en función del estímulo que causa. A continuación, se describen los materiales con los fenómenos más comunes y extendidos:

- Electrocrómicos.

Son aquellos que modifican su espectro de absorción y, generalmente, de color, al cambiar su estado de oxidación por la aplicación de una diferencia de potencial externa. Entre sus aplicaciones se tienen las siguientes: automoción espejos retrovisores antideslumbrantes, ventanas inteligentes y pantallas.

- Termocrómicos.

Son aquellos que cambian de color con la temperatura. Permiten seleccionar el color y el intervalo de temperaturas, permitiendo un abanico

muy amplio de aplicaciones. Además, pueden ser reversibles o cambiar de color permanentemente con el incremento de temperatura en función del pigmento que se incorpore. Normalmente son materiales de naturaleza semiconductor. Entre sus aplicaciones se incluyen las siguientes: señalización etiquetado/control temperatura-cadena frío, seguridad tuberías y conducciones, elementos peligrosos, entre otros, artículos de hogar envases microondas, sartenes, placas calefactoras, vasos, jarras, entre otros, juguetería cromos que al frotar muestran una imagen, pinturas, textiles y arquitectura.

- Quimiocrómicos.

Los materiales que presentan efecto quimio-crómico son aquellos que manifiestan un cambio de color frente a estímulos químicos como el cambio de polaridad, pH o la presencia de iones metálicos. Generalmente se clasifican en función del fenómeno que induce el cambio de color (solvatocromismo, ionocromismo, halocromismo, etc.). Estos materiales se emplean en el uso en superficies expuestas a la sustancia contaminante a detectar y entran dentro de la familia de sensores colorímetros.

- Fotocrómicos.

Son aquellos que, al incidir la luz solar u otra con un elevado componente ultravioleta sobre ellos, cambian de forma reversible su color. Estos materiales no se ven en la oscuridad. Entre sus aplicaciones se cuentan las siguientes: seguridad tinta invisible, detección de documentos, publicidad carteles, camisetas, zapatos, cordones, bolsos, folletos, entre otros y óptica (lentes).

Habiendo descrito los diferentes tipos de materiales cromoactivos nos enfocaremos en describir las características, propiedades y funcionamiento de los materiales termocrómicos comerciales, específicamente cristales líquidos termocrómicos y mezclas termocromicas orgánicas.

4.3

Materiales termocrómicos

La primera investigación sistemática de los sistemas reversibles termocrómicos de sólido inorgánicos, se publicó en 1871 (Houston, 1871). Pero no fue hasta la década de los 60 cuando los materiales termocrómicos comenzaron a investigarse de una manera continuada en los laboratorios, con novedosas técnicas que no se habían utilizado hasta ese momento.

En lugar de utilizar una corriente eléctrica para controlar el tipo de estructura cristalina, se empezó a utilizar calor, que cambiaba el equilibrio de separación entre las láminas alineadas de las moléculas. Esto influía en las longitudes de onda de la luz fuertemente difractada, y por lo tanto en el color percibido del material.

Contener y proteger los cristales líquidos fue lo más complicado, pero tan pronto como llegó la microencapsulación, proceso por el cual las micropartículas en estado sólido, líquido o gas se recubren de una pared micrométrica hecha de película soluble, dura o blanda, con el fin de reducir la frecuencia de dosificación y evitar la degradación de los productos (C., Deladino, Alba, & Miriam, 2011), la tecnología despegó, y una gama de tintas termocrómicas hicieron posible pigmentos que cambiaban de color.

Este descubrimiento, inició un fuerte interés por la termocromía y pronto diferentes familias de moléculas se adaptaron para exhibir la propiedad del cambio de color, entre ellas, destacan los tintes leuco.

4.3.1 Cristales líquidos termocrómicos

Un cristal líquido es un tipo especial de estado de agregación de la materia que tiene propiedades de las fases líquida y sólida. La principal característica de estos compuestos es que sus moléculas son altamente anisótropas, es decir, sus cualidades más relevantes como la elasticidad, la temperatura, la conductividad, la velocidad de propagación de la luz, etc. varían según la dirección en que son examinadas.

Los cristales líquidos tienen una orientación a largo alcance, pero posiciones ordenadas a corto alcance (Martínez Riachi, Carreño, Constable, Tarabaín, & Freites, 2005). Estos muestran los diferentes colores al reflejar selectivamente la luz blanca que incide sobre ellos. Las mezclas convencionales sensibles a la temperatura, en películas delgadas, reflejan colores brillantes, casi puros.

Éstos se convierten desde negro (incolores) hasta el rojo, con una determinada temperatura, y a medida que aumenta ésta, cambian hacia los demás colores del espectro visible con la siguiente secuencia: naranja, amarillo, verde, azul, violeta; antes de volverse incoloro o negro de nuevo, a una temperatura aún más alta. Los cambios de color son reversibles y en el enfriamiento produce la misma secuencia, pero a la inversa. A continuación, se muestra los tipos de cristales termocrómicos. **Figura 22.**

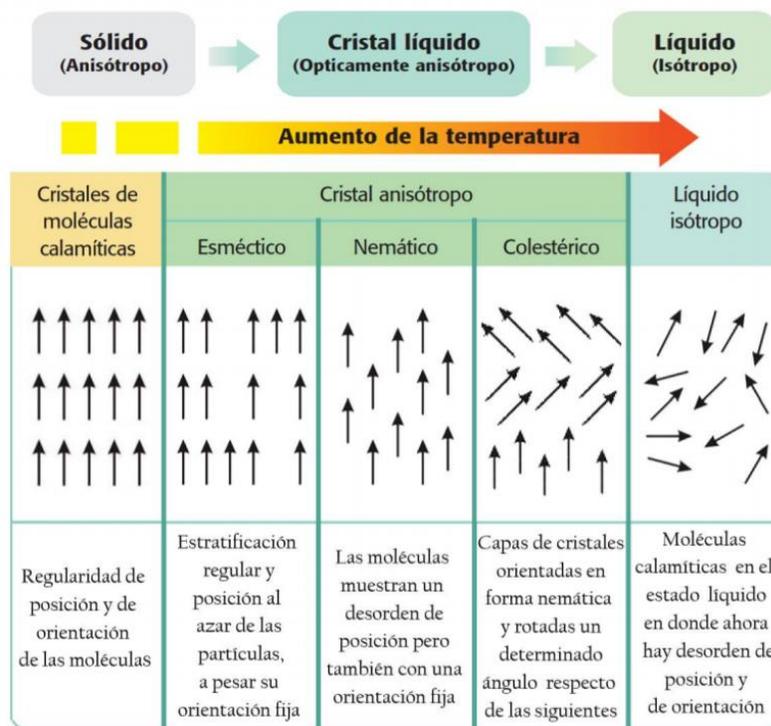


Figura 22. Tipos de cristales líquidos termocrómicos.

Algunas de las aplicaciones de los cristales líquidos en elementos cotidianos, podemos encontrarlos en Monitores monocromáticos LCD, Monitores color LCD, Calculadoras, Termómetros, etc.

4.3.2 Mezclas termocrómicas orgánicas

La otra categoría principal de materiales utilizados para impartir colores que cambian con la temperatura, especialmente para textiles y otros productos comerciales, involucra tintes orgánicos.

Un tinte se puede definir como una estructura, generalmente orgánica, que está diseñada para ser absorbida o adsorbida por, hecha para reaccionar o depositada dentro de un sustrato para impartir color a ese sustrato (“Kirk-Othmer Encycl. Chem. Technol.,” 2000).

En el caso de las mezclas de colorantes orgánicos termocrómicos, se requieren al menos dos componentes químicos para lograr colores que cambian con la temperatura.

- **El tinte**

Estos usualmente son tintes leuco ("tintes blancos") para indicar que, en algunas condiciones, son incoloros. Son más comúnmente espirolactonas como fluoranos o cristal violeta lactona, espiropiranos o fulgidas (Aitken, Burkinshaw, Griffiths, & Towns, 1996). **Figura 23.**

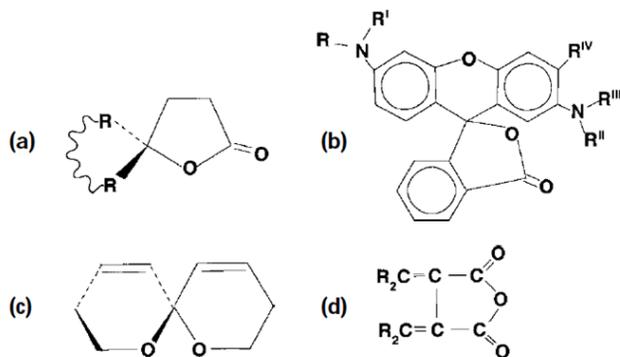


Figura 23. Los tintes leuco típicos incluyen (a) espirolactonas, (b) fluoranos, (c) espiropirano y (d) fulgidas.

Estrictamente hablando, estos tintes no son termocrómicos sino que cambian de color con un cambio en el pH, cuando la solución se hace más alcalina, el compuesto se vuelve incoloro. La posición de este equilibrio se puede cambiar con la temperatura cuando otros componentes están presentes. Este componente de tinte determina el color del producto final en su estado de color.

- El desarrollador de color

Estos materiales a menudo se denominan "aceptadores de electrones", pero se describen con mayor precisión como donantes de protones que pueden afectar el equilibrio. **Figura 24.**

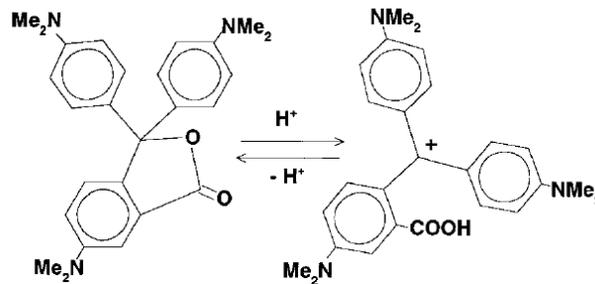


Figura 24. Cristal violeta lactona. En la forma de lactona es incolora, pero está profundamente coloreada cuando está protonada (forma de anillo abierto)

Los principales reveladores de color son los ácidos débiles imparten el cambio de color reversible a la mezcla, pero los ácidos más fuertes conducen a un cambio de color irreversible. Este componente imparte el cambio de color reversible al material termocrómico y es responsable de la intensidad del color del producto final.

- El Solvente

Un tercer componente es generalmente un solvente polar como un alcohol, éster, cetona, en las mezclas orgánicas se prefieren los alcoholes y los ésteres debido a su baja volatilidad y su amplia gama de aplicaciones, el punto de fusión de este tercer componente controla la temperatura a la que tendrá lugar el cambio de color.

4.3.3 Aplicaciones

Cuando hablamos de las tendencias y aplicaciones de los materiales termocrómicos en productos comerciales, estos han tenido un desarrollo significativo en el ámbito del diseño industrial y gráfico a continuación se presenta algunos ejemplos representativos de productos que existen en el mercado que han implementado este fenómeno.

Dentro del mundo del packaging, el recurso de utilizar tinta termocromática ofrece interesantes opciones, ciertas tendencias de estas tintas (y barnices)

interesantes en el mundo del packaging tanto con fines puramente estéticos (llamar la atención en los lineales, marketing sensorial, etc.) como con otros mucho más funcionales como prolongar la vida del producto, evitar su degradación prematura, prolongar la cadena de frío, evitar la oxidación temprana, etc. Un ejemplo son las etiquetas diseñadas para bebidas cuya presentación se puede ver una presentación diferente según ésta se enfría o calienta. **Figura 25.**



Figura 25. Tinta termocromático aplicada al packaging

Otro ejemplo es el proyecto editorial Power del diseñador catalán Guillem Casasús⁴. Este se vale de la tinta termocrómica como un recurso que revela ‘la verdad’ que muchas veces permanece oculta en torno a la información que se nos ofrece sobre los conflictos bélicos en la lucha por el control de los recursos energéticos. **Figura 26.**



Figura 26. Power Magazine. Guillem Casasús

⁴ Director de arte y diseñador gráfico, ha sido galardonado con algunos Laus oro, plata y bronce, y el club de directores de arte de bronce de Europa, colaborando con compañías como Mucho y Clasebcn, actualmente en SCPF como director de arte.

Estos materiales se usan cada vez más, fundamentalmente en artículos de señalización (etiquetado/control de temperatura), artículos del hogar (envases para microondas, sartenes, placas calefactoras, tazas, etc.) y juguetería. **Figura 27.**



Figura 27. Tazas mágicas, productos termocromáticos comerciales

En el caso de los materiales termocrómicos en elementos arquitectónicos, se ha logrado un importante desarrollo en el acristalamiento con dispositivos basados en películas delgadas de dióxido de vanadio que permiten que pase menos energía solar a través del acristalamiento a alta temperatura que a baja temperatura, logrando así un confort interior con menor consumo de energía. **Figura 28.**



Figura 28. Cristales termocrómicos. Películas delgadas de dióxido de vanadio

En cuanto a revestimientos termocrómicos, los más cercanos a su uso ha sido la pintura termocrómica con el fin de mejorar la eficiencia energética y compararla con otras pinturas, sin embargo, no se ha encontrado de manera comercial para su uso en la construcción, si no meros estudios que a continuación se mencionan.

“Development and testing of thermochromic coatings for buildings and urban structures” llevado a cabo en el 2009, por T. Ksarlessi & otros, compara las propiedades de pinturas termocrómicas con y sin dióxido de titanio, pinturas frías y pinturas convencionales, el análisis comparativo del comportamiento óptico de la pintura termocrómica y el espectro de reflectancia medido indican que pueden absorber mayor radiación solar a bajas temperaturas y reducir la absorción a temperaturas altas, en el mismo sentido la pintura termocrómica y en la fase de color y de decoloración muestra siempre una reflectancia solar mayor que el resto de la analizadas (Ksarlessi, Santamouris, Apostolakis, Synnefa, & Livada, 2009).



Incorporación pigmento
termocrómico F1 y
agregados
Flor Sánchez

Desarrollo Experimental

05

Se investigan las capacidades del mortero termocrómico a base de pigmentos orgánicos, el cual será sometido a una serie de experimentos para conocer sus propiedades ópticas y térmicas. Dichas propiedades resultan de interés con el objetivo de validar o rechazar la hipótesis.

5.1

Método Experimental

A continuación, se describe el procedimiento experimental empleado para la realización de la investigación.

- Caracterización de la microestructura y composición de los pigmentos termocrómicos

Mediante la aplicación de las técnicas de caracterización, nos permitirá obtener información referente a composición, morfología y propiedades ópticas a partir de la respuesta de la muestra al ser perturbado por diversas señales.

Se plantea realizar este estudio específico a los pigmentos con la finalidad de conocer las propiedades del material y así valorar la viabilidad de poderse incorporar a una mezcla cementante. Debido a que estos materiales actualmente son usados en el sector de fabricación de pinturas, tintas y plásticos.

- Dosificación de la mezcla y elaboración probetas

Después de conocer las características y propiedades de los pigmentos se incorporarán en una mezcla base cemento bajo las regulaciones del procedimiento para la elaboración establecidos por la norma UNE-EN 12878. Pigmentos para la coloración de materiales de construcción fabricados a partir de cemento y/o cal).

- Evaluación de las propiedades ópticas del material

Se llevarán a cabo la evaluación de las propiedades ópticas mediante la técnica de Espectroscopia UV-Visible, en modo reflectancia difusa, la cual nos permitirá evaluar los cambios de color asociados con la transición de cambio de temperatura en un ambiente controlado, cambios continuos de temperatura. Esto con la finalidad de garantizar que la incorporación de los pigmentos dentro de la mezcla presente un cambio óptico dinámico asociado a las características propias de los pigmentos, para su incorporación en un elemento arquitectónico.

Los procedimientos de experimentación y los instrumentos de medición utilizados para la obtención de la reflectancia difusa se basan en la regulación y parámetros designados por la norma ASTM E 903-96. Absorción solar, reflectancia y transmitancia de materiales usando esferas de integración.

- Evaluación del comportamiento térmico superficial del material.

Se evaluará la temperatura superficial de las muestras expuestas en un ambiente exterior, con la finalidad de conocer el comportamiento del material y la influencia de la incorporación de los pigmentos en su comportamiento térmico, con respecto a un material con propiedades ópticas fijas.

- Análisis de resultados y conclusiones

Con base a los resultados obtenidos de las mediciones de las propiedades ópticas y térmicas del material y su comportamiento, podrá confirmar o declinar la hipótesis planteada en esta investigación, cuyo objetivo principal es el mejoramiento térmico de las envolventes arquitectónicas.

5.2

Materiales

5.2.1 Pigmentos

Pigmentos termocrómicos reversibles distribuidos por TECMA© Comercializadora S.A. de C.V. con ubicación física en la Ciudad de México; fabricados en base polvo, generalmente usados en el sector de fabricación pinturas, tintas y plásticos (principalmente polipropileno clarificado), con temperatura de transición de 28 °C. **Figura 29.**

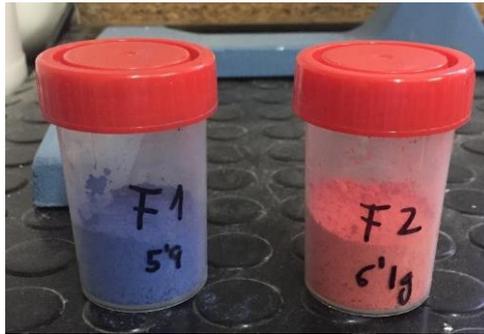


Figura 29. Pigmentos termocrómicos F1 y F2, TECMA© Comercializadora

5.2.2 Cemento

Para la elaboración del mortero se utilizó Cemento Portland blanco BLII / A-L 42.5R ordinario, el cual cumple con las especificaciones de la norma UNE-EN 197-1, producido en las instalaciones de El Alto de la empresa española Portland Valderribas. La composición de cemento se recoge en la Tabla 3, según lo determinado por fluorescencia de rayos X.

Tabla 3. Composición del cemento portland blanco

MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃
0.35	2.94	17.45	2.35	0.29	61.96	0.27

5.2.3 Agregados

Arenas: Granicarb con tamaños de partícula en el rango de 0.1–0.8 mm y Betocarb P1DA tamaño de partícula <0.6 mm, ambas proporcionados por la empresa española Omya Clariana, las cuales contiene calcita como su principal fase mineralógica.

5.2.4 Agua

El agua empleada para la elaboración de las mezclas fue agua potable de la red, que normatividad correspondiente en cuanto a la pureza requerida para su consumo según la norma agua potable requerida para su consumo según la norma agua potable es la que puede ser consumida por el ser humano gracias a que se le realiza un proceso de purificación mediante el cual se le eliminan bacterias, virus, minerales, productos tóxicos, partículas en suspensión, sustancias orgánicas y radiactividad.

5.3

Normatividad

El material propuesto se evaluarán las propiedades ópticas y térmicas para su aplicación en la Arquitectura, a través de pruebas que permitan comprobar el comportamiento del material ante valores medibles a los que pudiera estar sometido en su aplicación práctica.

Los procedimientos de experimentación y los instrumentos de medición utilizados en las pruebas para la obtención de resultados de las propiedades evaluadas se llevaron a cabo mediante las siguientes regulaciones.

UNE-EN 12878. Pigmentos para la coloración de materiales de construcción fabricados a partir de cemento y/o cal).

ASTM E 903–96. Absorción solar, reflectancia y transmitancia de materiales usando esferas de integración.

Sistema de medición CIE 1976, Espacios de color (L^* a^* b^*)

5.4

Variables

Con base a las propiedades que se evaluarán para fines de esta investigación se establecieron las siguientes variables independientes, para posterior evaluación.

1. Mortero sin pigmento
2. Mortero + pigmento termocrómico (F1)
3. Mortero + pigmento termocrómico (F2)

De las cuales evaluamos sus efectos en las variables dependientes, reflectancia difusa (ópticas) y temperatura superficial (térmicas), debido a que establece que caracterizar el comportamiento térmico en un ambiente exterior las condiciones climatológicas (temperatura y humedad relativa) serán variables a considerar.

Aplicando la Normativa UNE-EN 12878, la cual permite las siguientes desviaciones con referencia el molde debería disponer de un área de sección transversal de no menos de 30 mm por 30 mm, se pueden utilizar otros moldes apropiados en lugar del molde de acero siempre y cuando conserven la proporción de la mezcla.

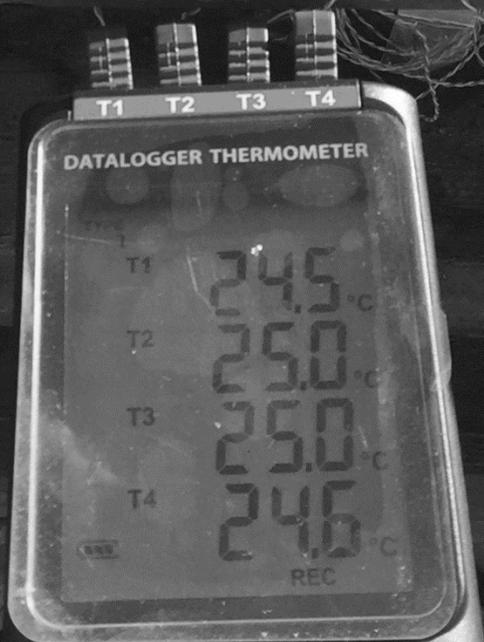
Se tendrá como base de muestreo dos tipos de probetas con diferentes dimensiones, ver Tabla 4 y 5:

Tabla 4. Probetas para análisis propiedades ópticas

Dimensiones de la muestra: paralelepípedo rectangular de 30mm de ancho, 60mm de largo y 10 mm de espesor.		
Referencia: Muestra de mortero sin pigmento	Pigmento 1: Muestra de mortero + pigmento F1 (termocrómico azul)	Pigmento 2: Muestra de mortero + pigmento F2 (termocrómico rojo)
4 muestra- Nomenclatura OP- SP	4 muestras- Nomenclatura OP-F1	4 muestras- Nomenclatura OP-F2

Tabla 5. Probetas para análisis comportamiento térmico

Dimensiones de la muestra: Recubrimiento de una pieza de concreto con dimensiones 100mm de largo y ancho y 10 mm de espesor.		
Referencia: Muestra de mortero sin pigmento	Pigmento 1: Muestra de mortero + pigmento F1 (termocrómico azul), termopar tipo K	Pigmento 2: Muestra de mortero + pigmento F2 (termocrómico rojo) , termopar tipo K
1 muestra- Nomenclatura MT-SP	1 muestras- Nomenclatura MT-F1	1 muestras- Nomenclatura MT-F2



Temperatura superficial
en ambiente exterior

Flor Sánchez

Resultados y Discusión de la etapa Experimental

06

6.1

Caracterización de los pigmentos termocrómicos

A continuación, se presenta los resultados de las propiedades de pigmentos termocrómicos distribuidos por TECMA© Comercializadora S.A. de C.V; se determinó la microestructura, la fase cristalina y las propiedades térmicas, mediante Microscopio Electrónico de Barrido (MEB), Difractómetro de rayos X (DRX), Espectrometría Infrarroja con Transformada de Fourier (FT-IR) y Análisis Termogravimétrico (TGA), con la finalidad de conocer los componentes principales que imparte el cambio de color reversible al material termocrómico.

Se plantea realizar este estudio específico a los pigmentos con la finalidad de conocer las propiedades del material y así valorar la viabilidad de poderse incorporar a una mezcla cementante. Debido a que estos materiales actualmente se comercializan para el sector de fabricación pinturas, tintas y plásticos.

6.1.1 Microscopía electrónica de barrido (MEB) / Espectrometría de dispersión de energía de rayos X (SEM-EDX)

La Microscopía electrónica de barrido es de gran utilidad para el estudio detallado de la superficie de una muestra. Un haz de electrones de alta energía explora la superficie de una muestra, generalmente recubierta con una película delgada de oro o platino para mejorar el contraste y la señal de ruido.

A medida que el haz escanea a través de la superficie de la muestra, las interacciones entre la muestra y el haz de electrones dan como resultado diferentes tipos de señales de electrones emitidas en o cerca de la superficie de la muestra (Carter & Shieh, 2010). Estas señales electrónicas se recopilan, procesan y, finalmente, se traducen como píxeles en un monitor para formar una imagen de la topografía de la superficie de la muestra que aparece en tres dimensiones.

Se observó la morfología y microestructuras de los pigmentos F1 y F2, mediante la utilización de un Microscopio electrónico de barrido (SEM, S-4800, Hitachi Inc., Japón) a un voltaje de 20kV. Las muestras fueron puestas en 25 mm Discos de aluminio y recubiertos en oro. **Figura 30.**



Figura 30. Microscopio electrónico de barrido S-4800, Hitachi Inc. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja

- **Pigmento F1**

El material presenta un patrón morfológico constante, formado por partículas de formas esférica de dimensiones variables con superficie

rugosa, ver Ilustración 31a. Algunas partículas presentan acumulación de elementos de menor dimensión adheridas en su superficie, se cree resultado de la síntesis de producción 31b. **Figura 31.**

Se observa una ruptura de una microcápsula con partículas de menor dimensión en su interior, no obstante, esta situación no se presenta de manera significativa en la muestra, ver Ilustración 31c. La morfología observada al que pertenece es congruente con la de pigmentos microencapsulados.

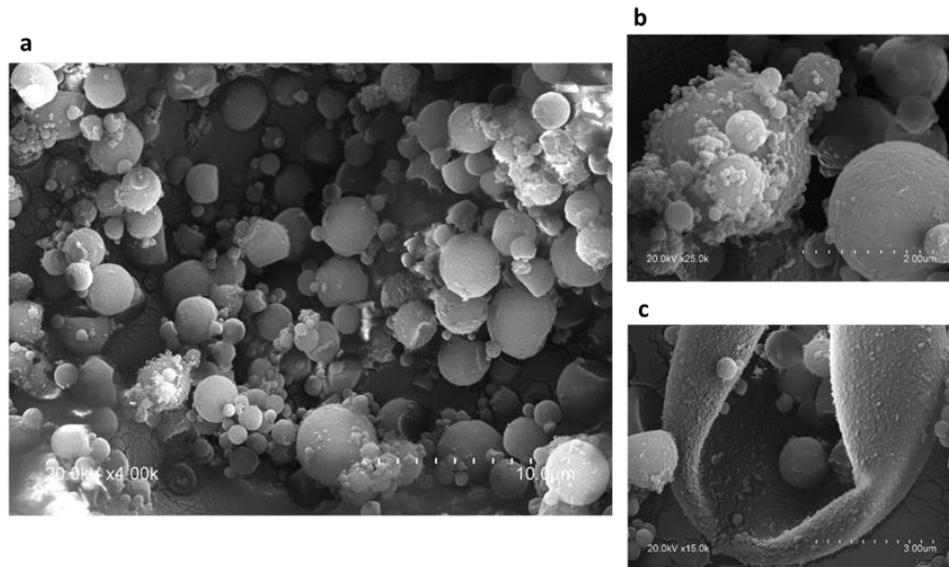


Figura 31. Fotografías Microscopio electrónico de barrido pigmento F1 (a) 4.00k, (b) 25.0k, (c) 15.0k

El análisis por EDX revela que se compone principalmente por: Carbono (C), Nitrógeno (N) y Oxígeno (O), los picos correspondientes a Oro (Au) y Aluminio (Al) pertenecen a la metalización de la muestra y el material del porta muestra. **Figura 32.**

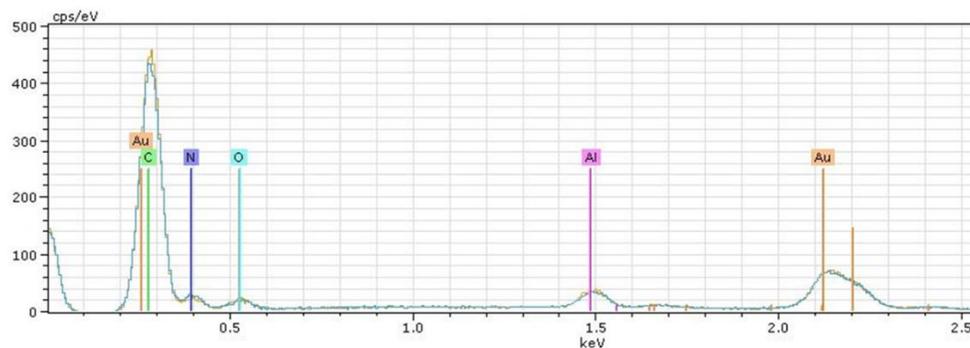


Figura 32. Espectro de EDX pigmento F1

- **Pigmento F2**

El material presenta un patrón morfológico similar al anterior, formado por partículas de formas esférica con superficie rugosa, ver Ilustración 33a. Sin embargo, se pueden observar una cantidad mayor de partículas con hundimientos en su superficie, ver Ilustración 33b. Se localizó una microcápsula en la que podemos observar las paredes que la conforman, las cuales se encuentran en un rango de +/- 200nm. **Figura 33.**

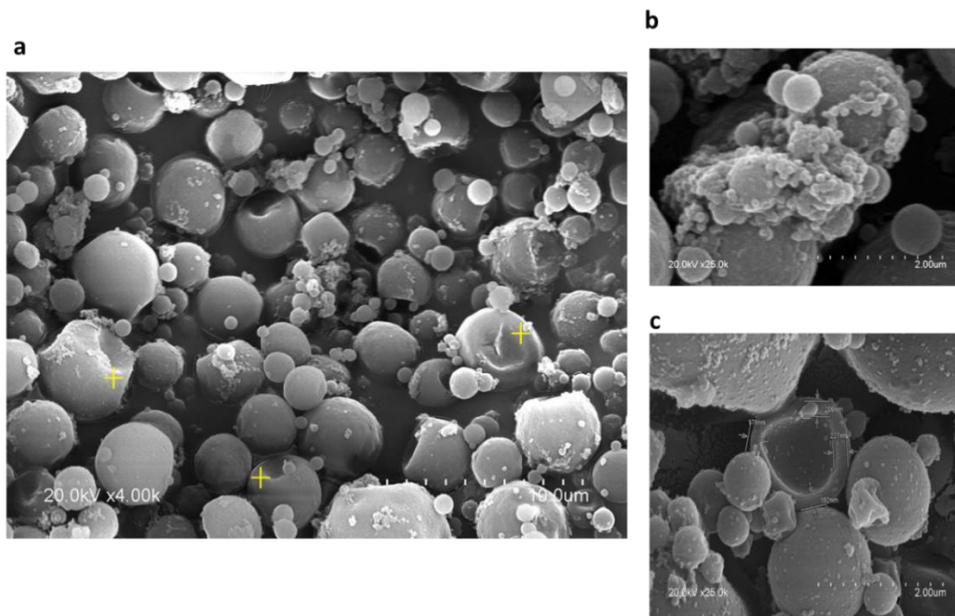


Figura 33. Fotografías Microscopio electrónico de barrido pigmento F1 (a) 4.00k, (b) 25.0k, (c) 25.0k

El análisis por EDX revela que se compone principalmente por: Carbono (C), Nitrógeno (N), Oxígeno (O) y Silicio (Si), los picos correspondientes a Oro (Au) y Aluminio (Al) pertenecen a la metalización de la muestra y el material del porta muestra. **Figura 34.**

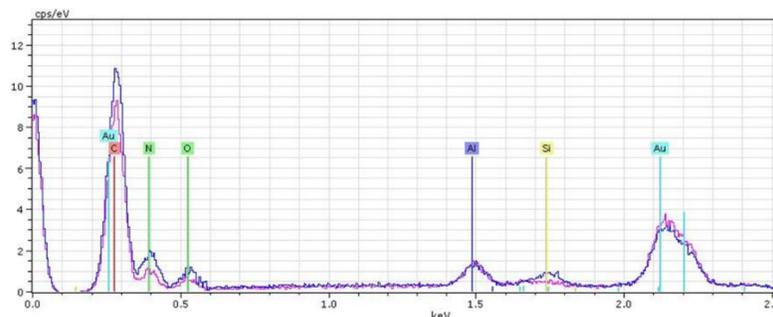


Figura 34. Espectro de EDX pigmento F2

6.1.2 Difracción de Rayos X (DRX)

Técnica que consiste en hacer incidir un haz de rayos X sobre una muestra del material, estos producen picos de difracción cuyas anchuras se relacionan con el tamaño de los cristales, los materiales con cristales muy desarrollados producen picos bien definidos (Curia, 2010).

Los materiales producen picos de difracción cuyas anchuras se relacionan con el tamaño de los cristales, una fase cristalina dada siempre produce un patrón de difracción característico, bien esté en estado puro o como constituyente de una mezcla. Generalmente para identificar las diferentes fases cristalinas obtenidas se utilizan los patrones de difracción contenidos en la base de datos.

La estructura cristalina de los compuestos se determinó por un Difractómetro de rayos X, Bruker D8, bajo las siguientes condiciones: ángulo de difracción 2θ : $5-60^\circ$, Time/Step: 0.5s, a una tensión de 40kV y 30 mA de corriente. **Figura 35.**

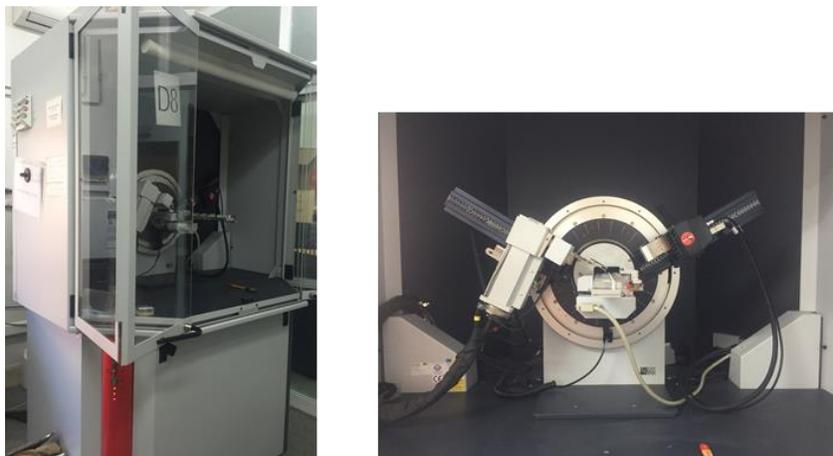


Figura 35. Difractómetro de rayos X, Bruker D8. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja

Para la identificación de fases se utilizó la base de datos del ICSD (Inorganic Crystal Structure Database). La estructura cristalina del pigmento F1 se analizó utilizando diagramas de difracción como se muestra en la **Figura 36**. El difractograma los valores máximos de DRX en 20.5° , 21.6° , 24.0° , muestra un patrón correspondiente al Alcohol Cetílico (C₁₆H₃₄O, 1-hexadecanol) compuesto orgánico sólido y un miembro de la clase de compuestos de alcohol (Huang, Alva, Liu, & Fang, 2017), también muestra

picos de menor intensidad 10.8° , 19.8° , 23.0° , muestra un patrón correspondiente al Formaldehído (CH_2O), asociado a los materiales utilizados para la encapsulación de los pigmentos.

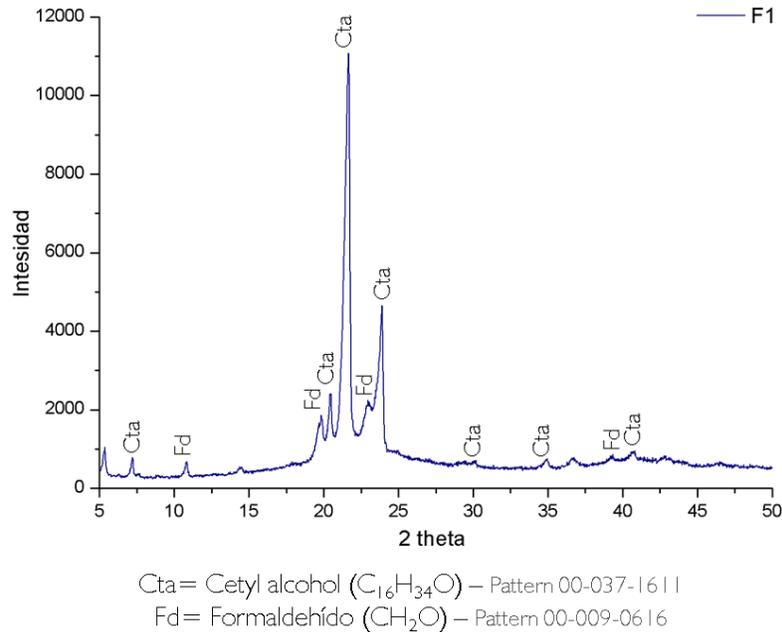


Figura 36. Difractograma pigmento F1

- Pigmento F2

La estructura cristalina del pigmento F1 se analizó utilizando diagramas de difracción como se muestra en la **Figura 37**. El difractograma muestra valores máximos en 20.5° , 21.6° , 24.0° , coincidentes con los observados en el pigmento F1, correspondiente al Alcohol Cetílico ($\text{C}_{16}\text{H}_{34}\text{O}$, 1-hexadecanol), unos de menor intensidad a los 10.8° , 19.8° , 39.5° asociados a la presencia de Formaldehído (CH_2O) y a diferencia del anterior pigmento los picos en 14.7° y 35.1° , se encuentran asociados al Bisfenol A ($\text{C}_{15}\text{H}_{16}\text{O}_2$), asociado al desarrollador de color de las mezclas orgánicas.

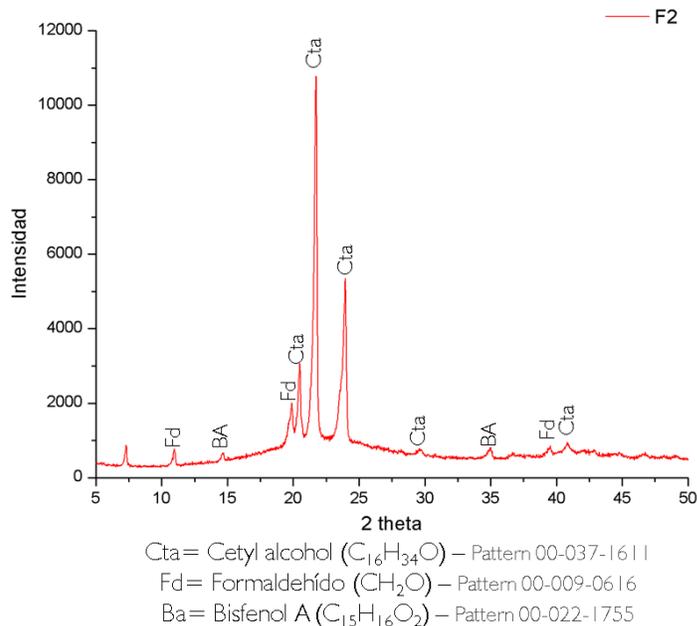


Figura 37. Difractograma pigmento F2

Los compuestos orgánicos termocrómico usados comúnmente en aplicaciones de consumo están compuestos por tres componentes principales, un tinte leuco, un ácido débil y un solvente, el tercer componente generalmente un solvente polar como un alcohol, éster, cetona o éter (White & LeBlanc, 1999).

Informes reportan que el Alcohol Cetílico (1-hexadecanol) es usado como solvente en sistemas termocrómicos reversibles; en el ocurren para las reacciones de donación / aceptación de electrones entre el formador de color y el revelador de color (Burkinshaw, Griffiths, & Towns, 1998).

6.1.3 Espectrometría Infrarroja con Transformada de Fourier (FT-IR)

El principio de funcionamiento de ésta espectroscopia se basa en la excitación de los modos de vibración y rotación de los enlaces entre los átomos al ser irradiados con un haz de luz infrarroja. Cada molécula, según las características de sus enlaces absorberá radiación de una o varias longitudes de onda específicas por lo que podrá ser identificada (Curia, 2010).

La espectroscopia de transmisión de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR) se emplea en la caracterización de diferentes compuestos para identificar los grupos funcionales presentes en las muestras. Esta técnica es sensible a la estructura ya que reflejan las vibraciones características de los grupos de átomos por lo que se emplean para identificar especialmente los grupos orgánicos.

Los grupos funcionales presentes en los pigmentos se determinaron por el Espectrómetro Bruker IFS 66/S, con rango de espectros: 400–4000 cm^{-1} y 300 barridos por muestra.

Los espectros FT-IR de los pigmentos F1 y F2 se muestran en la **Figura 38**, mientras que los picos significativos obtenidos a partir de los espectros FT-IR junto con las posibles asignaciones de diferentes bandas se muestra en la **Figura 39** y **Tabla 6**.

El pico 3302 cm^{-1} se atribuyen a la presencia de melamina-formaldehído (Argimón et al., 2017). Los picos 2918 cm^{-1} , 2850 cm^{-1} , 1741 cm^{-1} , 1637 cm^{-1} , 1471 cm^{-1} se atribuyen a Alcohol Cetílico (Burkinshaw et al., 1998) (Elmowafy et al., 2018), el pico de absorción 2918 cm^{-1} resultado de estiramiento antisimétrico vibración del grupo $-\text{CH}_2$ (Chen, Shan, Cao, & Fang, 2012), mientras tanto el pico 2850 cm^{-1} coincide con el estiramiento simétrico de vibración del grupo $-\text{CH}_2$ (Vakhshouri, Akif, Reyhan, Gala, & Akif, 2011), el pico de absorción 1471 cm^{-1} representa la vibración oscilante de la cadena grupal $-(\text{CH}_2)_4$ (Tang, Jia, Alva, Huang, & Fang, 2016).

Los picos 1553 cm^{-1} y 814 cm^{-1} son los picos de absorción característicos de estiramiento de vibración $-\text{NH}$ y de la vibración del anillo de triazina respectivamente los cuales se atribuyen a la presencia de Poli (melamineurea-formaldehído) (Li, Wang, Liu, Liu, & You, 2011) (Tong, Zhang, Wang, & Fu, 2013). El pico 1175 cm^{-1} se deben principalmente las interacciones CCH y CC en la molécula (Tong et al., 2013).

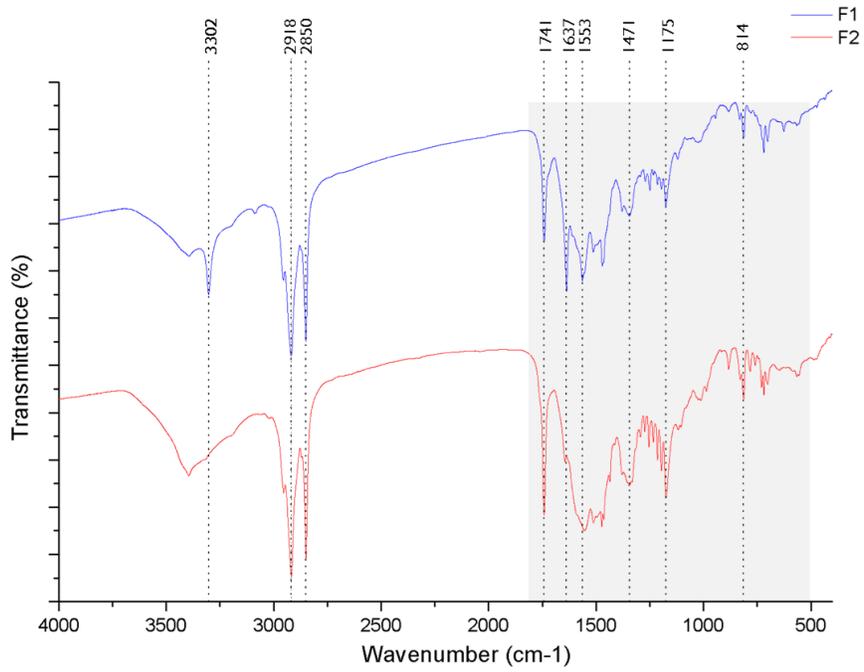


Figura 38. Espectros FT-IR de pigmentos F1y F2

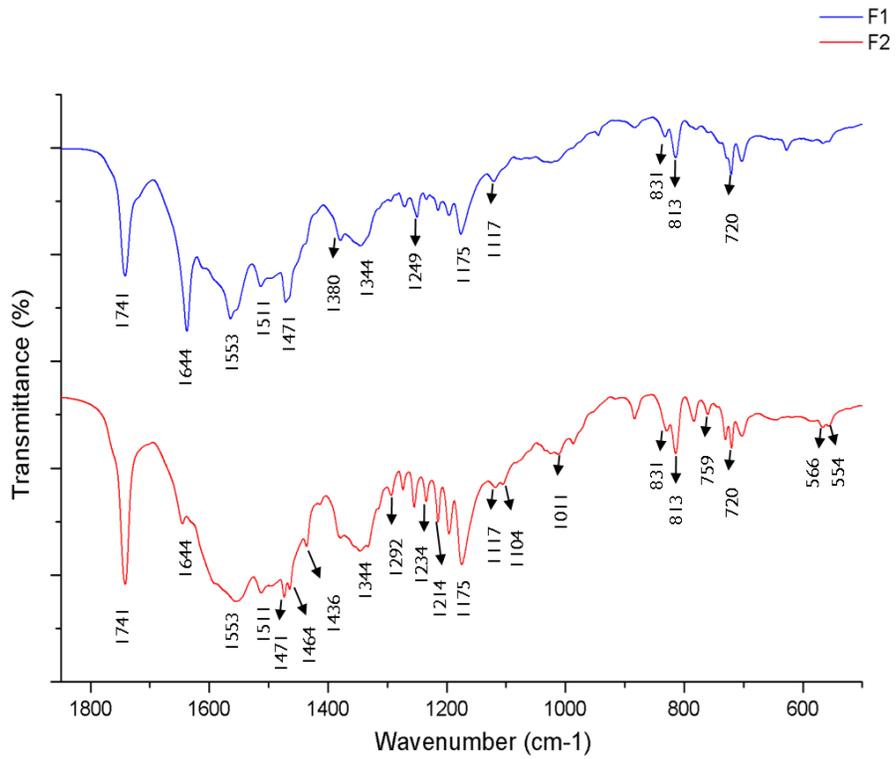


Figura 39. Espectros FT-IR de pigmentos F1y F2, rango 1700 a 500 nm

Tabla 6. FT-IR bandas de absorción de F1 y F2, rango 1700 a 500 nm

Banda cm^{-1}	Asignación	Componente	Referencia
1664	C = O estiramiento de un grupo amida	Poli (melamineurea-formaldehído)	(Li et al., 2011)
1511	Interacciones HCH	Bisfenol A	(Ullah, Ahmad, & Zheng, 2016)
1494	C = N resonancia	Poli (melamineurea-formaldehído)	(Li et al., 2011)
1471	Vibración oscilante $-(\text{CH}_2)_4$	Alcohol Cetílico	(Huang et al., 2017)
1464	Flexión de CH_2 de la cadena alifática	Alcohol Cetílico	(Argimón et al., 2017)
1436	Anillos de CC y CCH	Bisfenol A	(Ullah et al., 2016)
1380	Interacciones HCH y CCH	Bisfenol A	(Ullah et al., 2016)
1344	Vibración de tensión C-N	Poli (melamineurea-formaldehído)	(Li et al., 2011)
1292	Estiramiento CC	Bisfenol A	(Ullah et al., 2016)
1249	Vibración de tensión C-O-C	Poli (urea-formaldehído)	(Tang et al., 2016)
1234	Deformación O-H	Alcohol Cetílico	(Huang et al., 2017)
1214	Estiramiento CC-CO	Bisfenol A	(Ullah et al., 2016)
1117	Estiramiento CC	Bisfenol A	(Ullah et al., 2016)
1104	Estiramiento CC	Bisfenol A	(Ullah et al., 2016)
1011	Estiramiento CC	Poli (melamineurea-formaldehído)	(Li et al., 2011)
831	Absorción del anillo epoxi	Poli (urea-formaldehído)	(Tong et al., 2013)
759	Movimiento de flexión fuera del plano CH	Bisfenol A	(Ullah et al., 2016)
720	Vibración oscilante $-(\text{CH}_2)_4$	Alcohol Cetílico	(Huang et al., 2017) , (Argimón et al., 2017)
566	Torsión CO, CC, y CH	Bisfenol A	(Ullah et al., 2016)
554	Torsión CO, CC, y CH	Bisfenol A	(Ullah et al., 2016)

6.1.4 Espectroscopia de UV-Vis

La técnica de caracterización espectroscopia ultravioleta-visible por reflectancia difusa mide la cantidad de luz reflejada por una superficie en función de las longitudes de onda para crear un espectro característico. El funcionamiento de un espectrofotómetro de reflectancia se basa en iluminar la muestra con luz blanca y analizar la cantidad de luz que la muestra refleja en una serie de longitudes de onda.

La reflectancia difusa se determinaron por el Espectrómetro UV-VIS-NIR, StellarNet y Esfera integrado ISP-50-8-R-GT, diámetro de la esfera 50mm; Ocean Optics ver **Figura 40**, los espectros fueron tomados en un rango 350nm - 1000nm, el procedimiento de medición se realizó con base a lo establecido en la norma ASTM E 903-96. Absorción solar, reflectancia y transmitancia de materiales usando esferas de integración.



Figura 40. Espectrómetro StellarNet y Esfera integrador Ocean Optics

El Software informático utilizado para recoger los espectros de reflectancia difusa SpectraWiz Shortcut, en función de la Longitud de onda (nm), en todo espectrofotómetro la medida del factor de reflectancia requiere la utilización de una muestra 'Blanco', para lo cual utilizamos RS50 Standard estándar de reflectancia blanca de 50 mm de diámetro hecho de halón. **Figura 41.**



Figura 41. Estándar de reflectancia RS50

Las muestras se midieron a temperaturas que sobrepasaran la temperatura de cambio marcada por el fabricante, los pigmentos se elevaron a 40°C colocándolos en una Estufa de cultivo, P Selecta por 24 horas, así mismo, para se sometieron a temperaturas frías colocando lo Frigorífico Rommer el cual conservaba una temperatura constante de 5°C. **Figura 42.**



Figura 42. Estufa de cultivo, P Selecta y Frigorífico Rommer

- Pigmento F1.

Los espectros del pigmento F1 se muestran en la **Figura 43**, en los que podemos observar que presenta diferencias en la reflectancia con la temperatura en el rango visible e infrarrojo que están directamente relacionadas con el cambio en la coloración del pigmento.

A mayor temperatura la reflectancia es mayor, la diferencia entre los dos estados aumenta arriba del 50% en el intervalo e 480nm a 685 nm y la máxima reflectancia en el rango visible se observa a los 462 nm (5°c) y 485 nm (40°c).

En términos de color las coordenadas CIELAB fueron las siguientes.

Muestra	L*	a*	b*
F1 (5°c)	47.24	+4.465	-21.71
F1 (40°c)	86.50	-7.51	7.51

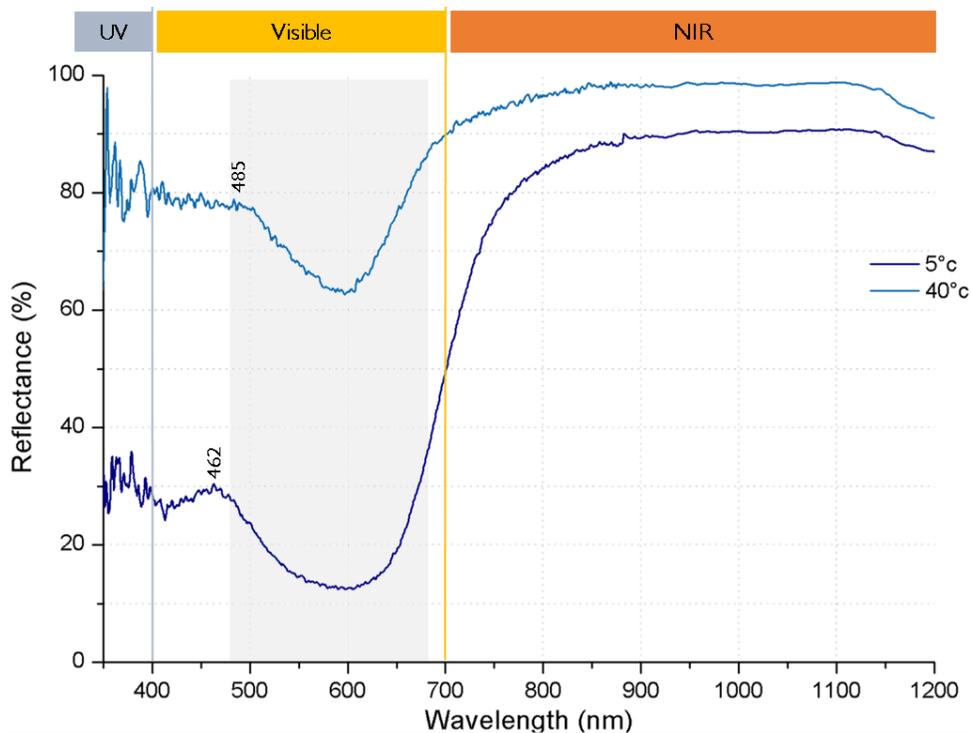


Figura 43. Espectro de reflectancia pigmento F1

- Pigmento F2

Los espectros del pigmento F2 se muestran en la **Figura 44**, en los que podemos observar que presenta diferencias en la reflectancia con la temperatura en el rango visible que están directamente relacionadas con el cambio en la coloración del pigmento.

A mayor temperatura la reflectancia es mayor, la diferencia entre los dos estados aumenta arriba del 70% en el intervalo e 500nm a 560 nm y la máxima reflectancia en el rango visible se observa a los 670 nm (5°c) y 512 nm (40°c).

En términos de color las coordenadas CIELAB fueron las siguientes.

Muestra	L*	a*	b*
F2 (5°c)	56.66	+41.51	+13.76
F2 (40°c)	96.63	-4.42	+20.26

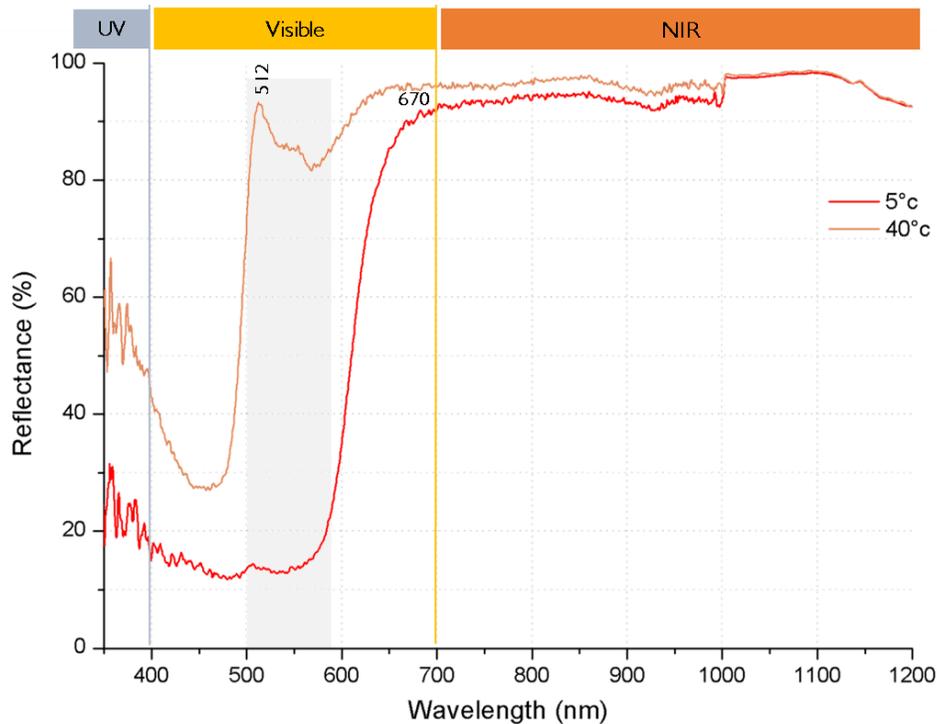
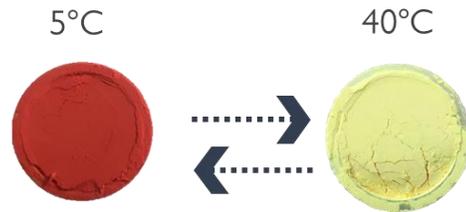


Figura 44. Espectro de reflectancia pigmento F1

6.1.5 Resultados generales las técnicas de caracterización

Los pigmentos termocrómicos en base polvo, distribuidos por TECMA© Comercializadora S.A. de C.V., de acuerdo a la SEM/ EDX se determinó que son pigmentos encapsulados, de origen orgánico compuestos elementalmente de: Carbono (C), Nitrógeno (N), Oxígeno (O).

En el caso de las mezclas de colorantes orgánicos termocrómicos, se requieren al menos tres componentes químicos para lograr colores que cambian con la temperatura (White & LeBlanc, 1999) . Mediante DRX, FTIR y TGA, se identificaron el desarrollador de color, el solvente y la microcápsula.

- Desarrollador de color, Bisfenol A, también conocido como 4,4'-(propano-2,2-diil) difenol, es un compuesto orgánico con dos grupos funcionales fenol. Este componente imparte el cambio de color reversible al material termocrómico y es responsable de la intensidad del color del producto final.
- Solvente, Alcohol Cetílico, también conocido como 1-hexadecanol, es un compuesto orgánico sólido perteneciente al grupo de los alcoholes grasos. El punto de fusión de este controla la temperatura a la que el color el cambio de coloración que se llevará a cabo.
- Microcápsula, Poli (melaninaurea-formaleído), resinas ureicas modificadas con melanina que protege a los componentes de medios abrasivos.

6.2

Caracterización óptica (reflectancia difusa)

La reflectancia difusa se determinaron por el Espectrómetro UV-VIS-NIR, StellarNet y Esfera integrado ISP-50-8-R-GT, diámetro de la esfera 50mm; Ocean Optics, los espectros fueron tomados en un rango 350nm – 1000nm, el procedimiento de medición se realizó con base a lo establecido en la norma ASTM E 903–96. Absorción solar, reflectancia y transmitancia de materiales usando esferas de integración.

El Software informático utilizado para recoger los espectros de reflectancia difusa SpectraWiz Shortcut, en función de la Longitud de onda (nm), para la calibración se utilizó RS50 Standard estándar de reflectancia blanca de 50 mm, para el aumento y disminución de tempera tura las muestras se colocaron en Estufa de cultivo. P Selecta y Frigorífico Rommer.

Las muestras evaluadas fueron las denominadas OP ver **Tabla 7**.

Tabla 7. Probetas evaluadas (reflectancia difusa)

Dimensiones de la muestra: paralelepípedo rectangular de 30mm de ancho, 60mm de largo y 10 mm de espesor.

Referencia: Muestra de mortero sin pigmento	Pigmento 1: Muestra de mortero + 3% pigmento F1 (termocrómico azul)	Pigmento 2: Muestra de mortero + 3% pigmento F2 (termocrómico rojo)
Nomenclatura OP- SP	Nomenclatura OP-F1	Nomenclatura OP-F2



White mortar sample (OP-SP)



Blue mortar sample (OP-F1)



Red mortar sample (OP-F2)

6.2.1 OP-F1

Los espectros del **Figura 45** se muestran en la Ilustración 46, en los que podemos observar que la propiedad termocrómico reversible del pigmento sigue presente, la diferencia entre los dos estados aumenta arriba del 20% en el intervalo e 550nm a 650 nm. Los valores máximos de reflectancia en el rango visible se presentan a los 700nm una reflectancia de 82%, mientras que a mínima a los 605nm correspondiente a un 51%. La muestra OP-SP no presenta cambios de reflectancia bajo condiciones de aumento o disminución de temperatura.

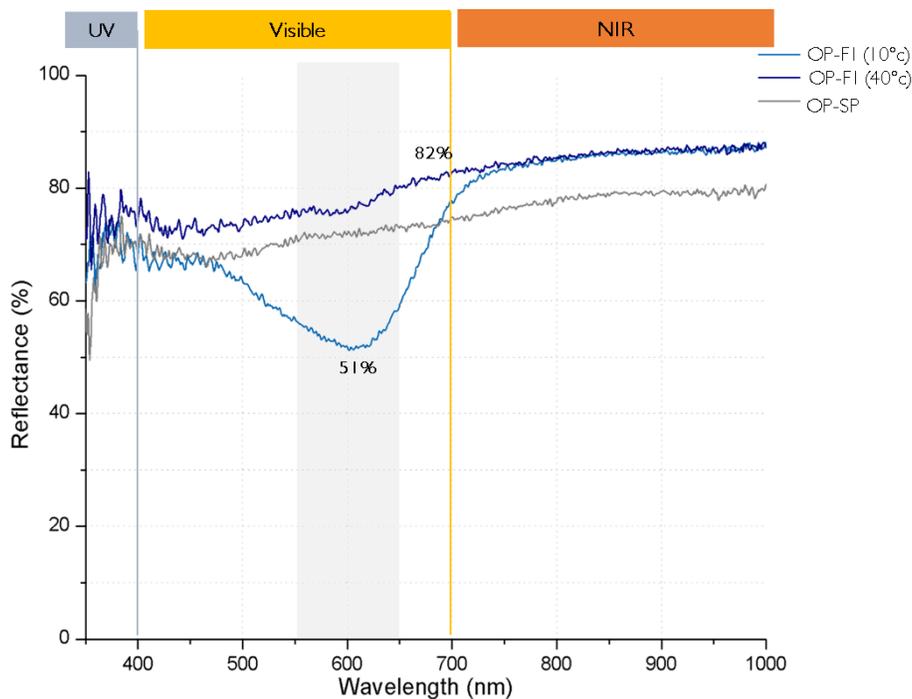


Figura 45. Espectro de reflectancia pigmento OP-F1

En términos de color las coordenadas CIELAB fueron las siguientes.

Muestra	L*	a*	b*
OP-F1 (10°C)	80.05	-0.213	-8.89
OP-F1 (40°C)	89.60	+1.014	+1.86

La diferencia de color se determinó mediante el cálculo de ΔE , aplicando la siguiente fórmula:

$$\Delta E_{ab^*} = \sqrt{(L_2^* - L_1^*)^2 + (a_2^* - a_1^*)^2 + (b_2^* - b_1^*)^2}$$

En donde ΔE de las muestras=14.43



Se midió la reflectancia en de forma cíclica de descendiente a cada 2° c de diferencia de temperatura (30° c-10° c); se observa que la diferencia de reflectancia aumenta significativamente en el rango 22° c – 26° c a una longitud de onda 550-650 nm, lo que deriva que la diferencia de coloración más importante se realiza dentro de ese rango de temperatura superficial del mortero. **Figura 46.**

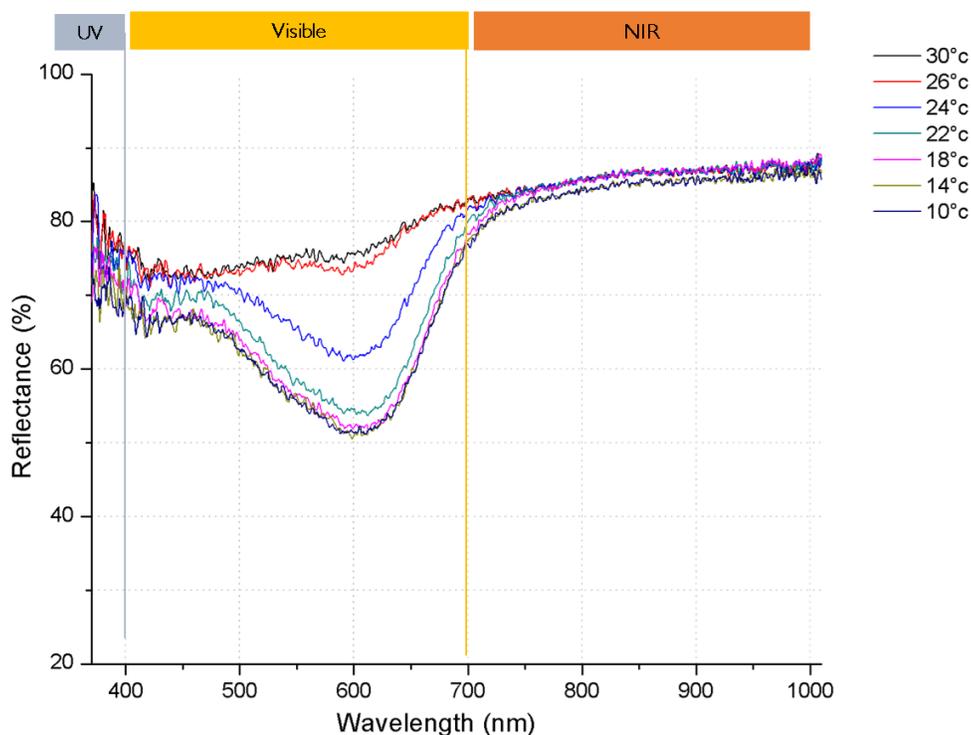


Figura 46. Espectro de reflectancia pigmento OP-F1, cambio de temperatura cíclico 30°c-10°c

6.2.2 OP-F2

Los espectros del pigmento F1 se muestran en la **Figura 47**, en los que podemos observar el efecto termocrómico reversible sigue presente, la diferencia entre los dos estados aumenta arriba del 20% en el intervalo e 510nm a 555 nm. Los valores máximos de reflectancia en el rango visible se presentan a los 700 nm una reflectancia de 82%, mientras que a mínima a los 530nm correspondiente a un 53%. La muestra OP-SP no presenta cambios de reflectancia bajo condiciones de aumento o disminución de temperatura.

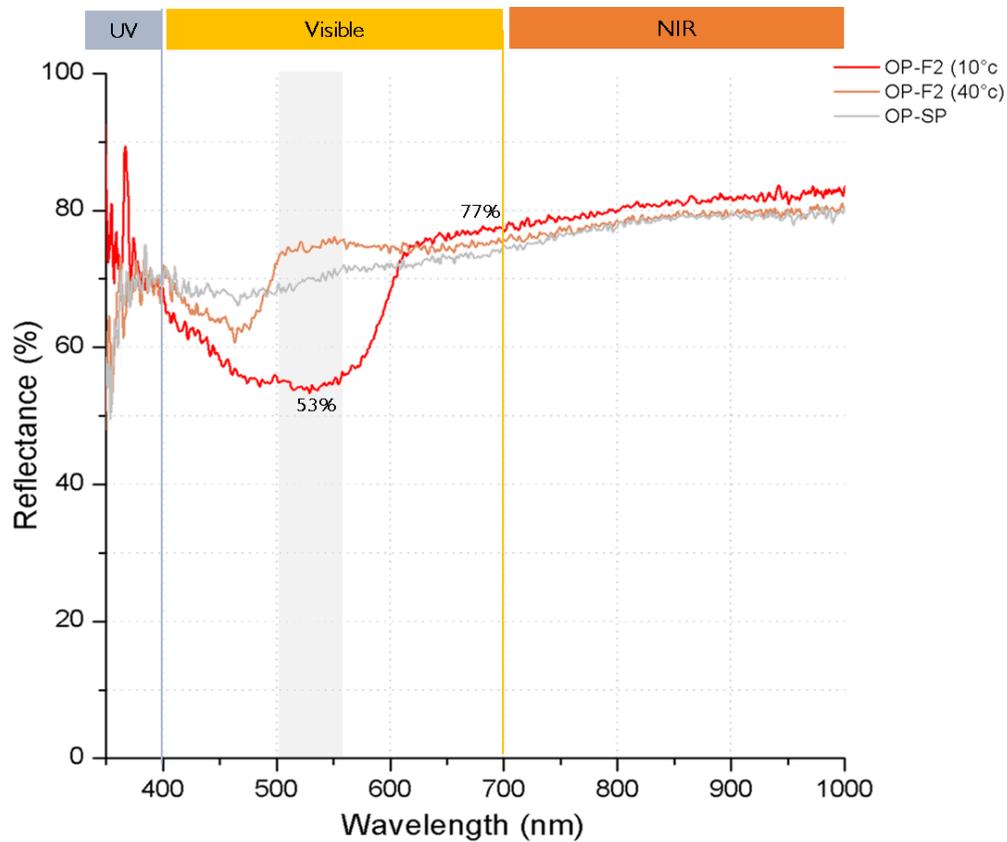


Figura 47. Espectro de reflectancia pigmento OP-F2

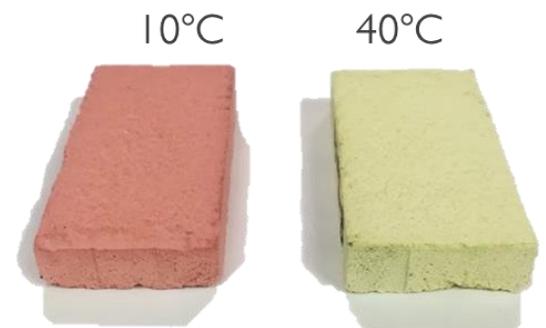
En términos de color las coordenadas CIELAB fueron las siguientes.

Muestra	L*	a*	b*
OP-F2 (10°C)	81.17	+11.846	+1.383
OP-F2 (40°C)	88.67	-2.688	+7.662

La diferencia de color se determinó mediante el cálculo de ΔE , aplicando la siguiente fórmula:

$$\Delta E_{ab*} = \sqrt{(L_2^* - L_1^*)^2 + (a_2^* - a_1^*)^2 + (b_2^* - b_1^*)^2}$$

En donde ΔE de las muestras=17.52



Se midió la reflectancia en de forma cíclica de descendiente a cada 2°c de diferencia de temperatura (30°c-10°c), se observa que la diferencia de reflectancia aumenta significativamente en el rango 22°c - 26°c a una longitud de onda 500-600 nm, lo que deriva que la diferencia de coloración más importante se realiza dentro de ese rango de temperatura superficial del mortero. **Figura 48.**

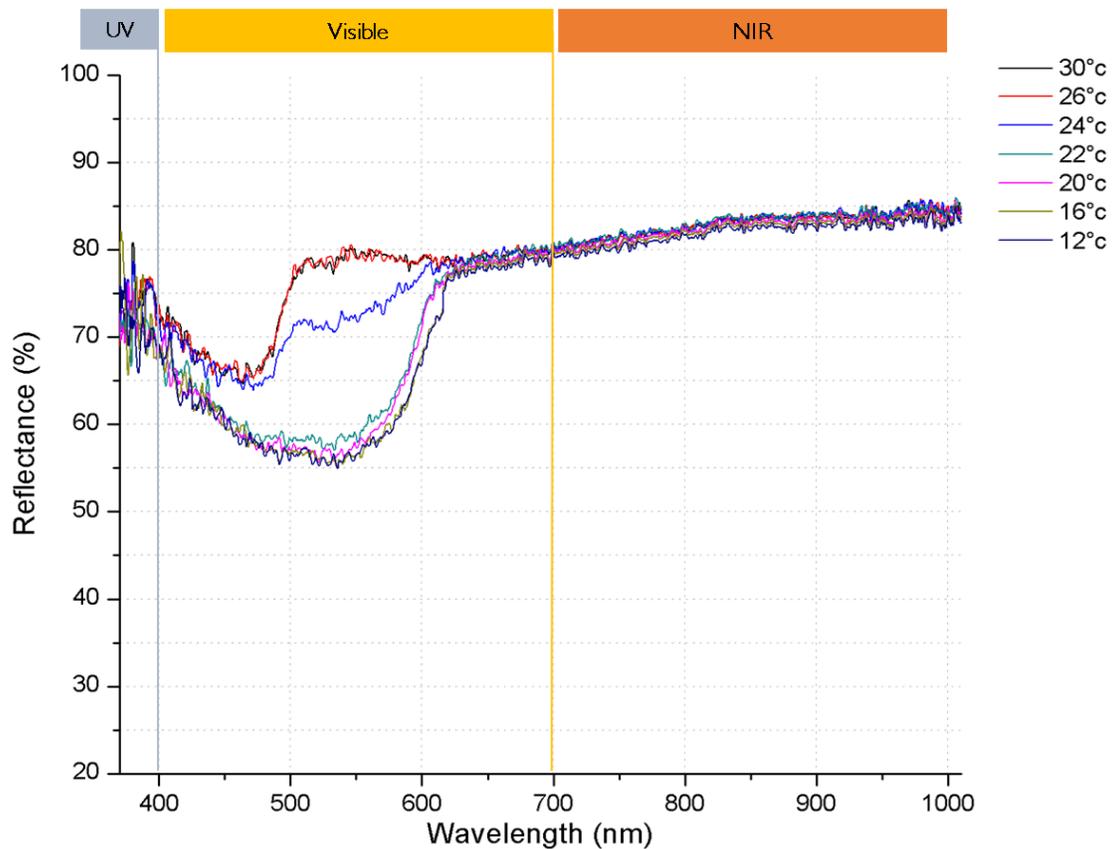


Figura 48. Espectro de reflectancia pigmento OP-F2, cambio de temperatura cíclico 30°c-10°c

6.3

Caracterización térmica (temperatura superficial)

Una de las variables más importantes para cuantificar la transmisión de calor a través de un cerramiento, es su temperatura superficial (T_s), como se observa en la ecuación uno, esta variable se encuentra en los tres procesos, el de conducción, convección y radiación (Barcenas, 2016).

Así pues, la temperatura de superficie es la que los objetos emiten en forma de calor como resultado de su muy baja reflectancia solar, es decir, originada por su muy alta capacidad de absorber la radiación solar, lo que sin duda tiene implicaciones en el mayor calor que ingresa por ejemplo en los edificios y en la liberación prolongada de éste a la atmósfera, lo que produce el efecto conocido como isla de calor.

Las temperaturas superficiales se determinaron por el uso de sensores denominados Termopares tipo “T”, compuesto por la unión de dos metales cobre (+) y constantán (-), los datos fueron registrados a través del Data Logger SE-520, Omega a una frecuencia de muestreo a cada 5 min, mientras que los datos meteorológicos correspondientes a temperatura ambiente y humedad relativa fueron proporcionados por Estación meteorológica interMET, ubicada en patio de maniobras del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, mismo en el que fueron colocadas los especímenes a evaluar. **Figura 49.**



Termopares tipo T

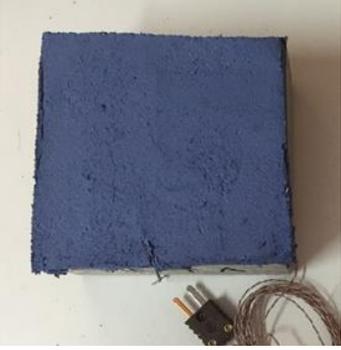
Data Logger SE-520, Omega

Estación meteorológica interMET

Figura 49. Instrumentos utilizados para la medición de la temperatura superficial

Las muestras evaluadas fueron las denominadas MT. **Tabla 8**

Tabla 8. Características de las muestras térmicas

Dimensiones de la muestra: Recubrimiento de una pieza de concreto con dimensiones 100mm de largo y ancho y 10 mm de espesor.		
Referencia: Muestra de mortero sin pigmento	Pigmento 1: Muestra de mortero + pigmento F1 (termocrómico azul), termopar tipo K	Pigmento 2: Muestra de mortero + pigmento F2 (termocrómico rojo), termopar tipo K
Nomenclatura MT- SP	Nomenclatura MT-F1	Nomenclatura MT-F27
		

6.3.1 Ubicación

El desarrollo experimental se realizó en el patio de maniobras del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, localizado Latitud: 40° 28'19.22"N, Longitud: 3° 40'11.75"O, Elevación 723 msnm. **Figura 50 y 51.**

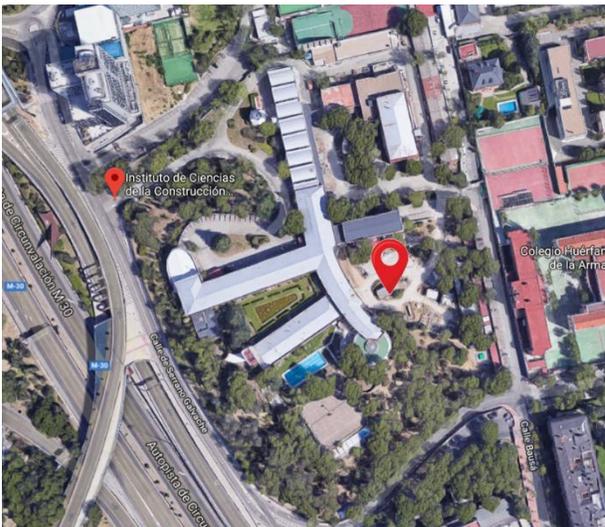


Figura 51. Vista aérea ubicación del sitio de experimentación

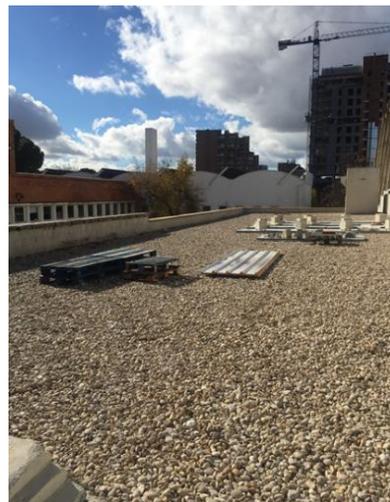


Figura 50. Vista del patio de maniobras.

6.3.2 Desarrollo experimental

El experimento se llevó a cabo durante el periodo comprendido del día 3 al 9 de octubre, se realizaron la toma de datos con una frecuencia de muestreo cada 5 min, el montaje de las muestras se realizaron sobre una base de madera para que éstas no absorbieran radiación de onda larga que influyera con la toma de lecturas térmicas. y separadas de cualquier elemento cuya sombra comprometiera las medidas, las tres muestras fueron ubicadas en orientación norte, la orientación se realizó con la ayuda de una brújula y una plomada para obtener mayor exactitud. En la siguiente ilustración se puede observar el sitio y el montaje de las muestras en el espacio experimental. **Figura 52.**

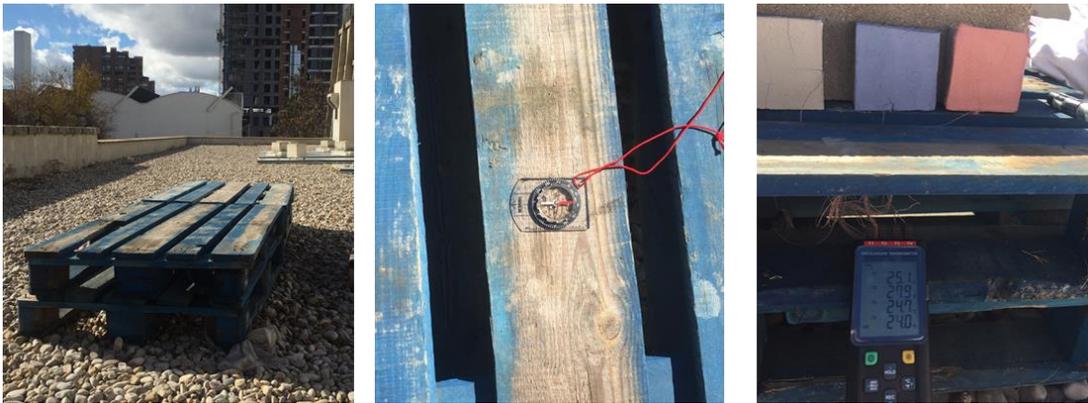


Figura 52. Colocación de muestras para el desarrollo experimental

Es importante mencionar que los termopares fueron colocados en el proceso de amasado de la mezcla por lo que se encuentran inmersos en el material, el cual fue aplicado como recubrimiento de piezas de concreto anteriormente elaboradas, esto con la finalidad de evaluar un comportamiento superficial más cercano que al haber colocado los sensores sobre la superficie adheridos con cinta.

De manera simultánea las medidas de temperatura exterior y humedad relativa fueron registradas por la estación meteorológica interMET ubicada en el mismo sitio, los resultados obtenidos se muestran a continuación.

6.3.3 Resultados

La grafica correspondiente a los datos obtenidos se muestra en la **Figura 53**, durante el periodo de experimentación los datos correspondientes a la temperatura ambiente máxima registrada fue de 30°c el día 4 de octubre a las 17:17 hrs, mientras que la mínima registrad fue de 9°c el día 8 de octubre a las 8 :22 hrs, mientras que la temperatura ambiente promedio correspondiente al periodo de experimentación fue de 18.7°c.

- MT-SP

La evaluación de esta muestra la cual no le fue incorporado ningún pigmento, los datos de temperatura superficial máximos registrados fue de 33.8°c el día 4 de octubre a las 17:07 hrs cuando la temperatura ambiente se encontraba a 29.5°c y 24% de humedad y la temperatura mínima registrada fue de 5.5°c el día 8 de octubre a las 8:47 hrs cuando la temperatura ambiente se encontraba a 9.0°c y 61.5% de humedad.

- MT-F1

La evaluación de esta muestra le fue incorporada 3% de pigmento F1, los datos de temperatura superficial máximos registrados fue de 32.5°c el día 4 de octubre a las 17:32 hrs cuando la temperatura ambiente se encontraba a 29.5°c y 23% de humedad y la temperatura mínima registrada fue de 7°c el día 8 de octubre a las 8:27 hrs cuando la temperatura ambiente se encontraba a 9.0°c y 60% de humedad.

- MT-F2

La evaluación de esta muestra le fue incorporada 3% de pigmento F2, los datos de temperatura superficial máximos registrados fue de 35°c el día 4 de octubre a las 17:27 hrs cuando la temperatura ambiente se encontraba a 30°c y 23% de humedad y la temperatura mínima registrada fue de 7°c el día 8 de octubre a las 8:42 hrs cuando la temperatura ambiente se encontraba a 9.0°c y 61% de humedad.

Los datos descritos anteriormente, se muestran en la **Tabla 9** que se muestra a continuación.

Comportamiento térmico superficial muestras MT-SP, MT-F1 y MT-F2, del periodo experimental 3 al 9 de octubre 2018

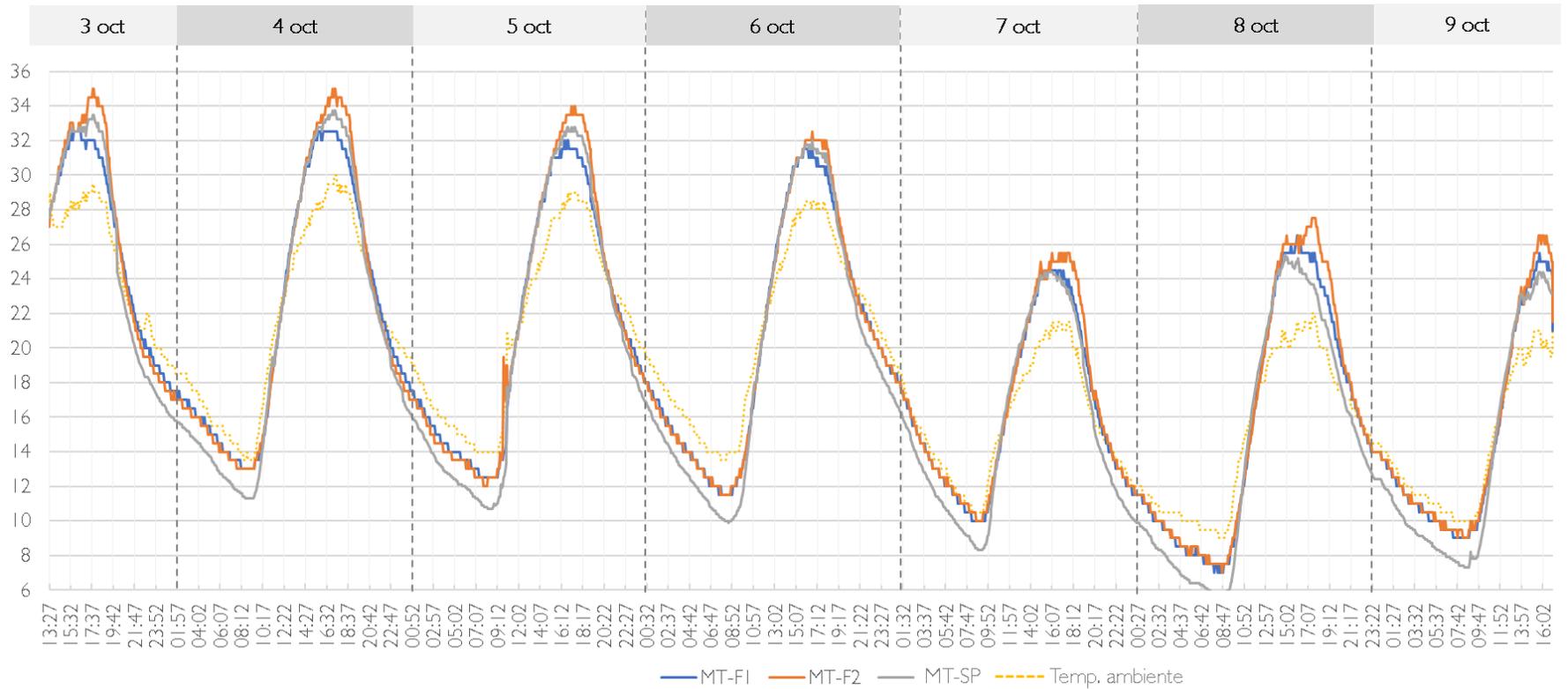


Figura 53. Temperatura superficial del periodo de experimentación 3 al 9 de octubre 2018

Tabla 9. Temperaturas máximas y mínimas registradas.

Variable	Máximo	Día	Hora	Mínimo	Día	Hora	Promedio
Temperatura ambiente	30°C	4 Octubre	17:17 hrs	9°C	8 octubre	8:22 hrs	18.7°C
Humedad	67.5%	9 Octubre	8:32 hrs	23%	3 Octubre	19:52 hrs	41%

Variable	Temp. Máxima	Día	Hora	Temp. Ambiente	Humedad
MT-SP	33.8°C	4 Octubre	17:07 hrs	29.5°C	24%
MT-F1	32.5°C	4 Octubre	17:32 hrs	29.5°C	23%
MT-F2	35.0°C	4 Octubre	17:27 hrs	30.0°C	23%

Variable	Temp. Mínima	Día	Hora	Temp. Ambiente	Humedad
MT-SP	5.5°C	8 Octubre	8:47 hrs	9°C	61.5%
MT-F1	7°C	8 Octubre	8:27 hrs	9°C	60%
MT-F2	7°C	8 Octubre	8:42 hrs	9°C	61%

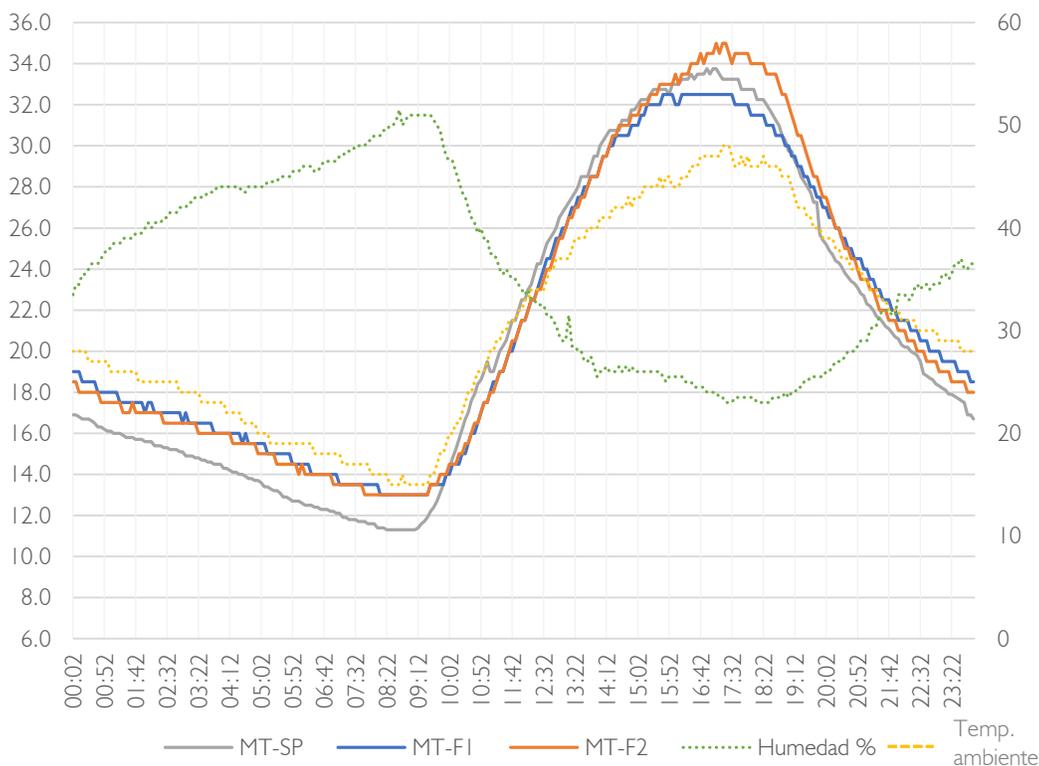
Con respecto a los datos mostrados en la **Tabla 9**, de forma general se analizaron los valores máximos y mínimos de las muestras en donde podemos observar que coinciden con la temperatura máxima y mínima registrada en el ambiente por lo que podemos decir que las muestras tienen un comportamiento dependiente a esta variable.

Con respecto a las temperaturas superficiales máximas registradas la muestra MT-F2 presenta una temperatura de 35 °C, si tomamos el dato de referencia de la muestra MT-SP vemos que es 1.2 °C mayor que la temperatura máxima registrada de 33.8 °C, mientras que la muestra MT-F1 registra una temperatura máxima de 32.5 °C por debajo de la muestra de referencia MT-SP, es decir presenta una disminución de 1.3 °C.

Con respecto a las temperaturas superficiales mínimas registradas las muestras MT-F1 y MT-F2, presenta temperatura de 7 °C si tomamos el dato de referencia de la muestra MT-SP vemos que es 2.5 °C mayor que la temperatura mínima registrada de 5.5 °C, es decir ambas muestra MT-F1 y MT-F2 presentan temperaturas mayores en condiciones frías.

A continuación, se presentarán los datos de manera particular del comportamiento de los días 4, 5, 6, 7, 8 de octubre correspondientes a las 3 muestras evaluadas.

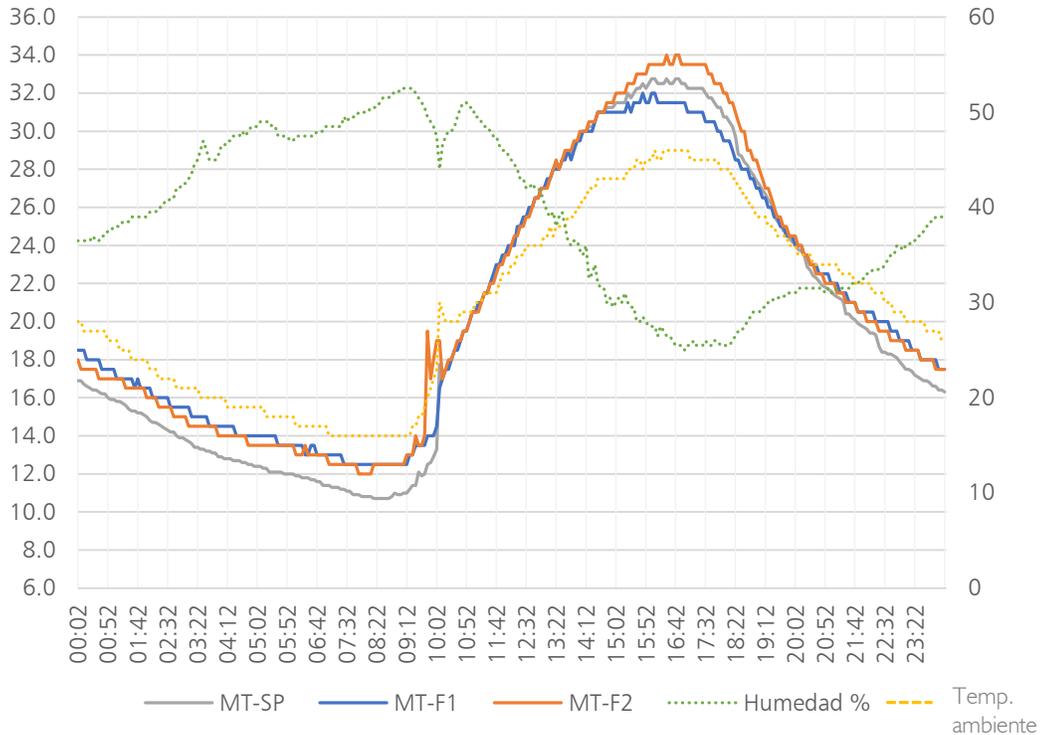
4 de octubre del 2018



Variable	Temp. Mínima	Hora	Temp. Máxima	Hora
MT-SP	11.3°C	8:37 hrs	33.8°C	17:07 hrs
MT-F1	13.0°C	8:12 hrs	32.5°C	17:32 hrs
MT-F2	13.0°C	7:47 hrs	35.0°C	17:27 hrs
Temp. Ambiente	13.5°C	8:52 hrs	30.0°C	17:17 hrs

Podemos observar que cuando la temperatura ambiente desciende por debajo de los 20 °c la muestra MT-SP presenta temperaturas menores a las de las muestras MT-F1 y MT-F2, con una diferencia de hasta 1.7°. Mientras que cuando la temperatura ambiente sobrepasa los 28 °c aproximadamente 15:00 - 18:00 hrs, la muestra MT-F2 presenta temperaturas superficiales menores a las MT-SP y MT-F1, siendo la MT-F2 la que registra la temperatura máxima 35 °c a las 17:52 hrs.

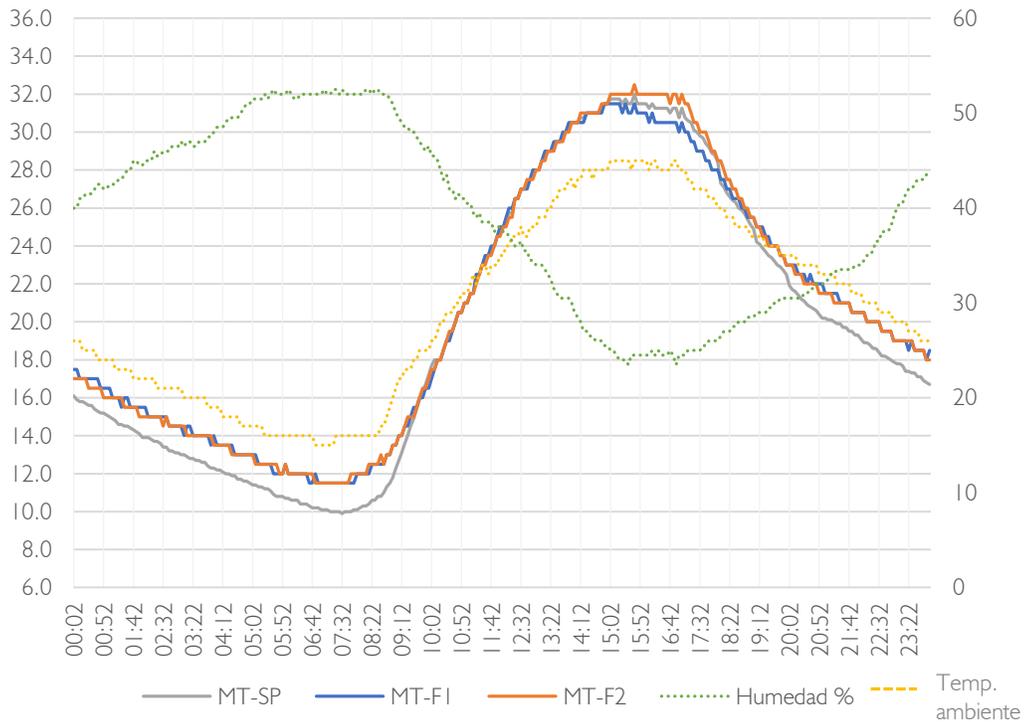
5 de octubre del 2018



Variable	Temp. Mínima	Hora	Temp. Máxima	Hora
MT-SP	10.7°C	8:17 hrs	32.8°C	17:12 hrs
MT-F1	12.5°C	7:27 hrs	32.0°C	16:47 hrs
MT-F2	12.0°C	7:52 hrs	34.0°C	17:27hrs
Temp. Ambiente	14.0°C	7:02 hrs	29.0°C	17:07 hrs

Podemos observar que a temperaturas menores la muestra MT-SP presenta valores más bajos es decir su temperatura superficial es más fría con respecto a las otras muestras con diferencia de hasta 1.8°C. Mientras que a temperaturas mayores la MT-SP muestra valores mayores a la MT-F1 y menores al MT-F2, en la gráfica podemos observar como del periodo de las 15:00 a las 18:00hrs la tendencia se encuentra entre medio de los dos muestras, debido a que la temperatura ambiente sobrepasa los 28°C en ese lapso, puede atribuirse que temperaturas menores registrados por MT-F1, se deban al cambio de coloración realizado por el efecto termocrómico

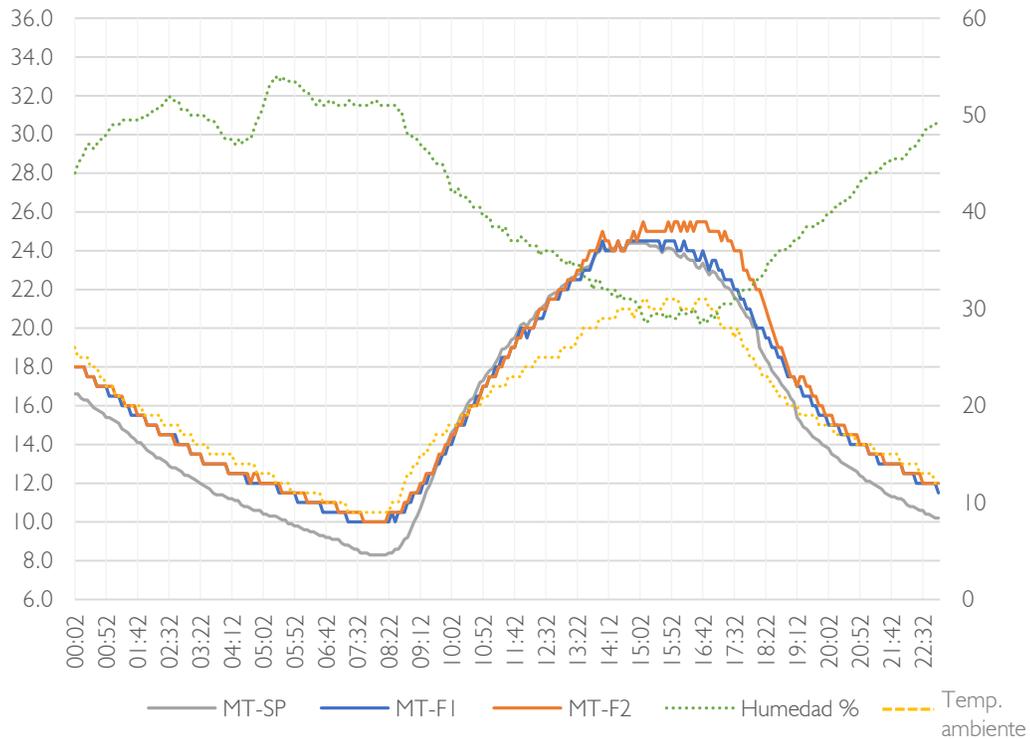
6 de octubre del 2018



Variable	Temp. Mínima	Hora	Temp. Máxima	Hora
MT-SP	9.9°C	8:32 hrs	32.0°C	16:42 hrs
MT-F1	11.5°C	7:52 hrs	31.5°C	16:27 hrs
MT-F2	11.5°C	7:47 hrs	32.5°C	16:42 hrs
Temp. Ambiente	13.5°C	7:47 hrs	28.5°C	16:02 hrs

Podemos observar que cuando la temperatura ambiente desciende la muestra MT-SP presenta temperaturas menores a las de las muestras MT-F1 y MT-F2, mientras que el periodo entre 14:00hrs – 17:00 hrs cuando la temperatura ambiente se eleva por arriba de los 26 °c, la muestra MT-F2 presenta temperaturas superficiales menores a las MT-SP y MT-F2, mientras que la muestra MT-F3 registra los valores más elevados en ese mismo periodo.

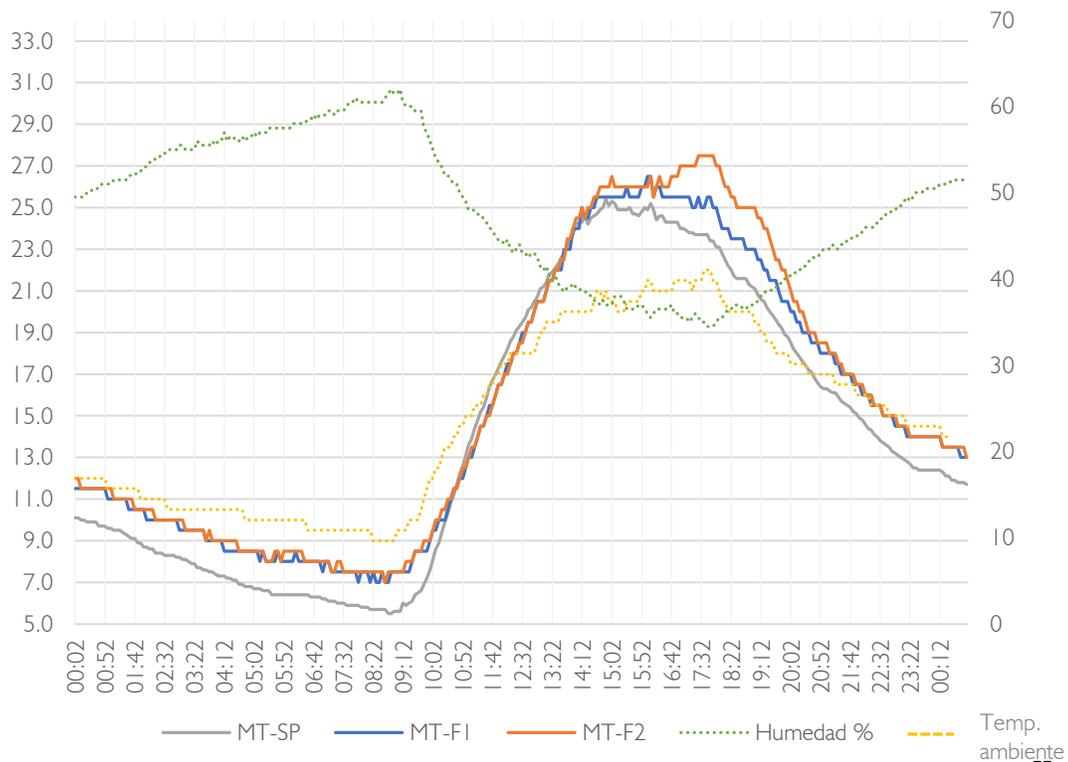
7 de octubre del 2018



Variable	Temp. Mínima	Hora	Temp. Máxima	Hora
MT-SP	8.3°C	8:52 hrs	24.4°C	15:42 hrs
MT-F1	10.0°C	8:17 hrs	24.5°C	15:42 hrs
MT-F2	10.0°C	8:42 hrs	25.5°C	16:52 hrs
Temp. Ambiente	10.5°C	8:17 hrs	21.5°C	16:07 hrs

Como primer dato interesante este día la temperatura ambiente tuvo un descenso importante, la temperatura máxima registrada fue de 21.5°C a las 16:00 hrs, por lo que el comportamiento observado de las muestras presenta diferencias. Cuando la temperatura desciende las MT-SP sigue mostrando menores temperaturas superficiales, es decir las muestras MT-F1 y MT-F2 se encuentran más calientes. Sin embargo, cuando la temperatura ambiente no sobrepasa los 26°C las muestras MT-F1 y MT-F2 se mantiene en este colorado por lo que las temperaturas registradas son mayores que la muestra MT-SP, esto asociado en el estado coloreado el material con adición de pigmento suele absorber mayor cantidad de energía.

8 de octubre del 2018



Variable	Temp. Mínima	Hora	Temp. Máxima	Hora
MT-SP	5.5°C	8:47 hrs	25.4°C	14:52 hrs
MT-F1	7.0°C	8:27 hrs	26.5°C	16:02 hrs
MT-F2	7.0°C	8:42 hrs	27.5°C	17:27 hrs
Temp. Ambiente	9.0 °c	8:22 hrs	22.0°C	17.37 hrs

La grafica muestra un comportamiento similar al registrado el día 7 de octubre, debido a que la temperatura ambiente máxima es de 22°C, se vuelve observar el mismo comportamiento de las muestras en el periodo de 14:00 - 18:00 hrs que es donde se presenta el aumento de temperatura. La muestra MT-SP presenta valores por debajo de las muestras MT-F1 y MT-F2, siendo la MT-F2 la que presenta siempre valores mayores de temperatura superficial tanto en días que la temperatura ambiente sobrepasa los 26°C que cuando se encuentra por debajo de este.

Conclusiones

Las evaluaciones del mortero como de los pigmentos que lo conforman realizada en el desarrollo experimental mediante diversas técnicas analíticas y cuantitativas para definir aspectos ópticos y térmicos del material, de forma general se obtuvieron las siguientes conclusiones:

La caracterización química y morfológica de los pigmentos confirman la composición correspondiente pigmentos orgánicos microencapsulados, con tres componentes principales; Bisfenol A (desarrollador de color), Alcohol Cetílico (solvente) y Poli (Melaninaureaformaleido) como microcápsula.

La caracterización óptica del mortero termocrómico en el rango solar muestra un cambio apropiado de reflectancia en consecuencia del cambio de temperatura, la reflectancia del mortero es mayor a 40°C que a 20°C en rango visible. Esta respuesta óptica es positiva para reducir la temperatura de la superficie en condiciones térmicas dinámicas.

La diferencia de color fue calculada por ΔE en el espacio de color CIELAB, dando como resultado: OP-F1 $\Delta E=14.43$, OP-F2 $\Delta E=17.52$, dato que confirma que el efecto termocrómico propio de los pigmentos está presente en el mortero elaborado.

El espécimen MT-F1 obtuvo temperaturas menores en comparación a uno con propiedades ópticas fijas (MT-SP), a temperatura ambiente mayor a 28°C, con una diferencia máxima 1.5°C presentada el día 3 Octubre 17:42 hrs, en donde MT-SP presento una temperatura superficial de 33.5°C mientras que MT-F1 32.0°C

El espécimen MT-F2 obtuvo temperaturas mayores en comparación a uno con propiedades ópticas fijas (MT-SP), a temperaturas mayores 22°C, con una diferencia máxima 1.9°C presentada el día 7 de octubre 17:02 hrs, en donde MT-SP presento una temperatura superficial de 23.7°C mientras que MT-F2 25.6°C

Con base en el objetivo principal de esta tesis: “Desarrollo de un

mortero termocrómico mediante la incorporación de pigmentos orgánicos para mejoramiento del comportamiento térmico superficial en fachadas arquitectónicas”, se concluye lo siguiente:

La incorporación de pigmentos termocrómicos orgánicos en una mezcla de mortero permitió el desarrollo de un mortero termocrómico cuyo comportamiento óptico confirma el fenómeno de termocrómica del material en función a cambios de temperatura, las diferencias de color fueron cuantificadas por el espacio de medición CIELab, mientras que el comportamiento térmico asociado a la implementación del material en envolventes arquitectónicos confirma que el espécimen MT-F1 presenta temperaturas superficiales menores al de un mortero con propiedades ópticas fijas a temperaturas ambiente mayor a 26°C, mientras que al descenso de la temperatura estos presentan temperaturas superficiales mayores.

Confrontación de la hipótesis, la presente tesis se trabajó bajo la siguiente hipótesis: “El desarrollo de un mortero termocrómico mediante la incorporación de

pigmentos orgánicos y su aplicación en fachadas arquitectónicas, resultará en un material con propiedades ópticas dinámicas en función de la temperatura, contribuyendo al mejoramiento térmico superficial”.

Dicha hipótesis fue evaluada en ambiente exterior teniendo como referencia un material con propiedades ópticas fijas y dos con propiedades ópticas dinámicas relacionados a los dos pigmentos incorporados.

Su comportamiento evaluado muestra que el espécimen MT-F1 el cual pasa de un estado coloreado a uno, presenta temperaturas superficiales menores que el espécimen MT-SP (mortero sin pigmento), cuando la temperatura ambiente sobrepasa los 26°C, esto asociado a la temperatura de cambio del pigmento incorporado. Mientras que cuando la temperatura ambiente desciende, este presenta temperaturas mayores que el espécimen MT-SOP (mortero sin pigmento). Lo que confirma que la reflectancia consecuencia del cambio de coloración en el espectro visible del material, mejora las propiedades térmicas superficiales.

Bibliografía

- Aitken, D., Burkinshaw, S. M., Griffiths, J., & Towns, A. D. (1996). Textile applications of thermochromic systems. *Review of Progress in Coloration and Related Topics*. <https://doi.org/10.1111/j.1478-4408.1996.tb00105.x>
- Anink, D., & Boonstra, C. (1996). *Handbook of Sustainable Building: An Environmental Preference Method for Choosing Materials in Construction and Renovation*. Retrieved from <http://www.amazon.co.uk/Handbook-Sustainable-Building-Environmental-Construction/dp/1873936389>
- Argimón, M., Romero, M., Miranda, P., Mombrú, Á. W., Miraballes, I., Zimet, P., & Pardo, H. (2017). Development and characterization of Vitamin A-loaded solid lipid nanoparticles for topical application. *Journal of the Brazilian Chemical Society*. <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20160276>
- Askeland. (2005). Ciencia de los materiales. *Ciencia e Ingeniería de Los Materiales*. <https://doi.org/10.1017/CB09781107415324.004>
- Barcenás, J. (2016). *Estimación de la temperatura de la superficial de la techumbre en un ambiente solar, por medio de un análisis de regresión lineal múltiple*. (August), 4-7. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4519.7047>
- Burkinshaw, S. M., Griffiths, J., & Towns, A. D. (1998). Reversibly thermochromic systems based on pH-sensitive spiro lactone-derived functional dyes. *Journal of Materials Chemistry*. <https://doi.org/10.1039/a805994b>
- C., A. F. L., Deladino, L., Alba, S. N., & Miriam, N. M. (2011). Encapsulación de compuestos bioactivos con alginatos para la industria de alimentos. *@limentech, Ciencia y Tecnología Alimentaria*, 10(1). <https://doi.org/10.24054/16927125.V1.N1.2012.98>
- Carter, M., & Shieh, J. C. (2010). Guide to Research Techniques in Neuroscience. In *Guide to Research Techniques in Neuroscience*. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-01891-1>
- Caz, L. R. del. (2008). *Montaje de fachadas de hormigón arquitectónico*.

- Chen, Z., Shan, F., Cao, L., & Fang, G. (2012). Synthesis and thermal properties of shape-stabilized lauric acid/activated carbon composites as phase change materials for thermal energy storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 102, 131–136.
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2012.03.013>
- Curia, M. V. (2010). Estudio Físicoquímico y Catalítico del Sistema Mn-O-V. *Tesis Doctoral*.
- Edwards, B., & Hyett, P. (2004). *Guía básica de la sostenibilidad*. Retrieved from <https://www.casadellibro.com/libro-guia-basica-de-la-sostenibilidad/9788425219511/954408>
- Elmowafy, M., Shalaby, K., Badran, M. M., Ali, H. M., Abdel-Bakky, M. S., & El-Bagory, I. (2018). Fatty alcohol containing nanostructured lipid carrier (NLC) for progesterone oral delivery: In vitro and ex vivo studies. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*.
<https://doi.org/10.1016/j.jddst.2018.03.007>
- Fontal, B., Suárez, T., Reyes, M., Bellandi, F., Contreras, R., & Romero, I. (2005). El espectro electromagnético y sus aplicaciones. *Reproducción*.
- Gárate Rojas, I. (1994). Artes de la cal. In *Colección del patrimonio artístico*.
- Gómez, S. A. (2018). *Evaluación y diagnóstico para prevención de patología en fachadas prefabricadas de concreto*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- González Gómez, E. (2006). Guía básica de conceptos de radiometría y fotometría. *Campos Electromagnéticos - Óptica*.
- Houston, E. J. (1871). On the change of color produced in certain chemical compounds by heat. *Journal of the Franklin Institute*.
[https://doi.org/10.1016/0016-0032\(71\)90567-9](https://doi.org/10.1016/0016-0032(71)90567-9)
- Huang, X., Alva, G., Liu, L., & Fang, G. (2017). Microstructure and thermal properties of cetyl alcohol/high density polyethylene composite phase change materials with carbon fiber as shape-stabilized thermal storage materials. *Applied Energy*, 200, 19–27.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.05.074>
- Karlessi, T., Santamouris, M., Apostolakis, K., Synnefa, A., & Livada, I. (2009). Development and testing of thermochromic coatings for

- buildings and urban structures. *Solar Energy*, 83(4), 538–551.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.10.005>
- Kirk- Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. (2000). In *Kirk- Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*.
<https://doi.org/10.1002/0471238961>
- Li, J., Wang, S., Liu, H., Liu, N., & You, L. (2011). Preparation and application of poly(melamineurea- formaldehyde) microcapsules filled with sulfur. *Polymer - Plastics Technology and Engineering*.
<https://doi.org/10.1080/03602559.2010.551389>
- Lopez, O., Carnicero, A., & Ruíz, R. M. (2004). Materiales Inteligentes {(II)} Aplicaciones tecnológicas. *Anales de Mecánica y Electricidad*.
- Lossada, F. (2012). *El color y sus armonias*.
- Martínez Riachi, S., Carreño, C., Constable, L., Tarabaín, P., & Freites, M. (2005). Cristales líquidos: un ejemplo fantástico de aplicación tecnológica de las propiedades de la materia. In *Journal of Chemical Information and Modeling*.
<https://doi.org/10.1017/CB09781107415324.004>
- Pérez Calvo, M. del M. P. (2002). Campos electromagnéticos y efectos biológicos. Retrieved from <https://www.ucm.es/ima/campos-electromagneticos-y-efectos-biologicos>
- Rodríguez, M. E., Ribotta, R. B., & Reinoso, E. (n.d.). *MANUAL DE DISEÑO DE ESTRUCTURAS PREFABRICADAS Y PRESFORZADAS*. 90–123.
- Sanchez, J. (2010). *Panles Prefabricados de Hormigón En Fachadas*.
- Tang, Y., Jia, Y., Alva, G., Huang, X., & Fang, G. (2016). Synthesis, characterization and properties of palmitic acid/high density polyethylene/graphene nanoplatelets composites as form-stable phase change materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*.
<https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.06.049>
- Tong, X. M., Zhang, M., Wang, M. S., & Fu, Y. (2013). Effects of surface modification of self-healing poly(melamine-urea- formaldehyde) microcapsules on the properties of unsaturated polyester composites. *Journal of Applied Polymer Science*.
<https://doi.org/10.1002/app.37711>
- Ullah, R., Ahmad, I., & Zheng, Y. (2016). Fourier Transform Infrared Spectroscopy of “bisphenol A.” *Journal of Spectroscopy*.

<https://doi.org/10.1155/2016/2073613>

- Vakhshouri, A. R., Akif, A., Reyhan, A., Gala, M., & Akif, Q. (2011). Preparation and study of thermal properties of phase change materials based on paraffin-alumina-filled polyethylene. *Journal of Applied Polymer Science*. <https://doi.org/10.1002/app.33268>
- White, M. A., & LeBlanc, M. (1999). Thermochromism in commercial products. *Journal of Chemical Education*. <https://doi.org/10.1021/ed076p1201>
- William, D., & Callister, J. (1995). *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. Reverté,.

Índice de Imágenes

Figura 1. Unidad habitacional en Marsella, Francia. Le Corbusier 1952	20
Figura 2. Museo Internacional del Barroco, Puebla México.....	22
Figura 3. Fachada Liverpool Altabrisa, Tabasco, México	22
Figura 4. Proceso de producción de fachadas prefabricadas. (ANIPPAC)	25
Figura 5. Panel prefabricado Senado de la República y Plaza Mariana Ciudad de México	29
Figura 6. Panel prefabricado. Acuario EXPO 2008 Zaragoza	30
Figura 7. (a) Superficie tratada con chorro de arena ligero. (b) Superficie tratada con chorro de arena intenso.....	31
Figura 8. Acabado de concreto arquitectónico con la técnica de cepillado.....	32
Figura 9. Superficie tratada con ácido muriático.....	32
Figura 10. Espectro electromagnético.....	37
Figura 11. Interacción de la luz con la materia. Propiedades ópticas	38
Figura 12. Clasificación de cuerpos iluminados	38
Figura 13. Refracción de la luz.....	39
Figura 14. Reflexión especular y difusa.....	39
Figura 15. Fenómeno de absorción y reflexión, el color de los materiales.....	40
Figura 16. La óptica de color	41
Figura 17. Colores del espectro	42
Figura 18. Funcionamiento de un espectrofotómetro de reflectancia.....	43
Figura 19. Diagrama de espacios de color (L^* , a^* , b^*).	44
Figura 20. Transferencia de calor por radiación.	47
Figura 21. Clasificación funcional de materiales. Askeland 2005	49
Figura 22. Tipos de cristales líquidos termocrómicos.	54
Figura 23. Los tintes leuco típicos incluyen (a) espirolactonas, (b) fluoranos, (c) espiropirano y (d) fulgidas.....	55
Figura 24. Cristal violeta lactona. En la forma de lactona es incolora, pero está profundamente coloreada cuando está protonada (forma de anillo abierto)	56
Figura 25. Tinta termocromático aplicada al packaging	57
Figura 26. Power Magazine. Guillem Casasús	57
Figura 27. Tazas mágicas, productos termocromáticos comerciales	58
Figura 28. Cristales termocrómicos. Películas delgadas de dióxido de vanadio	58
Figura 29. Pigmentos termocrómicos F1 y F2, TECMA© Comercializadora	63
Figura 30. Microscopio electrónico de barrido S-4800, Hitachi Inc. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja.....	69

Figura 31. Fotografías Microscopio electrónico de barrido pigmento F1 (a) 4.00k, (b) 25.0k, (c) 15.0k	70
Figura 32. Espectro de EDX pigmento F1.....	70
Figura 33. Fotografías Microscopio electrónico de barrido pigmento F1 (a) 4.00k, (b) 25.0k, (c) 25.0k	71
Figura 34. Espectro de EDX pigmento F2.....	71
Figura 35. Difractómetro de rayos X, Bruker D8. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja	72
Figura 36. Difractograma pigmento F1.....	73
Figura 37. Difractograma pigmento F2.....	74
Figura 38. Espectros FT-IR de pigmentos F1y F2	76
Figura 39. Espectros FT-IR de pigmentos F1y F2, rango1700 a 500 nm.....	76
Figura 40. Espectrómetro StellarNet y Esfera integrador Ocean Optics	78
Figura 41. Estándar de reflectancia RS50	78
Figura 42. Estufa de cultivo, P Selecta y Frigorífico Rommer	78
Figura 43. Espectro de reflectancia pigmento F1.....	79
Figura 44. Espectro de reflectancia pigmento F1.....	80
Figura 45. Espectro de reflectancia pigmento OP-F1.....	83
Figura 46. Espectro de reflectancia pigmento OP-F1, cambio de temperatura cíclico 30° c-10° c.....	84
Figura 47. Espectro de reflectancia pigmento OP-F2.....	85
Figura 48. Espectro de reflectancia pigmento OP-F2, cambio de temperatura cíclico 30° c-10° c.....	86
Figura 49. Instrumentos utilizados para la medición de la temperatura superficial.....	87
Figura 50. Vista del patio de maniobras.....	88
Figura 51. Vista aérea ubicación del sitio de experimentación	88
Figura 52. Colocación de muestras para el desarrollo experimental.....	89
Figura 53. Temperatura superficial del periodo de experimentación 3 al 9 de octubre 2018.....	91

Índice de Tablas

Tabla 1. Clasificación del espectro electromagnético en zonas.	36
Tabla 2. Clasificación de materiales inteligentes en función de estímulo y respuesta (sensores)	51
Tabla 3. Composición del cemento portland blanco	63
Tabla 4. Probetas para análisis propiedades ópticas	65
Tabla 5. Probetas para análisis comportamiento térmico.....	66
Tabla 6. FT-IR bandas de absorción de F1 y F2, rango 1700 a 500 nm...	77
Tabla 7. Probetas evaluadas (reflectancia difusa).....	82
Tabla 8. Características de las muestras térmicas	88
Tabla 9. Temperaturas máximas y mínimas registradas.....	92