



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

ANÁLISIS TÉRMICO EN PASTAS ARQUITECTÓNICAS FOTOCROMÁTICAS

TESIS

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

PRESENTA:

ARQ. GABRIEL CASTRO CHAVARRÍA

COMITÉ TUTOR:

DRA. EN ARQ. MARIBEL JAIMES TORRES

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA, UNAM

DRA. EN ARQ. ADRIANA LIRA OLIVER

FACULTAD DE ARQUITECTURA, UNAM

DR. HORACIO CLEMENTE LÓPEZ SANDOVAL

FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM

DR. ALEJANDRO SOLANO VEGA

FACULTAD DE ARQUITECTURA, UNAM

DR. FRANCISCO GONZÁLEZ DÍAZ

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA



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).

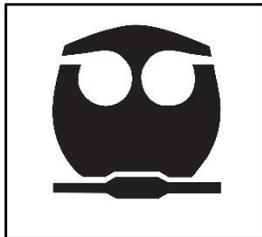
El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición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

“Educar a los niños y no será necesario
castigar a los hombres.”
-Pitágoras

AGRADECIMIENTOS.

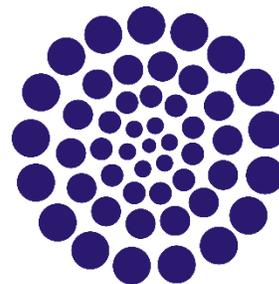


Al Laboratorio de Entornos Sostenibles y a todo su equipo de trabajo por el apoyo durante la investigación. Este trabajo fue posible desarrollarlo gracias al Proyecto CONACyT-SENER 260155, bajo la tutela de la Dra. Adriana Lira Oliver y el Mtro. Sean Rodolfo Sebastián Vilchis Martínez.



Al laboratorio de posgrado de química y a todo su equipo de trabajo por el apoyo durante la investigación bajo la tutela del Dr. Horacio López Sandoval.

A la máxima casa de estudios, la Universidad Nacional Autónoma de México por permitirme ser parte de ella y adquirir conocimientos que me fortalecerán en el campo laboral.



CONACYT

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

RESUMEN

En vista de los aumentos en los niveles de contaminación provocados por el consumo de la energía eléctrica en la vivienda, se tuvo la necesidad de iniciar un proyecto cuya finalidad es reducir el uso de esta energía para los equipos de climatización. Este proyecto considera la fabricación y el análisis térmico de una pasta¹ fotocromática, con propiedades ópticas reversibles en función a los niveles de radiación solar absorbida, utilizado como material de revestimiento exterior para aumentar la temperatura superficial de la envolvente en las épocas frías, generando un confort térmico en los espacios interiores.

Para el diseño de la pasta fotocromática se utilizó un material de matriz cementosa con las siguientes características: CPC 30R B (Cemento Portland Compuesto Blanco) y un pigmento orgánico (compuesto carbónico) fotocromático, que modifica sus propiedades ópticas bajo el estímulo de la radiación solar en la región ultravioleta, considerando su estado basal incoloro (sin ser estimulado) y un color azul en su estado excitado (siendo estimulado). Para su fabricación se utilizaron las bases establecidas en la norma ASTM C979-16, considerando una dosificación del 3% del pigmento fotocromático con relación a la masa del cemento seco.

¹ Powers, T.C., (1958), Estructura y propiedades físicas de la pasta de cemento, fraguado. Vol. 41, Pág. 1.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	9
1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	11
2. OBJETIVOS.....	12
3. JUSTIFICACIÓN	13
4. HIPÓTESIS.....	13
5. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	14
CAPÍTULO I. ESTADO DEL ARTE	15
1.1 Fachadas arquitectónicas.....	16
1.1.1 Fachadas dinámicas y estáticas.....	17
1.2 Materiales inteligentes y su implementación en la arquitectura.	19
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	22
2.1 Confort térmico y sostenibilidad	22
2.2 La envolvente en el edificio como regulador energético.....	23
2.2.1 Envoltentes térmicas.....	23
2.2.2 Comportamiento energético.....	24
2.2.3 Transmitancia térmica.....	24
2.3 La radiación solar como fuente de energía, luz y calor.	25
2.3.1 El espectro electromagnético	26
2.3.2 El espectro solar	30
2.4 Interacción envolvente-radiación solar.....	31
2.4.1 Propiedades termo físicas.....	31
2.4.2 Propiedades ópticas	33
2.5 El cemento.....	34
2.6 La carbonatación en el concreto.	35
2.6.1 Factores que afectan la carbonatación.	35
2.7 Los pigmentos en la construcción.....	36

2.7.2 Porcentaje de pigmento en cementantes.	36
2.8 Materiales cromo activos y pigmentos fotocromáticos.	37
2.8.1 Materiales inteligentes tipo I.....	38
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	42
3.1 Método experimental	42
3.2 Materiales empleados.....	45
3.2.1 Pigmento.....	45
3.2.2 Cemento.	46
3.2.3 Agua.	47
3.2.4 Variables.....	47
3.2.5 Elaboración de muestras (material compuesto).	49
3.3 Técnicas de caracterización.....	54
3.3.1 Termografía infrarroja.	54
3.3.2 Temperatura superficial de contacto.	54
3.3.3 Fuente de calor transitoria.	55
3.3.4 Reflectancia solar.	57
3.3.5 Emitancia térmica.	58
3.3.6 Intemperismo.	58
3.3.7 Punto de fusión.	60
3.3.8 Espectroscopia UV-visible.	62
3.3.9 Análisis elemental.	63
3.3.10 Fluorescencia de Rayos X.	65
3.3.11 Medición y estudio del desempeño térmico del material compuesto de manera experimental.	65
3.3.12 Pruebas mecánicas.....	68

3.3.13 Simulación anual del desempeño térmico de unidad de prueba.....	69
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	72
4.1 Termografía infrarroja.	72
4.2 Temperatura superficial de contacto.	73
4.3 Fuente de calor transitoria.	74
4.4 Reflectancia solar.	76
4.5 Emitancia térmica.	78
4.6 Intemperismo.	79
4.7 Punto de fusión.....	84
4.8 Espectroscopia UV-visible.	87
4.9 Análisis elemental.	89
4.10 Fluorescencia de Rayos X.	90
4.11 Módulo de prueba.	93
4.12 Resistencia a esfuerzos de compresión.	99
4.13 Simulación módulo de prueba.....	100
4.13.1 Localización del módulo de prueba.	100
4.13.2 Descripción del módulo.	101
4.13.3 Descripción de la simulación.....	102
4.13.2 Determinación de los intervalos de confort.....	105
CONCLUSIONES	108
Bibliografía:.....	110
Glosario.....	114
Índice de imágenes.....	117
Índice de tablas.....	121
Índice de gráficas.....	122

INTRODUCCIÓN

La arquitectura y el color han sido siempre importantes para la humanidad, por razones estéticas y culturales. A lo largo de la historia los pigmentos y colorantes han sido los materiales más comercializados entre las civilizaciones. Generalmente los pigmentos son sólidos inorgánicos que finamente dispersados, mezclados con otros componentes, en forma de suspensión son aplicados como recubrimiento sobre diversos materiales de ingeniería, cerámicos, vidrios, metales y polímeros, con el fin de colorearlos.

La mayoría de los óxidos puros utilizados como pigmentos inorgánicos proveen una paleta de colores reducida. Fue por ello por lo que a finales del año 1900 se fabricaron nuevos pigmentos inorgánicos, cuyos colores simulaban los colores de los pigmentos naturales, del tipo de los que están presentes en los minerales. El concepto moderno de síntesis de pigmentos, con fines técnicos, se basa en la preparación de mezclas de compuestos cristalinos que ofrezcan resistencia al ataque químico del vidrio fundido y adecuada estabilidad térmica debido a las altas temperaturas requeridas durante el procesamiento del recubrimiento vítreo.

Los esmaltes cerámicos, además de otorgarle color y decoración al sustrato, deben conferirle un alisado superficial e impermeabilizarlo para facilitar la limpieza, mejorar su resistencia química frente a agentes ácidos y básicos y sus propiedades mecánicas.

Los pigmentos tradicionales están basados en compuestos de metales de transición. Entre los materiales que aportan intensidad de pigmentación y estabilidad como agentes colorantes de cerámicos predominan los óxidos de vanadio, cromo, hierro, cobalto, cobre, oro, uranio, circonio, cadmio, entre otros.

Debido a que algunos de los metales coloreados son esencialmente tóxicos, la búsqueda de nuevos pigmentos más ecológicos es un tema de creciente interés en todo el mundo. Por otro lado, algunos de estos óxidos coloreados, ampliamente utilizados en la fabricación de cerámicos, son escasos y caros por lo cual las industrias han procurado



optimizar su uso racionando la cantidad de pigmento con la finalidad de bajar costos de producción.

En este contexto, desarrollar nuevos pigmentos, menos tóxicos y más baratos, así como también minimizar la cantidad de material, es crucial para reducir costos de producción, ya que, usualmente este es el componente más caro del esmalte. Por lo expuesto, en los últimos años se han estimulado las investigaciones dedicadas a mejorar los sistemas coloreados en la industria de la construcción desde el punto de vista del cuidado del ambiente, reemplazando estos metales o reduciendo su proporción en los esmaltes, con la condición de que mantengan las propiedades de color y que cumplan con los requisitos técnicos y se adecuen a las condiciones medio ambientales. La optimización de los pigmentos significa un aporte a la sustentabilidad en la industria de la construcción.

1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La producción de la energía eléctrica sigue dependiendo primordialmente de combustibles fósiles, siendo los principales el carbón, seguido del gas y los derivados del petróleo. El uso de los combustibles fósiles emite gases de efecto invernadero (GEI), principalmente el dióxido de carbono, que incrementan la temperatura del planeta.

A nivel mundial los edificios son responsables del 40% del consumo anual de energía y hasta un 30% de todos los gases de efecto invernadero (GEI) relacionados con el uso de la energía². En México las edificaciones son responsables del:

- 17% del consumo total de energía.
- 5% del consumo total de agua.
- 25% del consumo total de electricidad.
- 20% de las emisiones de dióxido de carbono.
- 20% de los desechos generados³.

Por otro lado, las estrategias de diseño pasivas para la climatización interior de los espacios se implementan cada vez menos. Esto significa que el uso de sistemas mecánicos es cada vez mayor en nuestro país y, por tanto, la demanda energética.

La envolvente de los edificios ha presentado un papel muy importante en la regulación térmica de los espacios, aprovechando la energía disponible en el medio ambiente. Estas envolventes se han fabricado a lo largo de los siglos con materiales vernáculos, y en la actualidad, de materiales convencionales. Todos estos materiales no “trabajan” con la energía de manera inmediata y localizada, definiendo a los procesos de flujo de calor de una forma no tan eficiente.

² Iniciativa para Edificios Sostenibles y Clima (UNEP-SBCI), Promoviendo políticas y prácticas para edificios y construcciones, UNEP, 2008.

³ Edificación sustentable en América del Norte, Informe del secretariado al consejo conforme al artículo 13 del acuerdo de cooperación ambiental de América del Norte

Las fachadas no interactúan con la energía de manera inmediata, cambiando sus propiedades físicas de manera reversible, y de forma localizada y, por tanto, el intercambio de energía no se lleva a cabo de manera tan eficiente como una fachada dinámica basada en un material inteligente.

Hoy en día, con el problema del calentamiento global tan grave y con la necesidad de ser mitigado de manera urgente, es imperativo reducir la demanda energética de los edificios a nivel global, siendo un nicho de oportunidad la energía destinada a la climatización interior de los edificios. Por tanto, las fachadas dinámicas basadas en materiales inteligentes son objeto de estudio en el presente trabajo.

2. OBJETIVOS

Objetivo general:

- Evaluar el desempeño térmico de una pasta arquitectónica fotocromática implementada en fachadas verticales con orientación sur, para el caso de estudio de la CDMX.

Objetivos específicos:

- Proponer y fabricar una pasta arquitectónica dinámica con base en un material fotocromático para su implementación en fachadas que cambien en respuesta al estímulo de la radiación electromagnética del Sol, contribuyendo a la modulación energética de la cantidad de energía térmica conducida hacia al ambiente interior.
- Analizar y estudiar las propiedades y características físicas, químicas y mecánicas del material.
- Medir y estudiar experimentalmente las ganancias de calor a través de una envolvente vertical con la pasta fotocromática en un módulo construido en la

CDMX.

- Simular el desempeño térmico de un espacio de la envolvente vertical con la pasta fotocromática y evaluar las características con base en las condiciones bioclimáticas de la CDMX.

3. JUSTIFICACIÓN

Las fachadas arquitectónicas son aquellos elementos que sirven como barrera de protección entre el ambiente exterior e interior, las condiciones de aprovechamiento están en función del tipo de material, color, grosor, superficie, orientación y posición. Estas características permiten que tengan ganancias o pérdidas de calor provocados por la radiación solar. Para controlar los espacios interiores de acuerdo con la demanda del usuario, se requiere el uso de energía eléctrica, si se utilizan elementos arquitectónicos en las fachadas que en función del color interactúen con la radiación solar y controlen los espacios interiores de acuerdo con una caracterización térmica, se podrá mitigar el consumo eléctrico en equipos de climatización para calefacción.

4. HIPÓTESIS

Mediante la utilización de pastas fotocromáticas con aplicación en fachadas, permitirá aumentar la temperatura superficial de la envolvente, regulando las condiciones de confort en los espacios interiores de la vivienda para los meses con clima frío en la CDMX. Reduciendo los consumos de energía eléctrica en equipos de climatización para calefacción.

5. PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

- ¿Cómo se mide la eficiencia térmica de una pasta arquitectónica fotocromática?
- ¿Cuál es el cambio de temperatura superficial de la pasta cuando sus propiedades ópticas se modifican?
- ¿Cómo se mide la reflectancia solar en un material con propiedades ópticas reversibles?
- ¿Cuál es la relación que existe entre reflectancia, radiación y aumento de temperatura superficial?
- ¿Cuál es la durabilidad de la propiedad óptica reversible de la pasta fotocromática?
- ¿Cómo se caracteriza químicamente un pigmento fotocromático?
- ¿De qué está compuesto químicamente un pigmento fotocromático?
- ¿En qué rango de la región ultravioleta el pigmento modifica su estructura (color)?
- ¿Cuál es la viabilidad de utilizar una pasta fotocromática?



CAPÍTULO I. ESTADO DEL ARTE



1.1 Fachadas arquitectónicas.

En el campo de la arquitectura específicamente en las fachadas, durante los últimos años se han descubierto nuevos materiales, sin embargo, el diseño de estos no incluye al máximo la utilización de todas sus propiedades térmicas ni el aprovechamiento de los factores medio ambientales del lugar, desaprovechando gran parte de su versatilidad.

Los acontecimientos de crisis energética, cambios climáticos, entre otros se han convertido en temas de gran interés en todos los países y se promueven estrategias, leyes, normas para regular y promover el uso racional y adecuado de las mismas y la utilización de energías limpias y gran parte de ese consumo de energía está relacionada directamente con los muros, cubiertas, puertas y ventanas ya que esta energía se utiliza para acondicionar el espacio al interior en las envolventes que resultan ineficientes que ganan o pierden calor de manera significativa y para adecuar la temperatura al interior de los espacios se recurre al acondicionamiento térmico (ventilación, calefacción, sistemas de enfriamiento). El uso de estos sistemas nos lleva a generar mayores gastos energéticos.

La eficiencia busca retomar y reducir el consumo energético de manera racional que en promedio se consume al realizar alguna actividad, además de ejecutar el mismo trabajo, reduce el consumo o el uso de otras fuentes de energía protegiendo al medio ambiente, convirtiendo al material en un elemento más versátil y renovable.

Nos enfocamos principalmente en el empleo de los concretos arquitectónicos que buscan un aspecto estético dentro de las construcciones ya sea elaborados en sitio o prefabricados, marcan una etapa importante en la evolución de la arquitectura, por su versatilidad para adquirir colores, formas y texturas.

Las superficies tratadas con concretos no requieren acabados adicionales, puesto que sus características otorgan durabilidad y resistencia.

Se denominan también como materiales compuestos ya que entran en la incorporación de 2 o más elementos para crear uno, sin alterar sus propiedades mecánicas. Estos materiales nacen de la necesidad de obtener innovaciones que combinen sus propiedades, con el objetivo de brindar mayor beneficio al usuario.

1.1.1 Fachadas dinámicas y estáticas.

La fachada dinámica es un elemento con una respuesta inmediata (segundo a segundo) que interactúa bajo un estímulo y genera una respuesta, proporcionando el máximo confort y el mínimo consumo de energía en cada momento del día. Se puede deducir que las fachadas dinámicas por su versatilidad tienen las siguientes características importantes:



Figura 1. Fachada dinámica - Kiefer Techni Showroom Bad Gleichenberg, Austria. Paneles abiertos para la entrada de luz.



Figura 2. Fachada dinámica - Kiefer Techni Showroom Bad Gleichenberg, Austria. Paneles cerrados evitan la entrada de luz.

- Rápida. Es la reacción o respuesta en el instante que la fachada se adapta cada segundo a todos los estímulos provocados por los factores climáticos exteriores y a las necesidades que el usuario requiere.

- Versátil. La fachada tiene la propiedad de cambiar algunos componentes por medio de una programación previa sin necesidad de realizar modificaciones en su estructura. Es adaptable a cambios futuros de los espacios.
- Integrada. Se pueden acoplar a la climatización en un sistema de autocontrol para la vivienda reduciendo la manipulación de una persona.

Los beneficios de la fachada dinámica:

- Optimizar la luz natural reduciendo el uso de luz artificial.
- Reducir el consumo de climatización artificial. (Aire acondicionado y calefacción).
- Mejorar el confort térmico interior.
- Reducir las emisiones de dióxido de carbono.

Por otra parte, las fachadas estáticas son aquellas envolventes que no cuentan las características de respuesta bajo todos los estímulos medio ambientales y que solo se acoplan bajo ciertas características limitadas para obtener un beneficio. Esta condicionante genera desventajas ya que su eficiencia es restringida bajo factores como las estaciones del año, la radiación solar, el viento, la orientación y no cuentan con la peculiaridad de adaptabilidad bajo los cambios naturales.

El uso de estos elementos estáticos provoca que el usuario busque las condiciones de confort por medio de climatización artificial, adquiriendo equipos con precios altos y sobre todo consumos excesivos de energía eléctrica que a la larga provocan grandes impactos en la contaminación del medio ambiente.

1.2 Materiales inteligentes y su implementación en la arquitectura.

Denominamos “materiales inteligentes”, término derivado del inglés “smart materials”, a aquellos que, ante un estímulo externo, muestran una respuesta, como consecuencia de las propiedades particulares de los mismos. Estas respuestas pueden ser un cambio de forma, generación de electricidad, cambio de color, volumen, opacidad, campo magnético, etc. El término “inteligente” se usa como la propiedad de esos materiales de responder o de mostrar una respuesta, que otros materiales convencionales no proporcionarían⁴.

Debido al gran paso que la tecnología demuestra día a día y la necesidad que demanda el uso de nuevos materiales adaptables al medio ambiente, surgen nuevas aplicaciones que aprovechan las condiciones para poder satisfacer a todos los usuarios.

Las aplicaciones van de la mano con el tipo de factores que incidan sobre este. Dentro de la arquitectura las aplicaciones comienzan con el objetivo de satisfacer la necesidad del usuario, buscando siempre el mitigar el consumo de la energía generado por la quema de los combustibles fósiles. Los materiales inteligentes tienen la finalidad de ser adaptables para las edificaciones aprovechando las fuentes naturales como el sol, el viento y el agua de la lluvia.

⁴ Callejas Ortego, M. A. (2015). Análisis y estudios metodológicos de las aplicaciones de los materiales con memoria de forma y super elasticidad en arquitectura y urbanismo (Doctorado). Escuela Técnica Superior de Arquitectura Departamento de estructuras de la edificación e ingeniería del terreno Universidad de Sevilla.

Instituto del Mundo Árabe - Jean Nouvel.

Uno de los elementos más notables de este edificio es la fachada, compuesta de 240 paneles cuadrados que agrupan 30,000 pequeños diafragmas mecánicos de acero que, conectados a sensores fotosensibles, se abren y cierran de acuerdo con la intensidad lumínica, y cuya forma semeja los "mashrabiyya", patrones encontrados frecuentemente en la arquitectura islámica. Estos dispositivos son una representación abstracta, pero al mismo tiempo evidente que se asocia a la filigrana usada en construcciones musulmanas, la cual permite ventilación y vistas, pero mantiene la privacidad de los recintos⁵.



Figura 3. Fachada Instituto del Mundo Árabe - Jean Nouvel.



Figura 4. Vista exterior Instituto del Mundo Árabe - Jean Nouvel.

⁵ Archdaily: <https://www.archdaily.mx/mx/02-265617/clasicos-de-arquitectura-instituto-del-mundo-arabe-jean-nouvel>.

Concreto biológico:

El Grupo de Tecnología de Estructuras de la Universidad Politécnica de Cataluña, encabezado por el investigador Antonio Aguado, ha desarrollado y patentado un nuevo concreto biológico para la construcción de fachadas vivas, en las que proliferen musgos y líquenes. Las ventajas de este material, desde el punto de vista medioambiental, estético y térmico, son varias: reduce las emisiones de CO2 a la atmósfera, mejora la estética de las ciudades e incrementa la eficiencia térmica de las construcciones. Este grupo ha desarrollado y patentado este tipo de concreto biológico, con capacidad para que crezcan en él organismos pigmentados, de manera natural y acelerada. El material, que está ideado para fachadas de edificios u otras construcciones en climas mediterráneos; ofrece además ventajas medioambientales, térmicas y ornamentales respecto a otras soluciones de construcción similares⁶.



Figura 5. Concreto biológico en fachadas, generación de musgos.



Figura 6. Simulación de una fachada vegetal en el Centro Cultural Aeronáutico de El Prat de Llogregat.

⁶ Vidaud Quintana Eduardo. (2014) Posibilidades del concreto. <http://imcyc.com/revistacyt/pdf/enero2014/posibilidades.pdf>

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 Confort térmico y sostenibilidad

El confort térmico, es aquel que conduce directamente a espacios que optimizan el bienestar y rendimiento de las personas que lo ocupan, donde se relaciona el mal impacto que tiene la mala implementación de las soluciones pasivas ya que “muchas encuestas aplicadas a edificios con características de confort térmico reflejan que las condiciones ambientales no son a menudo satisfactorias, lo que sugiere que se debe implementar nuevos métodos y estrategias que logren garantizar dichos ambientes”, por tal motivo conceptualmente según ASHRAE 55-2017⁷ da el significado de confort térmico en el que se afirma que “ el confort se da en el momento que el cuerpo mantiene rangos estrechos en las variaciones de temperatura, humedad en la piel y un esfuerzo fisiológico mínimo” por tal motivo es necesario implementar estrategias en las que se garanticen espacios con variaciones climáticas mínimas⁸.

Es necesario considerar una planeación estratégica con la finalidad de alcanzar metas, estas deben de contener los procesos adecuados y desarrollo que resuelvan los problemas medio ambientales. Durante el proceso de diseño se deben de incluir todos los estudios y análisis del sitio, que van a regir el proyecto tanto en forma y material, determinando los indicados para dicha zona.

El impacto ambiental es definido como aquellas afectaciones debido a actividades que generan algún tipo de modificación en el medio ambiente. Existen planes de mitigación del impacto donde se realizan evaluaciones desde el inicio de los trabajos hasta la conservación y mantenimiento.

⁷ ESTÁNDAR ANSI / ASHRAE 55-2017 - “Condiciones ambientales térmicas para la ocupación humana”.

⁸ Cuesta Ríos, K. M. (2018). Estrategias de diseño sostenible a partir de la noción de confort térmico (Maestría). Universidad católica de Colombia Facultad de Diseño.

La deficiencia de estos planes de mitigación es que durante el proceso de diseño no consideran el impacto a largo plazo de los materiales, donde el usuario intenta lograr el confort por medios artificiales, y por lo tanto se refleja en un aumento del consumo eléctrico.

2.2 La envolvente en el edificio como regulador energético.

La envolvente o fachada es el primer elemento del edificio en contacto con el exterior. Las fachadas actuales o tradicionales se han adaptado al lugar y al entorno arquitectónico, aunque respecto al clima del lugar son fachadas que no responden a las condiciones medio ambientales.

La vivienda se basa en la creación de materiales innovadores aplicables en la construcción donde se reflejen sus beneficios, aportes económicos y ambientales en general, desde este punto de vista se podrían evaluar diferentes componentes tales como: pruebas de aire, estudio termo gráfico, condiciones ambientales internas y externas, consumo de gas, consumo y generación de electricidad, sistema bioclimático, emisiones de dióxido de carbono operacional, consumo de agua⁹.

2.2.1 Envoltentes térmicas.

Al conjunto de elementos estructurales y estéticos tales como muros de mampostería, columnas, cadenas, pastas, se le denomina sistema constructivo. Cada sistema tiene

⁹ El desempeño monitoreado de cuatro casas sociales certificadas según el Código para Viviendas Sostenibles Nivel 5. Sodagar & Starkey 2016.

diferente capacidad térmica que esta relacionada con el tipo de material, grosor, así como la ubicación, orientación, inclinación y elevación del sitio.

La fabricación de materiales innovadores térmicamente y su correcta utilización, genera los niveles de confort deseados por el usuario, mitigando el uso de sistemas mecánicos que utilizan energía eléctrica proveniente de la quema de combustibles.

2.2.2 Comportamiento energético.

La demanda de la energía eléctrica es mas frecuente durante los meses con clima más extremo, pudiéndose encontrar dos casos similares, cuando hay mas calor y cuando las temperaturas son mas bajas. Para ambos escenarios la utilización de la energía es importante para que el usuario busque el confort térmico por medio de equipos de climatización ya sea para calefacción o enfriamiento. Esta demanda se ve afectada en gran medida por el sistema constructivo de la vivienda.

2.2.3 Transmitancia térmica.

Por lo general las condiciones del medio ambiente exterior no son adecuadas desde el punto de vista del confort térmico y, por lo tanto, los muros que forman la envolvente de un edificio se comportan como un filtro entre el medio ambiente exterior y el espacio interior.

La radiación UV que tiene longitudes por debajo de los 300 nanómetros se utilizan por medio de lámparas controladoras para limpiar superficies, ya que altera y provoca mutaciones en el ADN de todo agente microbacterial.

Las longitudes de onda UV que llegan a la tierra por medio del Sol se presentan de una manera controlada, siendo la capa de ozono el factor fundamental para controlar las diferentes frecuencias UV, si no existiera un elemento regulador, todos los niveles de radiación llegarían a los seres vivos y provocarían serias afectaciones.

Los rayos ultravioletas se componen por otros tipos de rayos:

- a) Radiación ultravioleta A (rayos UVA) Según Floria, (2007), las longitudes de las ondas más largas (315- 400nm), son relativamente inofensivas y pasa casi en su totalidad a través de la capa de ozono, causan el bronceado rápido, así como el envejecimiento y las arrugas en la piel.
- b) Radiación ultravioleta B (rayos UVB) Según Floria, (2007), las longitudes de ondas medianas (280- 315nm) son menos letales que las UVC pero peligrosa y puede acarrear daños a la salud pública y al medio ambiente. Esta es absorbida en su mayor parte por la atmosfera.
- c) Radiación ultravioleta C (rayos UVC) Según Floria, (2007), las longitudes de la onda más cortas (100- 280nm), es letal para todas las formas de vida y es bloqueada casi por completo en la capa de ozono¹⁰.

2.3 La radiación solar como fuente de energía, luz y calor.

La radiación solar se define como la transferencia de energía por ondas electromagnéticas, se produce directamente desde la fuente hacia afuera en todas las direcciones. La radiación es un proceso de transmisión de ondas o partículas a través del espacio emitidas por el Sol. El Sol es una estrella que se encuentra a una temperatura media de 5780 K compuesta esencialmente por Hidrógeno (74 % en masa y 92 % del

¹⁰ Rodríguez, Ordoñez Freddi Rolando (2015). Influencia de la radiación solar en la salud de las personas en la Ciudad de Moquegua. (Tesis para obtener el grado de maestra en ciencias). Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann-Tacna.

volumen) y Helio (24,5 % en masa y 7 % del volumen), a lo que se añaden pequeñas trazas de elementos pesados como Hierro, Níquel, Oxígeno, Silicio, Azufre, Magnesio, Carbono, Neón, Calcio y Cromo, en cuyo interior tienen lugar una serie de reacciones de fusión nuclear que producen una pérdida de masa que se transforma en energía. Esta energía liberada del Sol se transmite al exterior mediante la radiación solar.¹¹

La energía liberada por un gramo de hidrogeno equivale a 250 millones de kwh de energía. Si esto se transforma en energía eléctrica podría satisfacer los requerimientos eléctricos de más de 130 mil viviendas (con un promedio de 4 integrantes por familia) durante un año. La mayor parte de la energía solar es reflejada hacia el espacio por las nubes, el factor más importante para determinar el total de la radiación que alcanza la superficie de la Tierra es el espesor de la atmosfera que debe atravesar para llegar a la superficie¹².

La radiación solar que llega en contacto con la tierra se divide de dos maneras, la primera directa como su nombre lo indica es la que no tiene interferencias en su trayectoria que desvíen sus longitudes de onda y la difusa que vienen de los objetos que interfieren en su trayectoria. A la suma de estas dos raciones se le conoce como radiación global. Existen ciertos factores que modifican el contacto entre la radiación y una superficie como el ángulo de incidencia.

2.3.1 El espectro electromagnético

Las cargas eléctricas producen ciertos polos eléctricos, estas mismas cargas debido a su movimiento generan polos magnéticos y eléctricos. Las modificaciones en estos polos

¹¹ Bachiller, R. (2018). El sol: nuestra estrella, nuestra energía. Observatorio Astronómico Nacional.

¹² Maldonado Sánchez, L. Y. (2018). Irradiación global en planos verticales para aplicación arquitectónica (Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, Programa de maestría y doctorado en arquitectura.

generan la frecuencia electromagnética, de esta manera la radiación consiste en movimientos perpendiculares con un polo magnético y otro eléctrico (ver figura No.7). Esta frecuencia transporta energía de través de un vacío de un lado a otro, moviéndose a la velocidad de la luz.

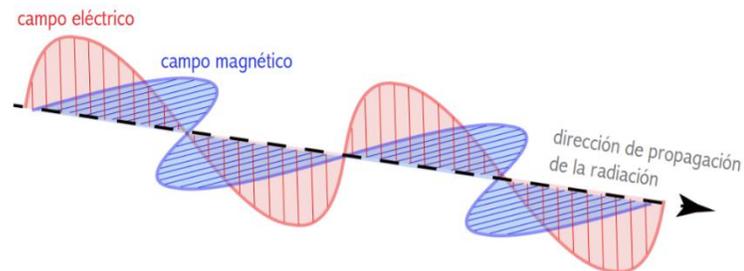


Figura 7. Representación gráfica de una onda electromagnética. Laboratorio de Entornos Sostenibles, Facultad de Arquitectura, UNAM.

Las distintas ondas electromagnéticas están compuestas por dos partes: las crestas y los valles. La separación entre las dos crestas y los valles es la medida de una longitud de onda (ver figura No. 8).

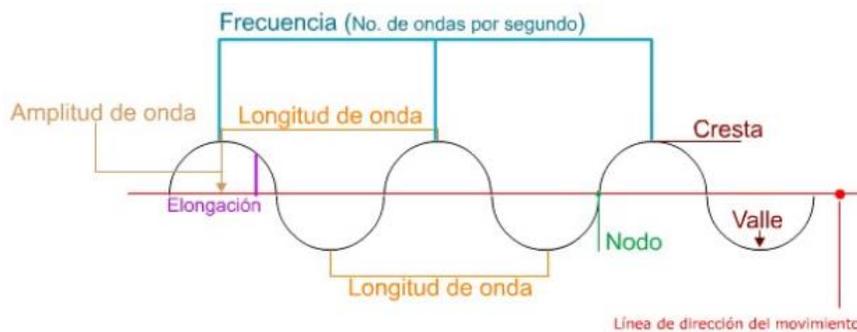


Figura 8. Componentes y estructura de una onda electromagnética. Referencia: http://uapas1.bunam.unam.mx/ciencias/efecto_doppler/

El conjunto de ondas que forman el espectro electromagnético se divide en distintos rangos de acuerdo con la dimensión de cada uno de sus componentes mencionados. La clasificación de acuerdo con el tamaño descendiente se puede ordenar de la siguiente manera:

- Ondas radioeléctricas.
- Microondas.
- Radiación infrarroja.
- Espectro visible.
- Radiación ultravioleta.
- Rayos X.
- Rayos gamma.

Ondas radioeléctricas (1 m – 10 km).

Las ondas de radio pueden ser creadas de manera natural por fenómenos naturales tales como relámpagos, o por objetos astronómicos. También pueden ser generadas de manera artificial y son utilizadas para comunicaciones radio fija y móvil, radiodifusión, radar y otros sistemas de navegación, satélites de comunicaciones, redes telemáticas y otras muchas aplicaciones¹³.

Microondas (1mm-1m).

La radiación microonda genera vibraciones en las moléculas, lo que produce calor. Constituyen el segmento superior del espectro radioeléctrico. Habitualmente se consideran microondas aquellas ondas radioeléctricas entre 1 y 300 GHz¹⁴.

Radiación Infrarroja (780 nm - 1 mm).

La radiación infrarroja es denominada también radiación térmica ya que cualquier cuerpo a una temperatura mayor a 0 °K (cero absoluto -273,15 °C) la emite. En general, la radiación infrarroja se asocia con el calor, ya que es producida por la temperatura de los cuerpos y es un tipo de radiación no ionizante¹⁵.

¹³ Ellingson, Steven W. (6 de octubre de 2016). Radio Systems Engineering (en inglés). Cambridge University Press. ISBN 9781316785164

¹⁴ Gigahertz: equivale a mil millones de hertz (1,000,000,000).

¹⁵ Luque, Ordoñez Javier. Espectro electromagnético y espectro radioeléctrico.

Espectro visible (400-780 nm).

La radiación que se puede nombrar como visible se encuentra en una frecuencia de 400 a 780 nm, ya que el ojo humano es capaz de percibir estas frecuencias y asignar a cada rango lo que conocemos como color.

Radiación ultravioleta (10-400 nm)

Se encuentra la radiación UV y su principal fuente es el Sol. Este tipo de radiación es muy energética y puede provocar daños o mutaciones en el ADN.

Rayos X (10^{-11} - 10^{-8}).

La diferencia fundamental con los rayos gamma (γ) es su origen: los rayos gamma (γ) son radiaciones de origen nuclear, mientras que los rayos X surgen de fenómenos extra nucleares, a nivel de la órbita electrónica, fundamentalmente producidos por desaceleración de electrones. Así, los rayos X se generan cuando un haz de electrones que viajan a gran velocidad es frenado bruscamente al chocar con un obstáculo. La pérdida energética de éstos se convierte en la energía de los rayos X. Conforman una radiación ionizante, ya que al interactuar con la materia producen la ionización de los átomos de la misma, originando partículas con carga (iones)¹⁶.

Rayos gamma (10^{-12} – 10^{-11}).

La radiación γ es un tipo de radiación electromagnética (por tanto, formada por fotones), producida generalmente por procesos subatómicos como la aniquilación de un par positrón-electrón (desexcitación de un nucleón de un nivel o estado excitado a otro de menor energía) o por elementos isótopos radiactivos¹⁷.

¹⁶ Luque, Ordoñez Javier. Espectro electromagnético y espectro radioeléctrico.

¹⁷ Luque, Ordoñez Javier. Espectro electromagnético y espectro radioeléctrico.

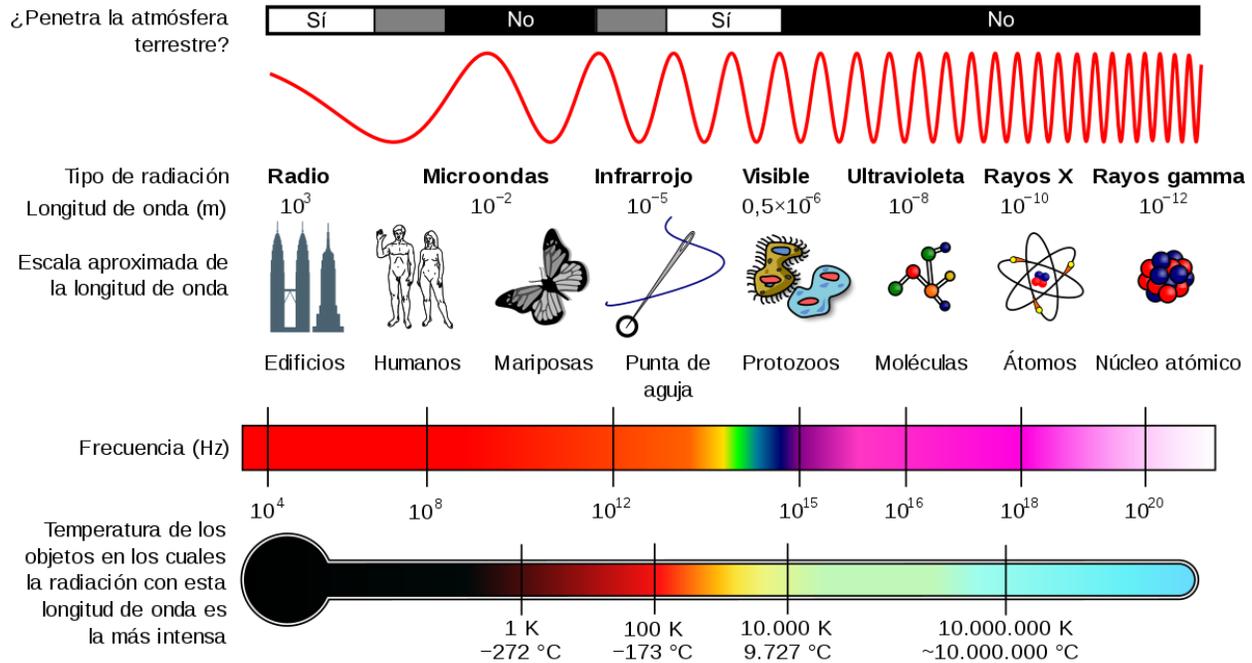


Figura 9. Diagrama del espectro electromagnético, mostrando el tipo, longitud de onda con ejemplos, frecuencia y temperatura de emisión de cuerpo negro.

Referencia: https://es.wikipedia.org/wiki/Espectro_electromagn%C3%A9tico

2.3.2 El espectro solar

El espectro solar en su modo ondulatorio está formado por ondas electromagnéticas. El 99% de la radiación emitida por el Sol está entre las longitudes de 150 a 4000 nm. La atmósfera es opaca a toda radiación infrarroja de longitud de onda superior a los 24 000 nm; de ahí que la Tierra sufra del efecto invernadero, un proceso natural en nuestro planeta. La interacción de las ondas electromagnéticas con la materia se entiende a través del fotón. De acuerdo con las energías de los fotones, la radiación solar puede ionizar un átomo, excitar electrones, dissociar moléculas o hacerlas vibrar. La región del espectro que hace vibrar las moléculas está en la región de 1 000 a 50 000 nm. La vibración de las moléculas se transforma en calor. Por eso la radiación solar en la región del infrarrojo es la que calienta¹⁸.

¹⁸ Lira Oliver Adriana. Radiación solar. Comprensión del espectro electromagnético en la región del espectro solar. (Práctica de Laboratorio). Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Arquitectura.

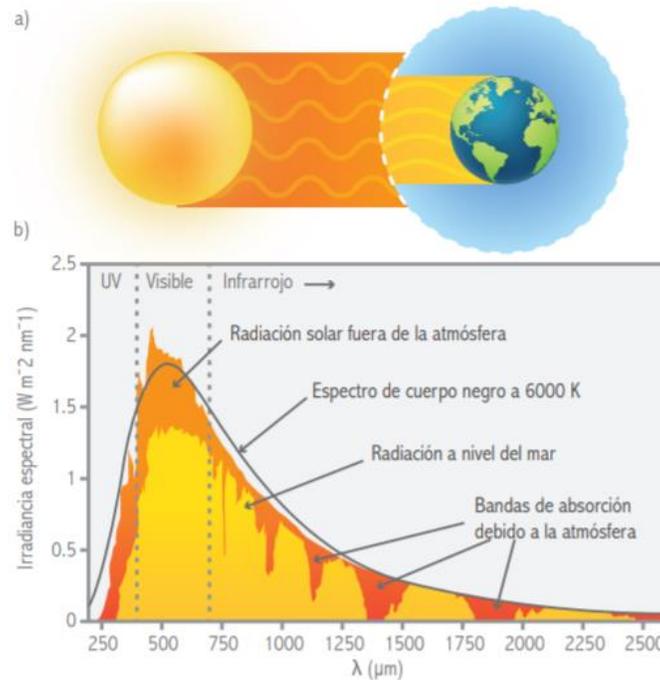


Figura 10. Representación gráfica del proceso de absorción de la radiación solar debido a las moléculas de aire. Laboratorio de Entornos Sostenibles, Facultad de Arquitectura, UNAM.

2.4 Interacción envoltante-radiación solar.

2.4.1 Propiedades termo físicas

Por “propiedad térmica” se entiende que es la respuesta de un material con la aplicación de calor. A medida que un sólido absorbe energía en forma de calor, su temperatura y sus dimensiones se modifican. La selección de materiales para elementos que estarán expuestos a temperaturas altas o bajas en relación con el medio ambiente y a cambios de temperatura, requieren que el especialista tenga conocimientos del material. El calor específico, la conductividad térmica y la densidad son propiedades intrínsecas de cada material que se relación internamente.

El calor específico.

Si una cantidad de calor ΔQ produce un cambio ΔT en la temperatura del cuerpo, su capacidad calorífica se define por:

$$\text{Capacidad calorífica} = \Delta Q / \Delta T$$

La unidad de la capacidad calorífica en el Sistema Internacional es el J/K o J/°C. La cantidad de calor ΔQ necesaria para producir un cambio ΔT en la temperatura es proporcional a la masa m de la muestra y a ΔT (para ΔT pequeña); es decir, depende de la sustancia. Estos hechos pueden incorporarse en la ecuación [Benson H., 1996]:

$$\Delta Q = mc\Delta T$$

en donde c es el calor específico del material. La ecuación anterior se transforma en

$$c = \frac{1}{m} \frac{\Delta Q}{\Delta T}$$

Que muestra que el calor específico es la capacidad calorífica por unidad de masa. Su unidad en el Sistema Internacional es J/kg-K o J/kg-°C.¹⁹

Conductividad térmica.

Es la capacidad que tiene un material de transferir el calor en su cuerpo sólido. También se puede definir como la medida para transferir el calor a través del sistema constructivo, conocido como valor k^{20} .

Densidad.

Se define como la magnitud de masa por unidad de volumen en una sustancia, su unidad de medida es kg/m³ (kilogramo por metro cúbico). El valor de la conductividad térmica depende de la densidad del material.

¹⁹ Chávez, Galán Jesús (2009). Evaluación experimental de propiedades térmicas de materiales de construcción nacionales y desarrollo de ventanas ahorradoras de energía. (Tesis para obtener el grado de Doctor). Universidad Nacional Autónoma de México.

²⁰ El Kelvin (K) es la unidad de temperatura que tiene el punto cero en -273 grados Celsius, el cero absoluto.

2.4.2 Propiedades ópticas

Las características ópticas se determinan principalmente por dos factores fundamentales: el primero es la incidencia de la luz y el segundo el tipo de material. Regularmente se pueden definir como las propiedades que se perciben con el sentido de la vista. La clasificación de estos materiales puede ser de la siguiente manera:

- **Materiales transparentes:** Aquellos en los que el ojo humano es capaz de ver a través de todo el cuerpo del material con claridad y la luz los atraviesa.
- **Materiales opacos:** En comparación con los transparentes, en los opacos el ojo humano no es capaz de distinguir objetos viendo a través de su cuerpo y la luz tampoco los atraviesa.
- **Materiales translúcidos:** A diferencia de los dos anteriores, la luz atraviesa medianamente pero el ojo humano no es capaz de percibir con claridad a través del cuerpo del material.

Las propiedades ópticas que se observan tanto en materiales opacos, translúcidos y transparentes son la reflectancia, absortancia y transmitancia. A continuación, se describen:

- **Reflectancia:** Es la relación entre la radiación que refleja una superficie y la radiación total que incide completamente. Los valores se encuentran entre el rango de 1 y 0. 0 indicando el valor mínimo para una superficie que absorbe completamente la radiación y que no la refleja y el valor 1 para las superficies que reflejan el máximo de la radiación.
- **Transmitancia:** Es la cantidad de radiación electromagnética que puede atravesar un cuerpo, cierta longitud de onda absorbe el material y otra restante lo atraviesa. Los valores de transmitancia pueden ir de 0 a 1, el primer valor 0 en caso de que no pase la luz y el valor 1 cuando la luz se transmite completamente.

- Absortancia: Es la característica de un material que determina la cantidad de radiación que puede absorber. Los factores fundamentales que aumentan o disminuyen gradualmente estos valores son el color y el tipo de acabado.

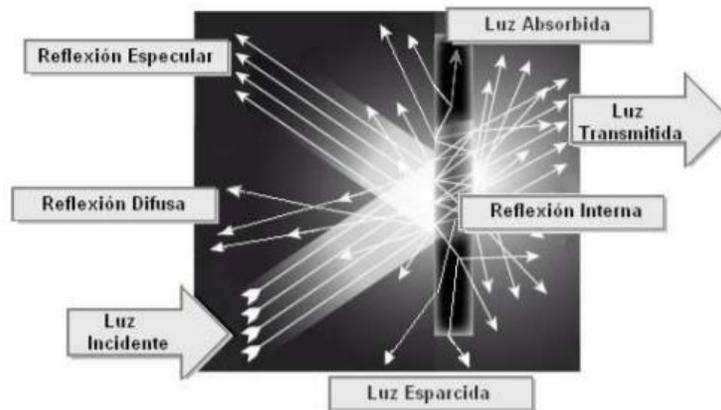


Figura 11. Fenómeno de interacción entre la luz y un material.
Fuente: Keiman, Freire Ana C. (2011). Propiedades ópticas de polímeros aplicadas a pinturas decorativas. (Tesis para obtener el grado de maestro). Universidad Nacional Autónoma de México.

2.5 El cemento.

El cemento es un material inorgánico finamente pulverizado, de color gris o blanco que, al agregarle agua, ya sea sólo o mezclado con arena, grava u otros materiales similares, tiene la propiedad de fraguar y endurecer incluso bajo el agua, en virtud de reacciones químicas durante la hidratación y que una vez endurecido, conserva su resistencia y estabilidad²¹.

²¹ Montalván Luna, R. I., Suárez Mora, D. L., & Téllez Linares, A. E. (2010). Estudio y fabricación normativa de la fabricación del cemento (Licenciatura). Instituto Politécnico Nacional.

2.6 La carbonatación en el concreto.

La carbonatación es un proceso químicamente normal, que afecta a los elementos de concreto principalmente a los que se encuentran expuestos a la intemperie por el dióxido de carbono (CO_2). La carbonatación en el concreto es la pérdida de pH que ocurre cuando el dióxido de carbono atmosférico reacciona con la humedad dentro de los poros del concreto y convierte el hidróxido de calcio con alto pH a carbonato de calcio, que tiene un pH más neutral. ¿Por qué es un problema la pérdida de pH? Porque el concreto, con su ambiente altamente alcalino (rango de pH de 12 a 13), protege al acero de refuerzo ahogado contra la corrosión. Esta protección se logra por la formación de una capa de óxido pasivo sobre la superficie del acero que permanece estable en el ambiente altamente alcalino. Esta es la misma capa pasivadora que atacan los cloruros cuando alcanzan el acero de refuerzo expuesto a sales descongelandes y ambientes marinos²².

2.6.1 Factores que afectan la carbonatación.

Los niveles altos de carbonatación dependen de varios factores, principalmente el contenido de humedad y la permeabilidad del concreto. El concreto permeable se carbonatará rápidamente. Muchos años de protección contra la carbonatación pueden sumarse al concreto reforzado si los constructores simplemente siguen las prácticas estándar para producir concreto de baja permeabilidad. Éstas incluyen relaciones bajas de agua/cemento, compactación apropiada por vibración, uso de puzolanas tales como ceniza volante o humo de sílice y curado apropiado. Todas estas prácticas reducen la permeabilidad del concreto y hacen más difícil para que el dióxido de carbono se difunda a través de él²³.

²² Fuente: <http://www.imcyc.com/revista/2000/dic2000/carbonatacion.htm>.

²³ Fuente: <http://www.imcyc.com/revista/2000/dic2000/carbonatacion.htm>.

2.7 Los pigmentos en la construcción.

De acuerdo con su composición química, los pigmentos presentan una amplia variedad de colores, los cuales provienen de óxidos de hierro y cromo. En los pigmentos de óxido de hierro, los más conocidos se encontrarán en diferentes tonos y colores. Así, los óxidos de hierro rojo variarán de tonalidad desde el bermellón hasta el violeta, mientras que los otros óxidos de hierro proporcionan negro o amarillo. El óxido ferroso color rojo, es el más estable de todos los diferentes grados de oxidación del hierro. Con la excepción de los pigmentos ocres y sienas, todos los pigmentos, óxidos de algún mineral, son, en principio, de composición uniforme. A esto hay que añadir dos excepciones: los colores verdes y azules. El color verde viene, en su mayor parte, del óxido de cromo. No obstante, complejas formulaciones en las que interviene el cobalto, níquel, zinc, titanio y aluminio, se utilizan para obtener un verde más luminoso y estable a la luz. El color azul, derivado del cobalto, puede presentar incompatibilidad con la pasta de hormigón, por lo que en su situación se utiliza la ftalocianina²⁴ con óxidos de cobre²⁵.

2.7.2 Porcentaje de pigmento en cementantes.

El pigmento se adiciona al cementante con relación al peso seco del cemento. Dependiente de la cantidad agregada, el acabado tiene un color más intenso cuando es mayor el porcentaje. El acabado final no es completamente uniforme, y su capacidad para que el color sea integral, depende del proceso de mezclado. Así mismo los diferentes pigmentos puros mantienen un color que a simple vista no se perciben igual, cuando ya son parte de un material compuesto.

²⁴ Compuesto de color verde azulado formado por la unión de cuatro grupos isoindol mediante cuatro átomos de nitrógeno.

²⁵ Castro Guiachetti Marcela. (2005). Hormigón con concreto de color. (Tesis de licenciatura). Universidad Austral de Chile, Facultad de CS de la ingeniería.

El porcentaje del pigmento se puede utilizar hasta en un 10%, de acuerdo con la normatividad aplicada en la investigación, ya que puede afectar la resistencia del cemento si se utilizan cantidades mayores.

Normalmente los porcentajes utilizados en el concreto son cantidades entre el 2% y 6%, también es importante recalcar que la intensidad del color puede variar dependiendo el color del cemento.

2.8 Materiales cromo activos y pigmentos fotocromáticos.

Hoy en día, la palabra fotocromático o fotocromático ha sido ingresado en varios diccionarios. Se deriva de las palabras griegas (fotos) y (croma) significa luz y color, respectivamente. Una definición simple del fotocromismo es propiedad de sufrir un efecto inducido por la luz, siendo un cambio reversible de color basado en una reacción química²⁶.

Además de estos objetos que han existido por mucho tiempo, la era digital ha ampliado enormemente los campos, donde los materiales fotocromáticos pueden desempeñar un papel. El ancho y el interés actual es transmitir, bloquear y almacenar datos digitales y las propiedades ópticas se utilizan para leer, al igual que en los sistemas fotocromáticos²⁷.

El reflejo de luz o cambio de transmisión es la propiedad representativa modificadora en el proceso fotocromático. En cuanto al color, en los sistemas fotocromáticos, tradicionalmente, la luz se utiliza no solo para inducir el cambio sino también para revelar el estado del sistema en un momento dado. Otras propiedades relacionado con la luz son el índice de refracción.²⁸

²⁶ Hoffmann, H.J. (1999) Organic Photochromic and Thermochemical Compounds, vol. 2, Plenum, New York, p.822.

²⁷ Crano, J.C., Kwak, W.S., and Welch, C.N. (1992) Applied Photochromic Polymer Systems, Blackie, Glasgow.

²⁸ (a) Suzuki, Y. (2002) Kinosei Inki no Saishin Gijutsu, 63;(b) Suzuki, Y. (2002) Chem. Abstr., 137, 280630c.

2.8.1 Materiales inteligentes tipo I

Los materiales se pueden dividir de acuerdo con el estímulo-reacción en inteligentes tipo I. Tienen la peculiaridad de modificar su estructura molecular al momento de ser estimulados con una señal y en el momento que esta señal es retirada, regresa a su estado basal. De acuerdo al tipo de señal que los estimula, se pueden clasificar de la siguiente manera:

- **Fotocromáticos:** materiales que cambian de color cuando se exponen a la radiación Ultravioleta.
- **Termocrómicos:** materiales que cambian de color debido a fluctuaciones de temperatura.
- **Mecanocrómicos:** materiales que cambian de color debido a tensiones y/o deformaciones impuestas.
- **Quimiocrómicos:** materiales que cambian de color cuando son expuestos a ambientes químicos específicos.
- **Electrocrómicos:** materiales que cambian de color cuando se aplica voltaje.

Los materiales que cambian sus propiedades ópticas (color), tiene su principio en la radiación absorbida y reflejada del espectro visible. Nuestra percepción del color depende de ambos factores externos (luz y la naturaleza del ojo humano) y factores internos como los mencionados anteriormente. Una explicación del comportamiento sería: el color del material percibido por el ojo humano es el complemento al absorbido. Tomando como ejemplo un material que es rojo, absorbería la radiación del espectro visible correspondiente al verde y al azul (490 nm aproximadamente) donde solo reflejaría el rojo (620 nm aproximadamente).

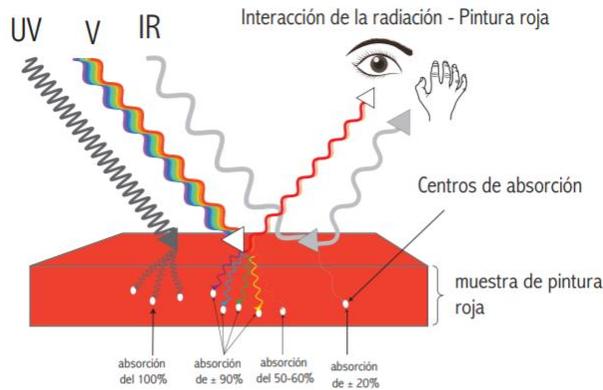


Figura 12. Representación gráfica del comportamiento de un material rojo con la radiación. Laboratorio de Entornos Sostenibles, Facultad de Arquitectura, UNAM.

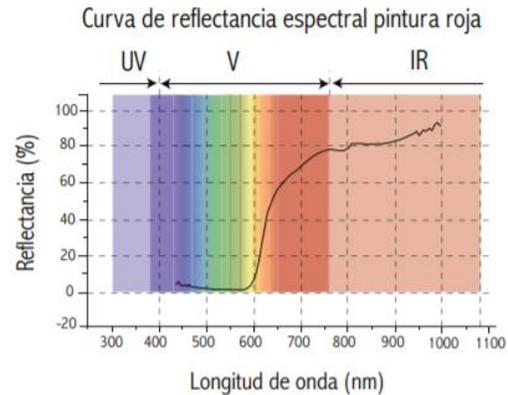


Figura 13. Curva de reflectancia espectral del material rojo. Laboratorio de Entornos Sostenibles, Facultad de Arquitectura, UNAM

Las figuras No. 11 y 12 muestran la curva de reflectancia espectral de un ejemplo de pintura roja que, en este caso, no refleja nada del espectro ultravioleta (UV); es decir, que toda es absorbida por la pintura. En cuanto a la radiación visible (V), la pintura roja refleja con mayor intensidad los colores naranjas y rojos; el resto de los colores los refleja con muy baja intensidad. Por esta razón la pintura tiene un color aparente rojo. En cuanto a la radiación infrarroja (IR), este ejemplo de pintura roja refleja bastante, y por tanto, esta pintura si se calienta mucho²⁹.

Recordemos que los factores externos que afectan nuestra percepción del color son muchos. El color es fundamentalmente una propiedad de la luz. Toda la luz incidente puede caracterizarse por su distribución espectral de longitudes de onda electromagnéticas. En la siguiente tabla se describe el comportamiento de absorción y la percepción del color.

²⁹ Lira Oliver Adriana. Reflectancia de la radiación electromagnética en materiales opacos. Visualización del efecto del color y la textura de una superficie en la composición espectral en la reflectancia difusa de la radiación electromagnética. (Práctica de Laboratorio). Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Arquitectura.

Color absorbido	nm	Color observado	nm
Violeta	400	Verde-Amarillo	560
Azul	450	Amarillo	600
Azul-Verde	490	Rojo	620
Amarrillo-Verde	570	Violeta	410
Amarillo	580	Azul oscuro	430
Naranja	600	Azul	450
Rojo	650	Verde	520

Tabla 1. Relación entre el color absorbido y observado del espectro visible expresado en nanómetros.

El color también es relativo en el contexto del ojo humano. De interés directo donde el color observado de un objeto también depende de las cualidades ópticas intrínsecas de un material.

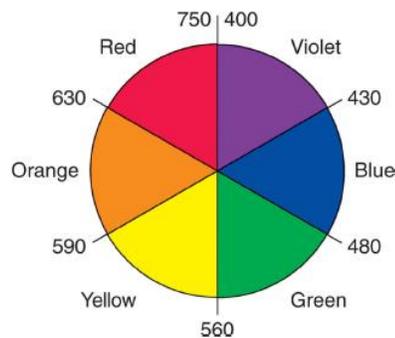


Figura 14. Círculo cromático, color absorbido y observado.

En el caso de un material inteligente con cambio de color aparente, las propiedades ópticas intrínsecas son: absorción, reflectancia y dispersión. Los materiales están diseñados para cambiar con la entrada de energía externa. Fundamentalmente, en la energía de entrada se produce una estructura molecular alterada u orientación sobre la superficie del material sobre el que se encuentra la luz incidente.

La estructura depende de la composición química, así como de la organización del cristal o la molécula. Esta energía externa puede estar en varias formas (calor o energía radiante asociada con la luz), pero en cada caso induce algún cambio en las estructuras internas de la superficie del material al reaccionar con los electrones cargados

negativamente presentes. Estos cambios a su vez afectan las características de absorción o reflectancia del material y, por lo tanto, su color percibido. Estos cambios pueden ser en todo el espectro o ser espectralmente selectivos. Curiosamente, estos cambios son reversibles. Cuando desaparece el estímulo de energía externa, una estructura alterada vuelve a su estado original (ver figura No.15)³⁰.

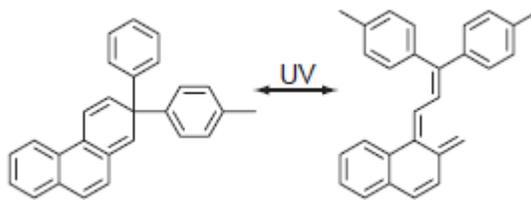


Figura 15. Los materiales fotocromáticos cambian de color cuando se exponen a la luz (un cambio en la estructura molecular de un material fotocromático provoca un cambio en sus propiedades ópticas).

Estos materiales absorben la señal por medio de ondas electromagnéticas que causan una modificación entre distintos estados de energía. Absorben la energía en el rango UV, cambiando de un estado basal a excitado. Un pigmento fotocromático puede ser incoloro y cuando se expone a la luz cambia su apariencia óptica, siendo para el ojo humano una cambio de color.

³⁰ Addington, Michelle., Schodek Daniel. (2005). Materiales inteligentes y nuevas tecnologías: Para la arquitectura y profesiones de diseño (pag. 84). Harvard University. ELSEVIER.

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

La siguiente experimentación tiene como análisis de estudio el comportamiento de un material compuesto (pasta fotocromática), resultado de la unión de un cemento blanco usado en la industria de la construcción en México y de un pigmento orgánico que tiene la peculiaridad de cambiar sus propiedades ópticas, lo que sería para el ojo humano un cambio de color, partiendo de un estado inactivo blanco a un estado activo azul, teniendo como señal o estímulo principal la radiación solar o los rayos UV.

Se desean conocer ciertas características como: la capacidad térmica para poder absorber la radiación ultravioleta por medio de una fuente natural que es el Sol y en función de esto determinar cuáles son las variaciones de temperatura en los espacios interiores de una vivienda. Acompañado de unas series de análisis químicos, que determinan cual es la composición del pigmento.

3.1 Método experimental

A continuación, se describen las técnicas de experimentación y el proceso empleado para la realización de la investigación:

- Análisis de las propiedades térmicas del material.

Se realizó por medio de la técnica fuente de calor transitoria, para determinar la conductividad térmica del material, a través del instrumento KD2 Pro, con la regulación de la norma ASTM D5334-08 “Método de prueba estándar para la determinación de la conductividad térmica del suelo y roca blanda mediante un procedimiento de sonda de aguja térmica”. Con esta información se calculó de igual manera la densidad y el calor específico.

- Análisis de las propiedades ópticas del material.

Se realizó por medio de la técnica de reflectancia solar, para determinar el IRS (Índice de Reflectancia Solar), a través de un reflectómetro portátil modelo 410-Solar visible / NIR, con la regulación de la norma ASTM E903-12- "Método De Prueba Estándar Para Absorción Solar, Reflectancia Y Transmitancia De Materiales Usando Esferas Integradoras". Se tomaron lecturas del IRS excitado con radiación UV con 3 tipos diferentes de longitud de onda y sin excitación.

- Análisis de la temperatura superficial del material.

Se tomaron lecturas de la temperatura °C superficial exterior e interior de una placa fabricada con pasta fotocromática, colocada en un módulo que se construyó con materiales de baja conductividad para evitar el intercambio energético entre el exterior e interior, a través de sensores de contacto llamados termopares tipo k, los cuales se conectaron a un registrador de datos. La información se analizó por medio del software PC200W.

- Caracterización y composición química del pigmento.

Se realizaron distintas técnicas de carácter químico. Para determinar la naturaleza del pigmento se utilizó la técnica punto de fusión por medio del aparato Fisher Jonhs, que consistió en elevar la temperatura de una placa estando en contacto con el pigmento y de manera observable poder identificar alguna descomposición. De la misma manera se realizaron las técnicas de Fluorescencia de rayos X con un espectrómetro modelo S1 TITAN y análisis elemental con el micro analizador elemental CHNS, que consistieron en identificar cada uno de los elementos o compuestos químicos del pigmento, así como su porcentaje de concentración. En la parte química también se realizó la técnica de espectroscopía electrónica por medio de un espectrofotómetro UV-Vis-NIR, en la cual se determinó el rango donde el pigmento tienen una modificación de su estructura (cambio de sus propiedades ópticas).

- Análisis de la durabilidad de la capacidad fotocromática del material.

Se realizó por medio de la técnica de intemperismo acelerado con radiación Ultravioleta

por medio del equipo QUV/spray. Este análisis se realizó durante un intervalo de tiempo programado para verificar si existía disminución del color del material.

- Análisis del comportamiento mecánico del material.

Se realizó por medio de la técnica ensayo a compresión, para determinar si la pasta tenía alguna modificación de su resistencia.

- Simulación energética.

Se realizó el modelado con el software Design Builder, y la simulación con energy plus, en esta etapa se trabajó con toda la información obtenida en las técnicas térmicas y ópticas.

Diagrama de procedimiento:

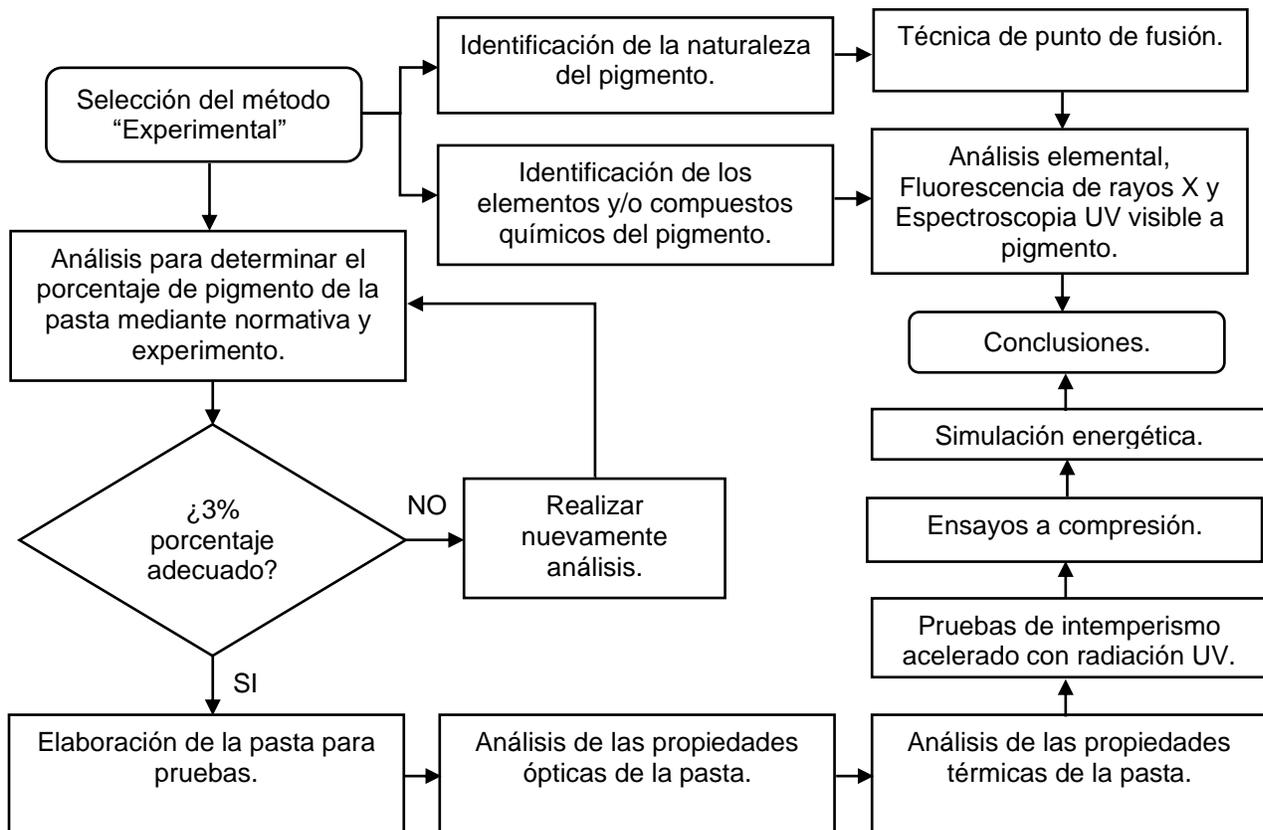


Figura 16. Diagrama de procedimiento experimental. Elaboración propia.

3.2 Materiales empleados.

3.2.1 Pigmento.

Tipo de pigmento fotocromático de la marca ACTIVFX™ (cuentan con proveedores en todos los estados de la república). La presentación es en polvo, que cambia de color cuando se expone a la luz solar debido a la radiación ultravioleta, y vuelve a su color original cuando se bloquea la luz solar, lo que se entiende como un material “reversible”. Después de absorber la energía de la luz solar, se cambia la estructura, lo que hace que su longitud de onda absorbida se modifique para que aparezca un color. Recupera la molécula original estructurada y el color cuando el estímulo de la luz se atenúa o bloquea.

El cambio de sus propiedades ópticas, pueden ser detectadas por el ojo humano cuando el pigmento tiene exposición a la luz UV aproximadamente entre el rango de 350 y 380 nm, que es cercano al color morado en el espectro visible. Cuando se expone a una longitud de onda cada vez menor, el pigmento tendrá una apariencia de color más opaco.

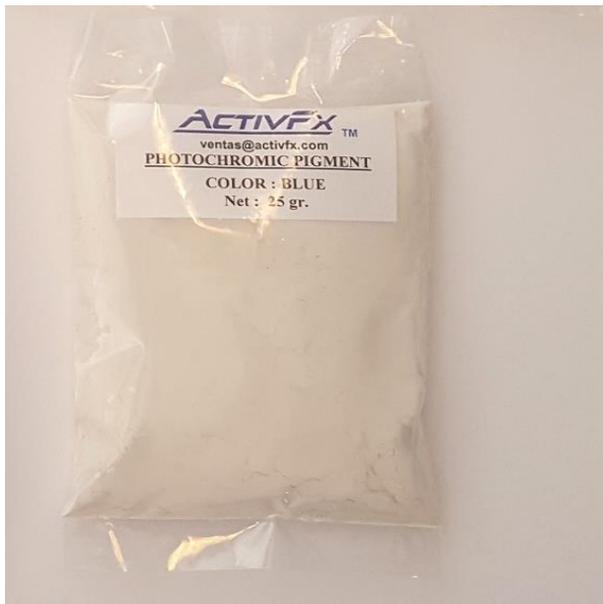


Figura 17. Pigmento fotocromático de la marca ACTIVFX color blanco-azul, sin ser expuesto al sol.



Figura 18. Pigmento fotocromático de la marca ACTIVFX color blanco-azul, siendo expuesto al sol.

El porcentaje de pigmento utilizado en la pasta fotocromática fue regulado conforme a la norma ASTM C979-16³¹, que establece el límite máximo de dosificación de los pigmentos en polvo utilizados como aditivo en un material cementante.

3.2.2 Cemento.

El cemento empleado durante la experimentación fue un CPC 30R B. La descripción y clasificación de sus componentes es la siguiente de acuerdo con la norma NMX-C-414-ONNCCE-2014³².

- Tipo de cemento: Cemento Portland Compuesto.
- Tipo de resistencia: Clase resistente 30R. Resistencia rápida (alcanza su una resistencia temprana a los 3 días mínima de 204 kg/cm² y mínima a los 28 días de 510 kg/cm²)³³.
- Características especiales: B blanco.

La finalidad de utilizar un cemento blanco es porque tiene la capacidad de proporcionar mayor intensidad y claridad del pigmento en función del color.



Figura 19. Bulto de cemento utilizado en la experimentación.

³¹ ASTM C 979 "Pigmentos para la coloración integral del concreto".

³² NMX-C-414-ONNCCE-2004 "INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN – CEMENTOS HIDRÁULICOS - ESPECIFICACIONES Y MÉTODOS DE PRUEBA".

³³ Características del cemento: <https://www.cemexmexico.com/documents/27057941/45887874/ficha-digital-CPC-30RB.pdf/df46808a-d71e-d732-e568-ba90d82448cc>.

3.2.3 Agua.

La composición química del agua debe de ser apta para el consumo humano, debe de estar libre de sabor y olor que se puedan notar, partículas orgánicas e inorgánicas y radioactividad. Las regulaciones que permiten determinar la aceptación del agua para concreto se encuentran en la norma NMX-C-122-ONNCCE-2004 “Industria de la construcción – Agua para concreto – Especificaciones”.

La cantidad de agua utilizada en cada tipo de muestra se tomó como referencia la norma NMX-C-061-ONNCCE-2015³⁴, donde establece que la relación agua/cemento para cemento portland debe de ser de 0.485. Durante la fabricación de las muestras se observó una buena trabajabilidad de la pasta.

3.2.4 Variables.

La variable independiente es el pigmento, que consiste en seleccionar el mejor diseño de pasta para recubrimiento en exteriores determinando un porcentaje de pigmento con relación a la masa del cemento seco adecuada para la investigación, mientras que las variables dependientes consisten en determinar las propiedades térmicas, ópticas y mecánicas del diseño de pasta elegido.

Variable independiente:

- Pigmento.

Variables dependientes:

- Conductividad térmica.
- Calor específico.
- Densidad.
- Reflectancia solar.

³⁴ Cementantes Hidráulicos - Determinación de la Resistencia a la Compresión de Cementantes Hidráulicos.

- Resistencia a esfuerzos de compresión.

La primera etapa de experimentación consistió en diseñar 4 distintos tipos de pastas, que iban a diferenciarse por la cantidad de pigmento adicionada en relación con la masa del cemento seco. Esta diferencia en cantidad de pigmento define los principios entre la cantidad mínima y máxima empleada en cementantes. Partiendo de estos rangos, los porcentajes intermedios fueron considerados respetándolos y asignando un valor medio con la finalidad de seleccionar una muestra óptima con un porcentaje menor al máximo. Los diferentes tipos de pastas mantuvieron la misma relación de agua 0.485. A las muestras fraguados se les evaluó el desempeño térmico superficial. Se fabricaron 2 placas por cada diseño de pasta, donde se evaluaron las mismas características en el mismo lapso y bajo las mismas condiciones.

Para la segunda etapa de experimentación se seleccionó el diseño de pasta adecuado, donde se procedió a realizarle una serie de pruebas de acuerdo a fines de la investigación para comprobar la viabilidad de su aplicación.

Diagrama de proceso experimental:

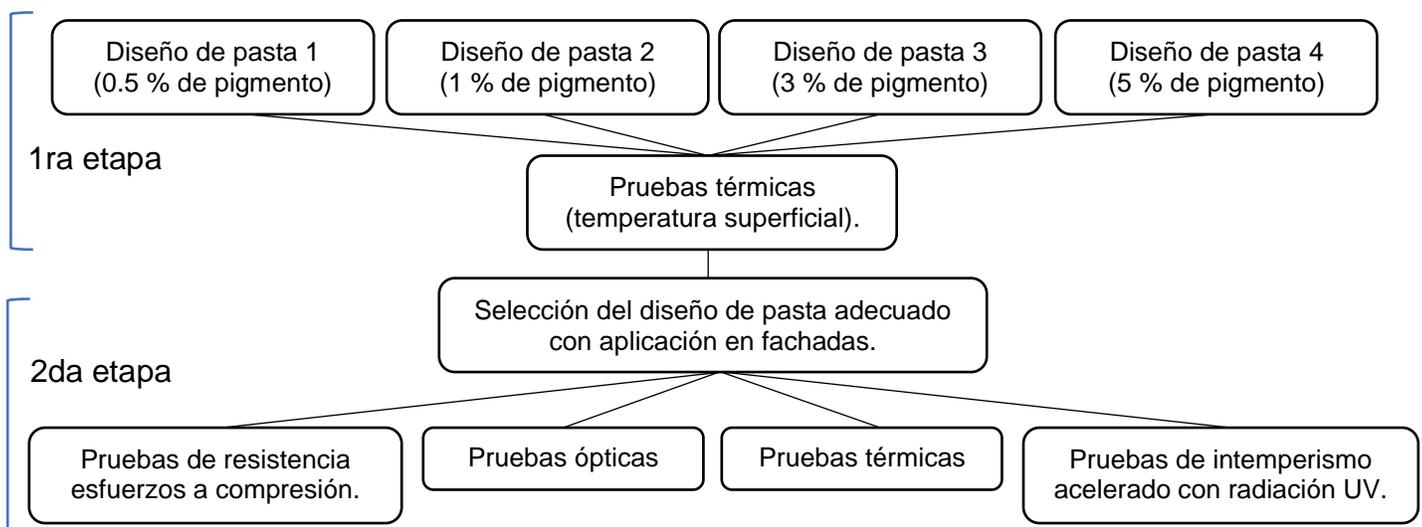


Figura 20. Diagrama de proceso experimental.

3.2.5 Elaboración de muestras (material compuesto).

Para la primera etapa de caracterización, se elaboraron 8 muestras con distintas dosificaciones (ver tabla No.2), con una geometría de 15 cm x 15 cm x 1.5 cm. La relación agua/cemento de 0.485 se mantuvo constante en todos los especímenes, variando únicamente el porcentaje de pigmento con relación a la masa del cemento seco utilizado.

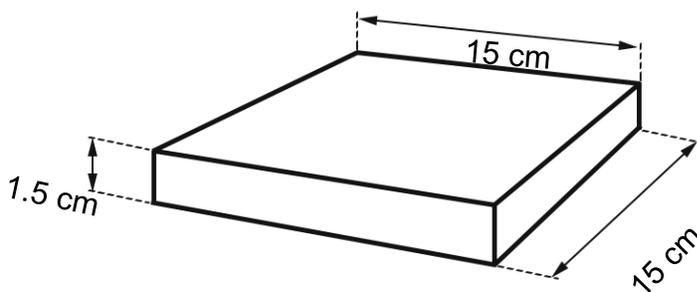


Figura 21. Esquema de la placa de pasta fotocromática.

Se aprecia que, al momento de adicionar pigmento, teniendo una muestra de control denominada A, con una cantidad inicial de 300 gramos de cemento disminuye la masa y por lo tanto la cantidad de agua, pero siempre manteniéndose la misma relación agua/cemento.

Número de muestra	Cantidad de cemento gramos	Cantidad de agua ml (0.485)	Cantidad de pigmento gramos	Porcentaje de pigmento %
A	300.00	145.50	0.00	0.00
1	298.50	144.77	1.50	0.50
2	297.00	144.05	3.00	1.00
3	281.00	136.29	9.00	3.00
4	285.00	138.23	15.00	5.00

Tabla 2. Dosificación de muestras cemento, pigmento y agua.

Para la segunda etapa de caracterización, una vez seleccionado el porcentaje de pigmento adecuado, se realizaron las pruebas de las propiedades termo físicas, donde se fabricaron 3 especímenes que se colaron en moldes de acrílico con forma cúbica de 10 cm. Para que las agujas pudieran tomar la lectura en el interior del cubo se realizaron barrenos en sus caras. Esta experimentación se realizó únicamente a la pasta seleccionada en la segunda etapa.

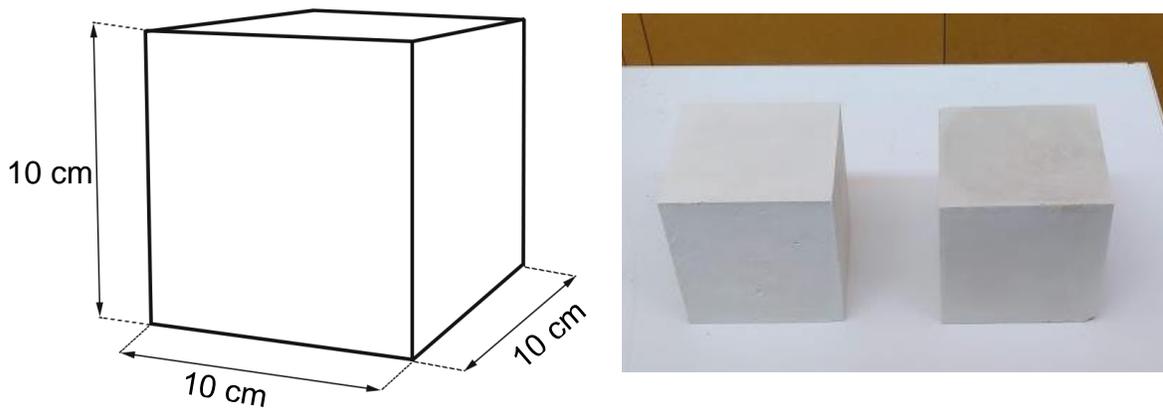


Figura 22. Esquema y probeta cúbica de la pasta fotocromática

También se fabricaron especímenes para ser analizados en un módulo experimental, que controlaba las condiciones ambientales en el exterior e interior, evitando intercambio de energía entre los dos ambientes. Se tomaron las lecturas de temperatura superficial en la cara interior y exterior.

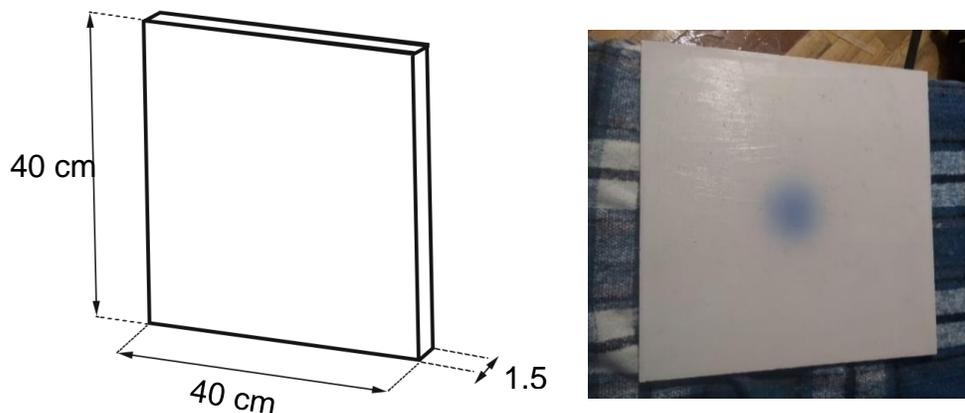


Figura 23. Esquema y probeta cúbica de la pasta fotocromática

Para la caracterización óptica se fabricaron 2 especímenes que se colaron en moldes de acrílico con forma rectangular de 10 cm x 10 cm x 1.5 cm. Se consideraron las regulaciones de la norma ASTM E903-12³⁵.

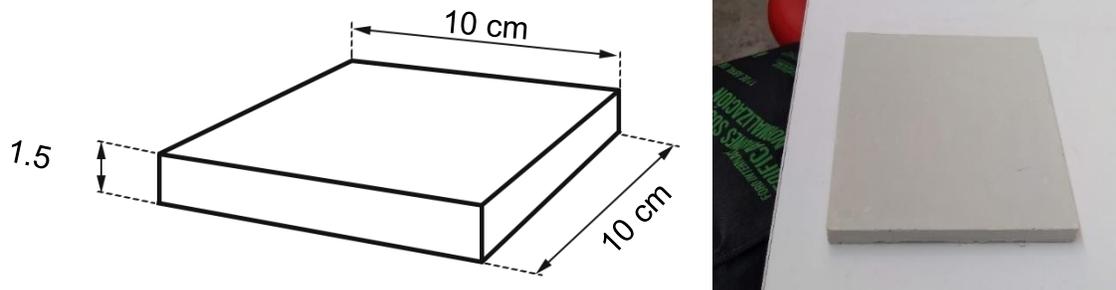


Figura 24. Esquema y probeta rectangular de la pasta fotocromática.

Para el análisis de intemperismo se fabricaron tres especímenes en moldes de acrílico con forma rectangular de 15 cm x 7.5 cm x 1 cm.

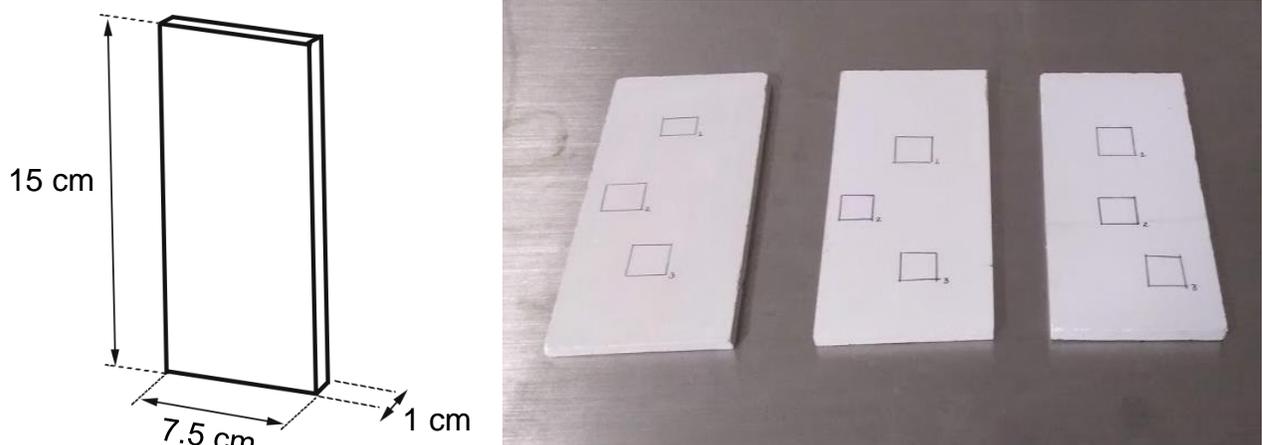


Figura 25. Esquema y probeta rectangular de la pasta fotocromática.

Para determinar el comportamiento de esfuerzos a compresión se fabricaron especímenes cúbicos de 5 cm.

³⁵ ASTM E903-12 "Método De Prueba Estándar Para Absorción Solar, Reflectancia Y Transmitancia De Materiales Usando Esferas Integradoras".

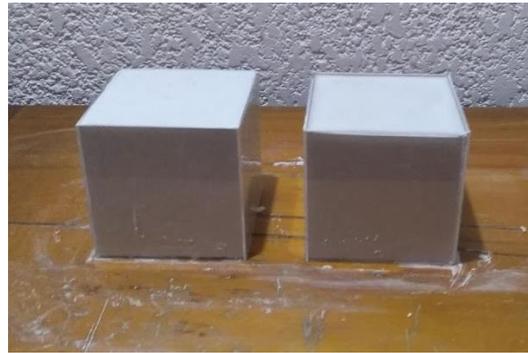
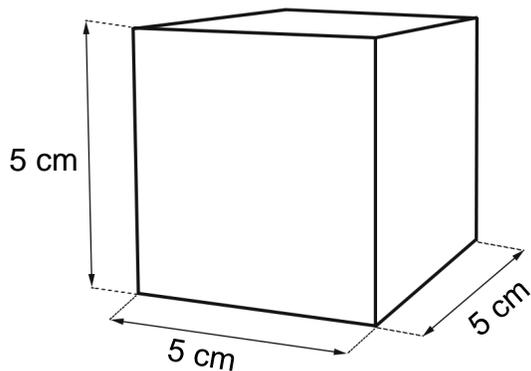


Figura 26. Esquema y probeta rectangular de la pasta fotocromática.

El tipo de molde utilizado para la muestra fue de acrílico, ya que es un material que no absorbe el agua de la pasta, evitando pérdidas de humedad y futuros agrietamientos en el elemento fraguado. Previo a la construcción de estas placas, se realizaron varias muestras pigmentadas con diferentes materiales, como el MDF en donde se encontraron fuertes deficiencias ya que es un material que absorbe agua y las primeras muestras presentaron agrietamientos durante los primeros 3 días.

En el segundo intento se utilizó el mismo molde de MDF pero revestido en el interior con un material desmoldante, de igual manera en esta parte se presentaron agrietamientos en la placa pero no representativos, donde también se observó que el material desmoldante provocaba manchas en las superficies de contacto con la pasta, disminuyendo la intensidad del color y su uniformidad.

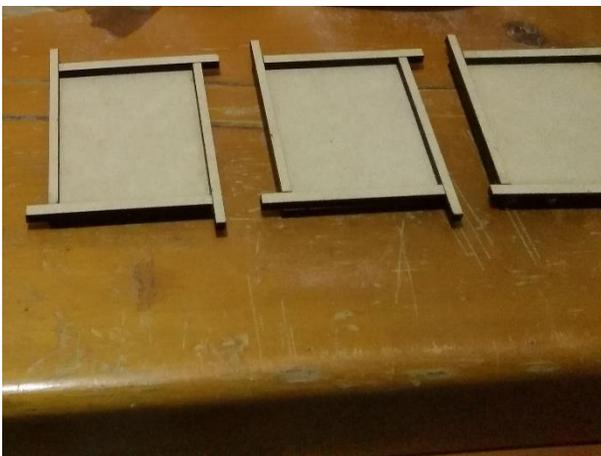


Figura 27. Moldes de MDF.

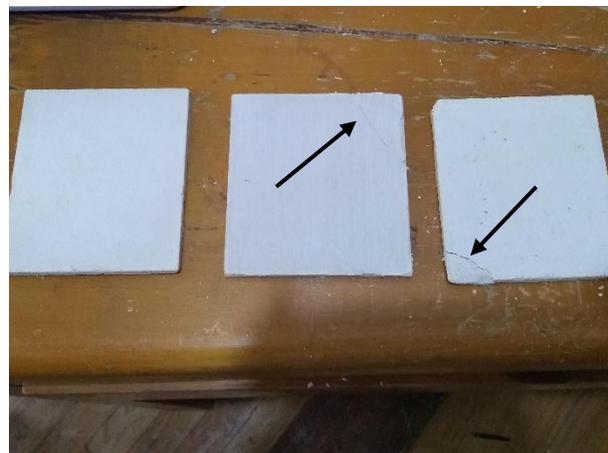


Figura 28. Placas coladas con agrietamiento, después de retirar el molde.

Para el caso de los moldes metálicos, las muestras no presentaron pérdidas de humedad, pero era necesario la aplicación abundante de desmoldante para el retiro de la muestra, disminuyendo en gran medida la uniformidad del color.

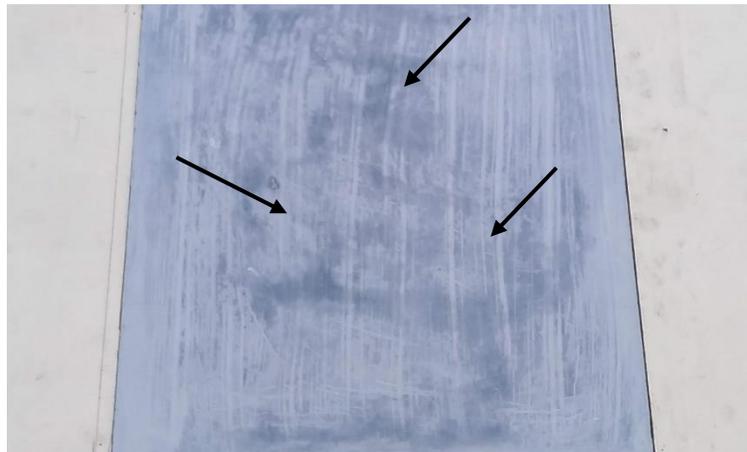


Figura 29. Placas coladas con manchas causadas por el desmoldante (vaselina).

De esta manera se llegó a la conclusión de usar un material de acrílico como moldes, ya que no es necesario la aplicación de un material liberador para el desmolde de las muestras, apreciándose una uniformidad del color en todas las caras en contacto con el acrílico.



Figura 30. Molde de acrílico con 6 mm de espesor, para colado de muestras.

3.3 Técnicas de caracterización.

3.3.1 Termografía infrarroja.

La termografía infrarroja es el proceso de usar una cámara termográfica para detectar la radiación que emite un cuerpo a cierta temperatura, interpretarla y mostrar una imagen de la distribución de temperatura. Las imágenes de la distribución de temperatura detectada se denominan termogramas y permiten ver objetos productores de calor invisibles a simple vista.



Figura 31. Cámara termográfica de la marca twilight modelo TG165.

Dado que todos los objetos por encima de la temperatura de 0 K, conocida como cero absoluto y que equivale a $-273.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($-459.67\text{ }^{\circ}\text{F}$) emiten energía térmica infrarroja, las cámaras termográficas pueden detectar y mostrar fácilmente las longitudes de onda infrarrojas independientemente de la luz ambiental.

Esta técnica se utilizó únicamente en la primera etapa de caracterización del material compuesto, las lecturas se realizaron con una cámara termográfica de la marca twilight modelo TG16 (ver figura No. 31).

3.3.2 Temperatura superficial de contacto.

Un termopar es un sensor para medir la temperatura. Se compone de dos metales diferentes, unidos en un extremo. Cuando la unión de los dos metales se calienta o enfría,

se produce una tensión que es proporcional a la temperatura. Las aleaciones de termopar están comúnmente disponibles como alambre. De igual manera que la técnica de termografía infrarroja, la temperatura de contacto se utilizó solo en la primera etapa de caracterización.

El tipo de sensor utilizado fue un termopar tipo K (ver figura No.32), que tiene un conductor positivo de níquel-cromo y un conductor negativo de níquel-aluminio, los cuales se conectaron a un registrador de datos que tiene como fuente de alimentación un panel fotovoltaico.



Figura 32. Sensores de contacto (termopares tipo k) para medir temperatura superficial.

3.3.3 Fuente de calor transitoria.

El principio de medida se basa en el método de la fuente de calor transitoria “Transient Line Heat Source”, mide en intervalos de 1 segundo durante un ciclo de calentamiento y enfriamiento de 90 segundos³⁶, cumple con las especificaciones de la norma ASTM D5334-08³⁷.

³⁶ <https://www.lab-ferrer.com/sensores/instrumentacion-y-sensores/conductividad-resistividad-difusividad-termica/kd2-pro.html>

³⁷ ASTM D5334-08 “Método de prueba estándar para la determinación de la conductividad térmica del suelo y roca blanda mediante un procedimiento de sonda de aguja térmica”.



Figura 33. Instrumento KD2 PRO.

Las muestras cúbicas se midieron por medio del instrumento KD2 Pro (ver figura No.33). El tipo de sensor utilizado fue un SH-1, cuenta con agujas de 3 centímetros de largo.



Figura 34. Muestras cúbicas de 10 centímetros sobre equipo de barrenación.

Para las mediciones en este tipo de material rígido, se realizaron perforaciones para poder insertar las sondas por medio de un equipo de perforación (ver figura No. 34). Estas perforaciones se realizaron en 3 caras de cada muestra cúbica, considerando que en cada cara se hicieron 2 perforaciones para introducir las sondas del sensor.

3.3.4 Reflectancia solar.

Las pruebas de reflectancia de la pasta fotocromática se realizaron con un Reflectómetro portátil 410-Solar visible / NIR(ver figura No.35) y cumple con la norma ASTM E903-12³⁸. Basado en una esfera integradora modificada, mide la reflectancia total en siete sub-bandas en las regiones espectrales de 300-2500 nm. Se informa reflectancia total, difusa y especular para los datos con una incidencia de 20 grados.



Figura 35. Reflectómetro 410-Solar visible. Laboratorio de Entornos Sostenibles, Facultad de Arquitectura, UNAM.

³⁸ ASTM E903-12 "Método De Prueba Estándar Para Absorción Solar, Reflectancia Y Transmitancia De Materiales Usando Esferas Integradoras".

3.3.5 Emitancia térmica.



Figura 36. Emisómetro térmico de mano ET100. Laboratorio de Entornos Sostenibles, Facultad de Arquitectura, UNAM.

El análisis se realizó por medio del dispositivo ET-100 se usa para medir la emisividad con el objetivo de validar el uso de cámaras infrarrojas térmicas, cumple con la norma ASTM E408³⁹. Las cámaras IR requieren la entrada de un valor de emisividad para cálculos precisos de temperatura. Los valores de emisividad obtenidos de las tablas teóricas pueden estar lejos de ser reales,

lo que genera grandes incertidumbres. El ET-100 mide los valores de emisividad en dos de las regiones espectrales más utilizadas, 3-5 μm y 8-12 μm . Las mediciones se realizan con una incidencia de 20⁴⁰ °.

3.3.6 Intemperismo.

Las pruebas de envejecimiento acelerado se realizaron por medio de un equipo de intemperismo acelerado modelo QUV/spray, marca Q-Lab (ver figura No.37) que se encuentra en el Laboratorio de Conservación del Patrimonio Natural y Cultural en la unidad de posgrados UNAM. Se realizaron pruebas con las lámparas fluorescentes simulando la radiación en la región Ultravioleta con una longitud de onda de 340 nm y una irradiación de 1.35 W/m², reproduciendo de manera realista el daño a las propiedades causadas por la luz solar.

³⁹ ASTM E408 "Métodos de prueba estándar para la emisión total normal de superficies utilizando técnicas de medidor de inspección".

⁴⁰ <https://www.pro-lite.es/File/reflectometros.php>



Figura 37. Equipo QUV/Spray para simulación de radiación UV.

Cabe mencionar que la información más relevante en esta prueba es determinar la resistencia a la degradación del color, ya que esta característica es la que proporciona los cambios de la temperatura superficial de la pasta fotocromática por medio del estímulo con la radiación UV. El objetivo de este procedimiento es el de comparar las probetas antes y después de ser ensayadas a la exposición UV, donde se evaluarán las siguientes características:

- Color.
- Geometría de los especímenes.
- Peso.

Equipo y material empleado:

- Cámara de intemperismo acelerado modelo QUV/spray, marca Q-Lab
- Microscopio estereoscópico modelo SMZ 171, marca Motic.
- Báscula modelo Pioneer PA-214, marca Ohaus.
- Lámpara portátil UV 340 nm, marca lolo, tipo de bombilla LED.
- Escala de colores en modo RGB y CMYK (Photoshop CC2020).

Modo de color RGB: El modo Color RGB de Photoshop utiliza el modelo RGB y asigna un valor de intensidad a cada píxel. En imágenes de 8 bits por canal, los valores de intensidad varían de 0 (negro) a 255 (blanco) para cada uno de los componentes RGB

(rojo, verde, azul) de una imagen en color. Por ejemplo, un color rojo fuerte podría tener un valor R de 246, un valor G de 20 y un valor B de 50. Si los valores de los tres componentes son idénticos, se obtiene un tono de gris neutro. Si los valores de todos los componentes es 255, el resultado es blanco puro, y negro puro si el valor es de 0⁴¹.

Modo de color CMYK: En el modo CMYK, a cada píxel se le asigna un valor de porcentaje para las tintas de cuatricromía. Los colores más claros (iluminaciones) tienen un porcentaje pequeño de tinta, mientras que los más oscuros (sombras) tienen porcentajes mayores. Por ejemplo, un rojo brillante podría tener 2% de cian, 93% de magenta, 90% de amarillo y 0% de negro. En las imágenes CMYK, el blanco puro se genera si los cuatro componentes tienen valores del 0%⁴².

3.3.7 Punto de fusión.

Se conoce como punto de fusión a la temperatura en la cual una materia que se halla en estado sólido pasa a su estado líquido. Para que se produzca el cambio de estado, dicha temperatura debe ser constante. El punto de fusión es una propiedad física intensiva de la materia; esto quiere decir que no está ligada a la cantidad de sustancia o al tamaño del cuerpo. En el proceso de fusión, la materia sólida comienza a calentarse hasta alcanzar el punto de fusión, momento en el cual se produce su cambio de estado y se transforma en un líquido.

Esta técnica se realiza por medio del aparato de Fisher-Johns (ver Figura No.38) que consta de una platina calentada mediante una resistencia eléctrica, en la que se coloca la muestra entre dos cubre objetos redondos (unos cuantos cristales en el centro del cubreobjetos). La velocidad de calentamiento se controla con un reóstato integrado al

⁴¹ <https://helpx.adobe.com/mx/photoshop/using/color-modes.html>

⁴² <https://helpx.adobe.com/mx/photoshop/using/color-modes.html>

aparato y la temperatura de fusión de la sustancia se lee en el termómetro adosado a dicha platina que esta graduada en grados centígrados con un rango de 0° a 300°C. Este análisis se realizó en el laboratorio de la Facultad de Química de la UNAM.

Equipo y material empleado:

- Cubre objeto circular.
- Micro espátula.
- Termómetro Fisher Jonhs.
- Aparato Fisher Jonhs.
- Balanza analítica.



Imagen 38.- Aparato Fisher Jonhs. Laboratorio de Posgrado Facultad de Química UNAM.

La técnica fue aplicada únicamente al pigmento fotocromático sin ser irradiado, esto significa que el análisis se realizó sobre su color blanco sin ser estimulado.

3.3.8 Espectroscopia UV-visible.

La espectroscopia describe la interacción entre la radiación electromagnética y la materia. Toda radiación electromagnética viene caracterizada por una longitud de onda, una frecuencia y/o una energía.

Esta técnica está basada en el proceso de absorción de la radiación ultravioleta-visible, radiación con longitud de onda comprendida entre los 160 y 780 nm por una molécula. La absorción de esta radiación causa la promoción de un electrón a un estado excitado o de mayor energía.

El equipo para llevar a cabo dicha prueba fue con un espectrofotómetro (ver figura No.39) que se encuentra en el Posgrado de la Facultad de Química de la UNAM. El Cary 5000 es un espectrofotómetro UV-Vis-NIR de altas prestaciones, con rendimiento fotométrico excelente en el rango de 175 a 3300 nm. Utilizando un detector PbSmart, el Cary 5000 amplía su gama NIR a 3300 nm, por lo que es una herramienta muy potente para la investigación en ciencia de materiales. Controlado por el software Cary WinUV, un software basado en Windows modular, es fácil de realizar medidas y controlar una gran variedad de accesorios opcionales.

Equipo y material empleado:

- Porta muestras.
- Micro espátula.
- Balanza analítica.
- Espectrofotómetro Cary 5000.

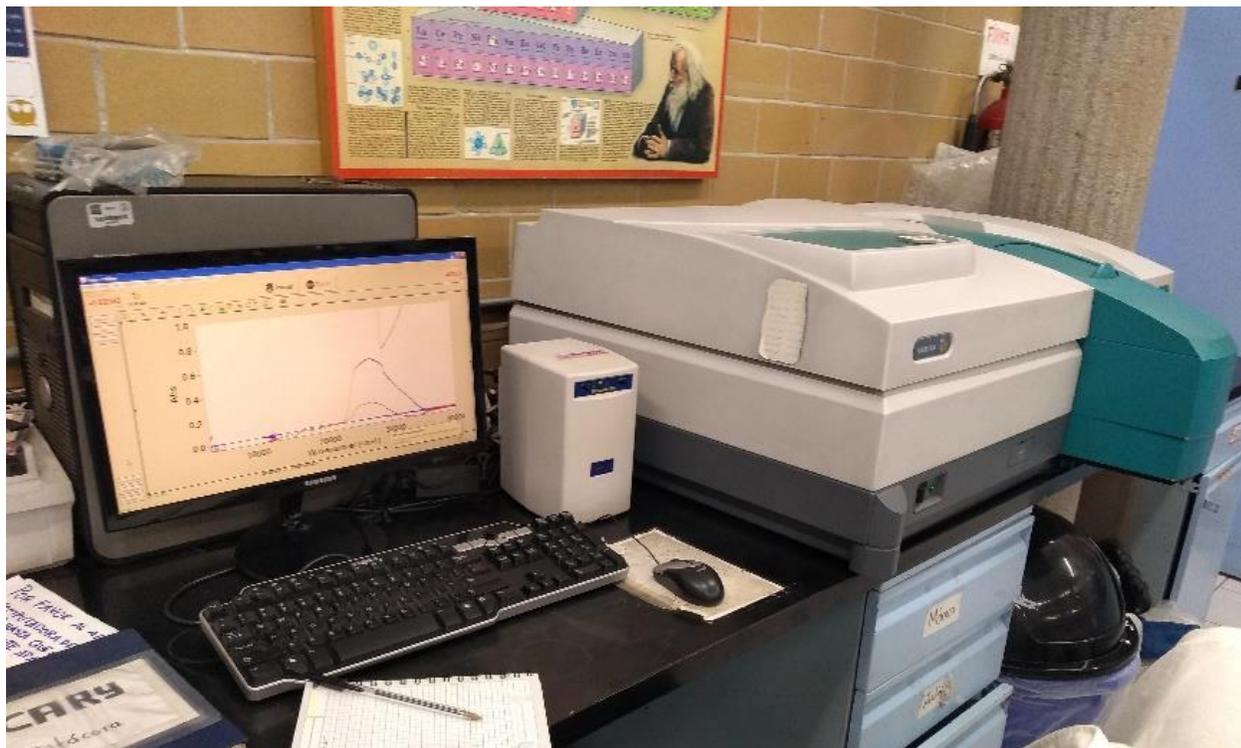


Imagen 39.- Espectrofotómetro Cary 5000 UV-Vis-NIR. Laboratorio de Posgrado Facultad de Química UNAM.

El compartimiento de muestras de gran tamaño puede ser ampliado para contener accesorios grandes y esferas integradoras de reflectancia espectral y difusa. El mecanismo de bloqueo permite cambiar y posicionar rápidamente los accesorios para obtener resultados reproducibles⁴³.

3.3.9 Análisis elemental.

La técnica del análisis químico elemental permite determinar el contenido total de carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre (C, H, N y S) presente en muestras orgánicas e inorgánicas, tanto sólidas como líquidas. Estos análisis permiten la determinación del contenido de estos elementos en las muestras estudiadas, lo que es esencial para la determinación de la composición química de los materiales.

⁴³ <https://grupobiomaster.com/cary-5000-uv-vis-nir/>

El análisis elemental de C, H, N y S se basa en la volatilización de una muestra por combustión total en atmósfera de oxígeno puro, liberándose los elementos a medir en forma de CO₂, H₂O, NO_x y SO_x, respectivamente. Un proceso posterior de reducción transforma los NO_x y SO_x en N₂ y SO₂, respectivamente. Todos los gases así formados (CO₂, H₂O, N₂ y SO₂) son analizados cuantitativamente en un detector.

Esta técnica analítica es complementaria de otras de análisis estructural para la confirmación de la fórmula molecular de compuestos provenientes de síntesis orgánica o inorgánica.

La prueba de análisis elemental se realizó con el micro analizador elemental CHNS (ver Figura No. 40), con sistema de detección de Micro TruSpec de LECO. Utiliza una combinación de flujo continuo de gas portador He, detector de infrarrojos y detector de conductividad térmica que dan una detección simultánea de CHNS en menos de cuatro minutos.



Imagen 40.- Micro analizador elemental CHNS, con sistema de detección de Micro TruSpec de LECO.

3.3.10 Fluorescencia de Rayos X.

La fluorescencia de rayos X (XRF) es una técnica analítica que se puede utilizar para determinar la composición química de una amplia variedad de tipos de muestras, entre los que se encuentran sólidos, líquidos, lodos y polvos sueltos.

Estos métodos permiten medir la longitud de onda y la intensidad de la "luz" (rayos X en este caso) emitida por átomos energizados en la muestra. En XRF, la irradiación por un haz de rayos X primario procedente de un tubo de rayos X provoca la emisión de rayos X fluorescentes con energías discretas características de los elementos presentes en la muestra.



La prueba de fluorescencia de Rayos X, consistió en analizar dos muestras, la primera corresponde al pigmento fotocromático en polvo y la segunda al material compuesto fraguado, para determinar el tipo de elemento químico que las componen, esto por medio de los resultados en los que se determina la concentración de cada uno.

Imagen 41.- Espectrómetro modelo S1 TITAN. Laboratorio de Conservación del Patrimonio Natural y Cultural, Unidad de Posgrados, UNAM.

3.3.11 Medición y estudio del desempeño térmico del material compuesto de manera experimental.

Se construyó un módulo de prueba compuesto de una serie de aislamiento térmico en todas sus 6 caras con el propósito de evitar la comunicación térmica con el ambiente exterior. Este tratamiento está dispuesto en 5 caras del cubo, destinada una cara parcialmente a la colocación para el análisis térmico de una placa de pasta fotocromática.

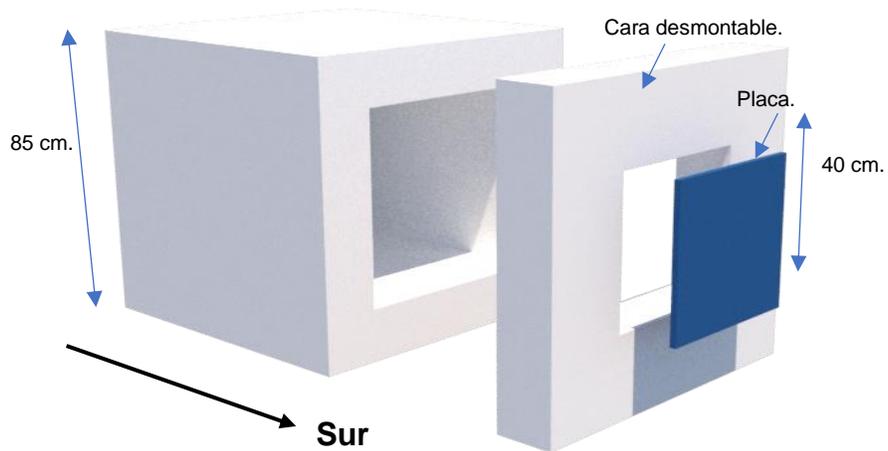


Imagen 42. Modelo, colocación de placa de pasta fotocromática.

Las dimensiones del cubo son de 85 centímetros por lado, con materiales de conductividad baja. El espesor de los muros que conforman la envolvente del módulo es de 16.30 cm distribuidos de la siguiente manera (ver figura No.43):

- Impermeabilizante color blanco de 0.01 cm (1 mm) de espesor.
- Triplay de 0.06 cm (6mm) de espesor.
- Poliestireno expandido de 15 cm de espesor.
- Triplay de 0.06 cm (6mm) de espesor.

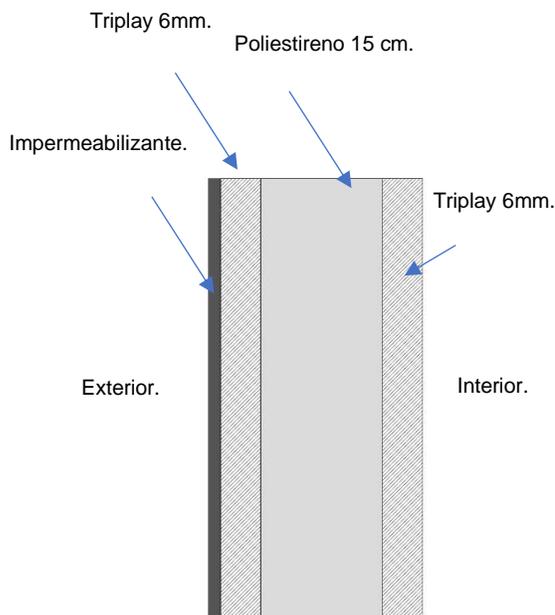


Figura No.43: Corte muro de la envolvente.

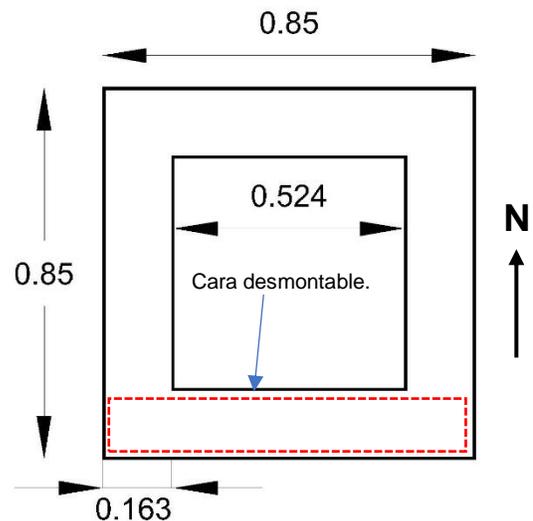


Figura No.44: Planta del módulo.

Al mantener un ambiente interior controlado de las características climáticas exteriores se asegurará que las condiciones interiores una vez colocada la placa sean determinadas por estas mismas. La experimentación se llevó a cabo en la azotea de la Unidad de Posgrados (edificio J), ya que se contaba con el fácil acceso a los dispositivos y equipos de medición proporcionados por la misma Unidad.



Imagen 45. Ubicación de la experimentación en el Edificio J de la Unidad de Posgrado UNAM (punto rojo).



Imagen 46. Construcción del módulo de prueba. Aplicación de impermeabilizante color blanco en el exterior.

El módulo estuvo monitoreado por medio de sensores que median la temperatura interior (ver figura No.47) con dispositivo HOBOS modelo U-10, termopares tipo k que median la temperatura superficial exterior e interior de la placa con orientación sur, conectados a un registrador de datos modelo CR300 series y una fuente de alimentación (panel fotovoltaico). Para el caso del registrador de datos estos fueron manipulados por medio del software PC200 W y para los dispositivos HOBOS por medio de la aplicación HOBOWARE.



Imagen 47. Colocación de dispositivo HOBO modelo U-10 en el interior del módulo de prueba para monitoreo de la temperatura interior.



Imagen 48. Instalación de panel fotovoltaico (alimentador), datalogger y termopares.

Material	Espesor	Conductividad λ W/(m*K)	Calor específico J/kgK
Impermeabilizante	0.001	0.030	1.673
Triplay 6 mm	0.006	0.115	1.760
Poliestireno	0.150	0.036	0.400
Pasta fotocromática	0.015	0.749	2.282

Tabla No.3. Propiedades térmicas de los materiales que conforman la envolvente.

3.3.12 Pruebas mecánicas.

Para determinar el comportamiento del material compuesto mecánicamente, se realizaron ensayos sobre dos tipos de muestra, la primera en una de control donde se ensayó únicamente el cemento que ya se describió anteriormente y la segunda donde se realizaron los ensayos a la pasta fotocromática, sobre especímenes cúbicos de 5 cm.

La norma de referencia para realizar estas pruebas fue la NMX-C-061-ONNCCE-2015⁴⁴, donde se fabricaron un total de 2 lotes cada uno integrado por 12 especímenes,

⁴⁴ NMX-C-061-ONNCCE-2015 "DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CEMENTANTES HIDRÁULICOS".

ensayándose 3 especímenes de acuerdo con el día especificado. La finalidad de ensayar una muestra de control fue para tomar sus resultados como base indicando si había disminución o aumento de resistencia en el material compuesto.

3.3.13 Simulación anual del desempeño térmico de unidad de prueba.

Software Design Builder.

Es un software especializado en la modelación y análisis energético de edificios. Sus avanzadas prestaciones permiten evaluar aspectos como los niveles de confort, los consumos de energía y las emisiones de carbono. Concebido para facilitar los procesos de simulación, ofrece diversos módulos de análisis integrados entre sí, lo cual significa mayor productividad y eficiencia. Es clave si se quiere contar con la capacidad de manejar una herramienta de alto desempeño para la modelación energética, la consultoría y la certificación.

Software Energy Plus.

Energy Plus es un programa de simulación diseñado para realizar simulaciones térmicas dinámicas de edificios con o sin sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC). Este motor de simulación fue diseñado para ser un elemento dentro de un sistema de programas que incluiría una gráfica interfaz de usuario. Sin embargo, se puede ejecutar independientemente sin tal interfaz, es decir, de forma independiente. Está desarrollado por el Departamento de Energía (DOE) del gobierno de EEUU, siendo uno de los programas más reconocidos en el ámbito de la simulación energética. Tiene sus raíces en los programas BLAST y DOE-2. BLAST (Construcción de Análisis de cargas y Termodinámica del Sistema).⁴⁵

⁴⁵ Empezando con Energy Plus. Manual de conceptos básicos. Información esencial que necesita sobre el funcionamiento de energyplus. (2015).

Componente EP launch.

Éste es un componente opcional de la instalación de EnergyPlus para Windows (no está disponible para plataformas Linux y Mac). Especialmente diseñado para los usuarios que quieran una forma fácil de seleccionar archivos y ejecutarlos con EnergyPlus. Desde EP-Launch se introducirán el fichero IDF con los datos de entrada y el fichero de datos meteorológicos mediante la pestaña Browse situada bajo Input File y Weather File. Además, EP-Launch puede ayudar a abrir un editor de texto (IDF Editor) para los archivos de entrada y salida, abrir una hoja de cálculo una vez procesados los resultados, un explorador web para la visualización de archivos en formato de tablas, e iniciar un visor para archivo de dibujo, entre otros.

Componente IDF editor.

El archivo de datos de entrada (IDF) es un archivo ASCII que contiene los datos que describen el edificio y Sistema HVAC que será simulado. Muchos archivos de ejemplo se instalan como parte del programa. El editor IDF es un editor simple, inteligente, que lee el EnergyPlus Data Dictionary (IDD). Una entrada en el IDD consta de texto separado por comas terminado por un punto y coma. El editor permite la creación y revisión de los archivos de entrada de EnergyPlus (IDF). Se puede ejecutar desde un acceso directo en el directorio principal de EnergyPlus (creado como parte de la instalación) o directamente desde EP-Launch. El editor de IDF no verifica las entradas para determinar su validez, aunque algunos valores numéricos se resaltan si están fuera del rango o algunos campos de texto están resaltados si contienen una referencia inválida.⁴⁶

El proceso de la simulación energética consistió en modelar un cubo que se denominó unidad de prueba, con una geometría de 1 metro por lado. Se realizaron las simulaciones donde se cargó la información obtenida en las pruebas ya descritas correspondientes a las longitudes de onda de 313 nm, 340 nm y sin excitación.

⁴⁶ Empezando con Energy Plus. Manual de conceptos básicos. Información esencial que necesita sobre el funcionamiento de energyplus. (2015).

Para cada rango de onda se realizaron 5 corridas, cada una correspondiente a una orientación incluyendo el techo quedando de la siguiente manera norte, sur, este, oeste y techo (ver figura No.49). En cada corrida solo se consideró una cara de acuerdo con la orientación con las características térmicas y ópticas de la pasta, la envolvente restante se consideró como un sistema constructivo adiabático el cual evita el intercambio energético con el entorno.

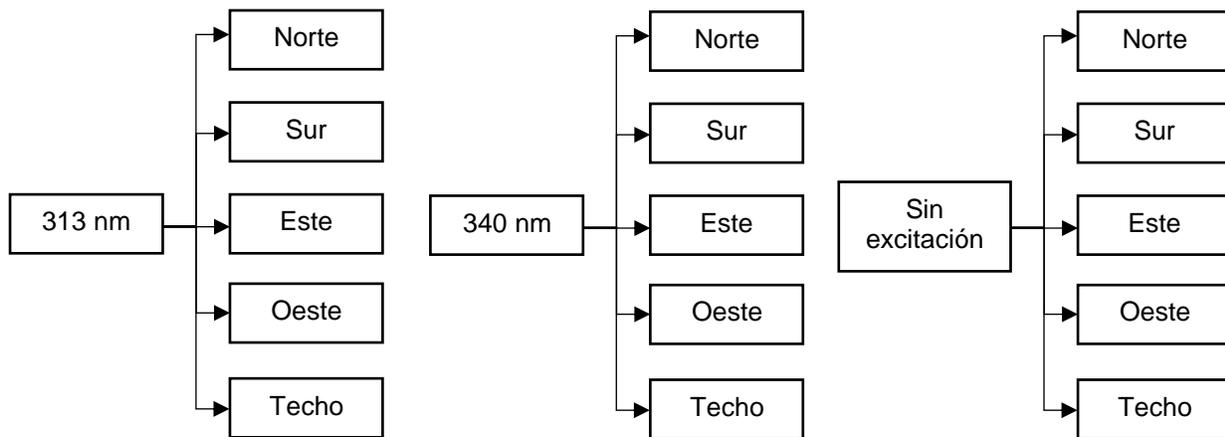


Imagen 49. Diagrama de simulación por cada rango de onda.

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Termografía infrarroja.

Las placas de 15x15x1.5 cm se sometieron a mediciones con la cámara termográfica, para evaluar el desempeño térmico superficial en la pasta expuesta a la radiación solar. Se colocaron sobre una base de poliestireno, dicho material tiene la característica de conductividad baja, evitando de esta manera una transferencia de calor por conducción entre materiales.

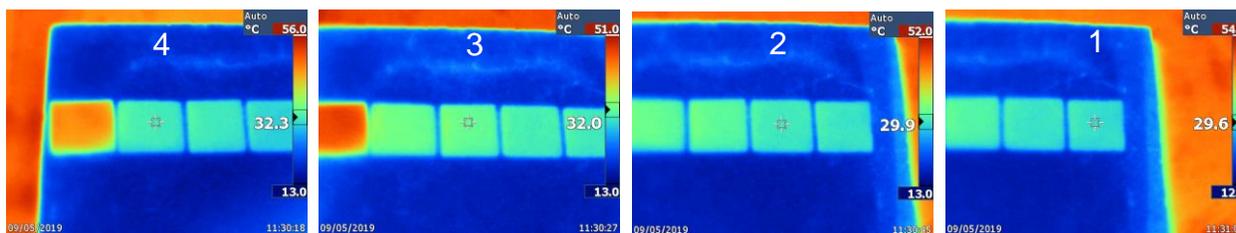


Figura 50. Toma de la primera lectura por medio de la cámara termográfica placas No. 1,2,3 y 4. De derecho a izquierda.

En total se tomaron 3 lecturas por cada muestra, el intervalo entre cada lectura fue de 30 minutos (ver tabla No.4). Antes de haber iniciado con la primera lectura, las placas se dejaron expuestas 60 minutos.

Número de muestra - % pigmento	Primera lectura °C	Segunda lectura °C	Tercera lectura °C
1 (0.5%)	29.60	30.10	31.20
2 (1.00%)	29.90	30.90	32.10
3 (3.00%)	32.00	33.80	35.40
4 (5.00%)	32.30	33.95	35.90

Tabla 4. Información de las tres lecturas obtenidas de las placas.

La relación entre los resultados obtenidos, demuestran que las placas con porcentajes de 3% y 5% tienen una cercanía, igual que los porcentajes de 0.5% y 1%, el rango más separado entre los datos fue entre las placas de 1% y 3%. En esta parte las placas del

3% son las más adecuadas ya que tienen un aumento de temperatura cercano al 5%, mientras que su cantidad de pigmento es menor, dando un material más viable económicamente.

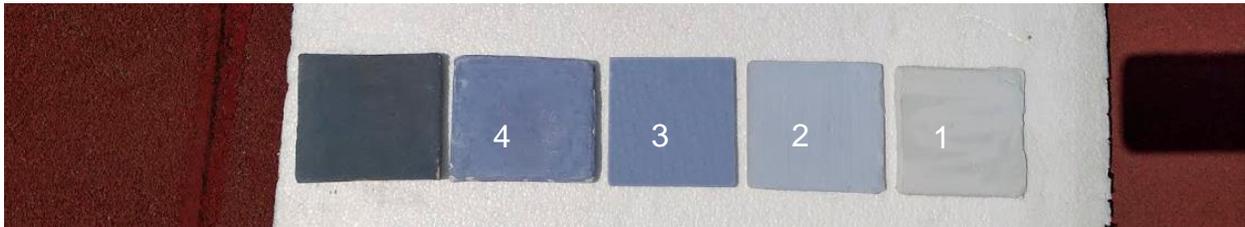
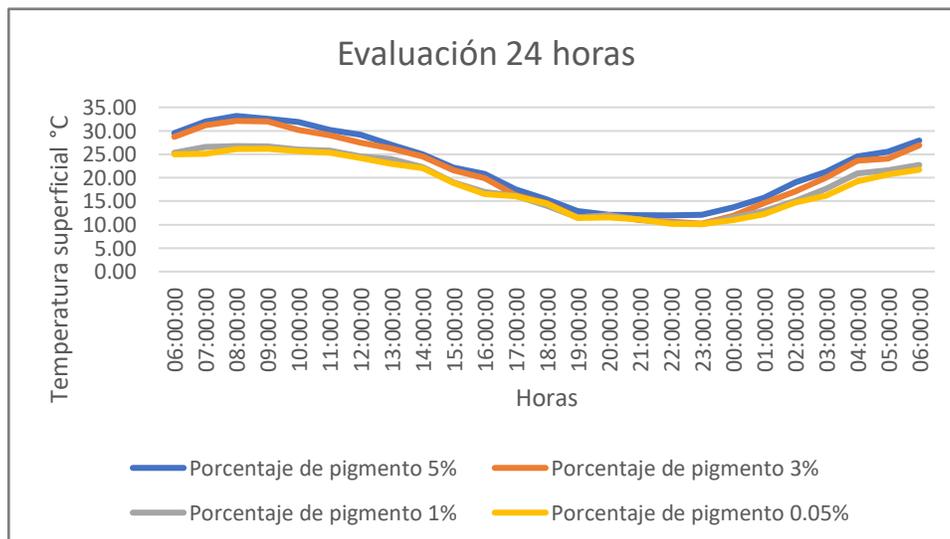


Figura 51. Placas con diferente porcentaje de pigmento expuestas a la radiación solar (intemperie).

4.2 Temperatura superficial de contacto.

El segundo lote de placas de 15x15x1.5 cm se dejaron expuestas a la intemperie, durante 24 horas (ver gráfica No.1), los termopares se colocaron en el centro de la placa y los datos se analizaron por medio del software PC200W. Los resultados obtenidos por medio de los sensores indicaron que las placas con los porcentajes de 5 % y 3% eran cercanos, mientras que se observó una variación mayor para las placas del 3% y 1%. Para las placas de los porcentajes de 1% y 0.5% también presentaron resultados cercanos, pero menores a los otros dos.



Gráfica 1. Resultados de temperatura superficial.

Por medio de estos dos análisis se pudo seleccionar el porcentaje del pigmento adecuado para la investigación, ya que se pretende garantizar un aumento de la temperatura de la pasta fotocromática en las épocas de clima frío para la CDMX. Se consideraron los resultados parecidos entre la placa del 5% y por la similitud con la del 3%, se optó por la segunda, para usar menos pigmento y hacer el material económicamente más viable. Es importante resaltar que la pasta fotocromática esta diseñada para ser utilizada en un sistema constructivo conformado por 2 materiales o más en la envolvente.

4.3 Fuente de calor transitoria.

Las mediciones se realizaron con el sensor SH-1, en un intervalo de tiempo de 15 minutos entre cada lectura, esto para que el instrumento alcanzara nuevamente el equilibrio térmico y el tiempo por cada lectura fue de 2 minutos. Se realizaron un total de 45 lecturas por cada espécimen (15 por lado), teniendo un total de 135 lecturas en el lote de muestras cúbicas. Los resultados se observan en la siguiente tabla:

Pasta fotocromática	Conductividad λ W/(m*K)	Densidad kg/m ³	Calor específico J/kg*K
Máxima	0.875	1,725.650	2,459.93
Mínima	0.651	795.18	2,791.80
Promedio	0.749	1,260.420	2,282.72

Tabla 5. Resultados de las características termo físicas.

Estas tres propiedades presentan las características principales de cualquier material desde una perspectiva térmica. Se debe de considerar que dicho material puede verse alterado cuando se exponga a condiciones medio ambientales, ya que estas mediciones únicamente se realizan sobre la pasta fotocromática en su estado incoloro e inactiva, sin presencia de radiación UV, esto significa que al momento de modificar sus

propiedades ópticas (color), los aumentos de la temperatura superficial pueden variar.

En la tabla No. 6 se realizó una comparativa de las características térmicas de los diferentes materiales de construcción que son utilizados en las fachadas, ordenados de manera gradual con relación a la conductividad.

Material	Conductividad λ W/mK	Densidad Kg/m ³	Calor específico J/kgK
Poliuretano	0.026	30.000	1,400.000
Poliestireno	0.035	50.000	1,675.000
Mortero de cemento	0.090	1,920.000	669.000
Yeso	0.488	1,440.000	837.000
Mortero de cemento/arena	0.530	1,570.000	1,000.000
Pasta fotocromática*	0.749	1,260.420	2,282.720
Ladrillo de arcilla	0.814	1,800.000	921.000
Mármol	2,900.000	2,590.000	800.000

Tabla 6. Información de materiales obtenida del artículo "Selección de materiales en la concepción arquitectónica bioclimática.

Pasta fotocromática *: Información obtenida por medio de experimentación.

La pasta fotocromática presenta una conductividad cercana al mortero cemento/arena y al ladrillo de arcilla, estos materiales son usados de una manera aparente en las fachadas y en el caso del mortero cuando se compara con la pasta, únicamente se sustituye el pigmento por la arena. De esta manera se puede deducir que es un material apropiado y una alternativa para utilizarse en una fachada por su similitud a los materiales convencionales mencionados. Con esta información es importante resaltar que no se deben de dejar atrás las propiedades ópticas y el sistema constructivo (conjunto de materiales que conforman la envolvente), ya que pueden modificar las condiciones de confort en los espacios interiores de la vivienda.

4.4 Reflectancia solar.

La reflexión de una onda electromagnética sucede cuando ésta incide sobre una superficie y parte se refleja y parte se absorbe. Si el haz está compuesto de ondas de muchas longitudes, como es el caso de la radiación solar, dependiendo de las propiedades ópticas de la superficie en la que incide, algunas longitudes de onda se reflejarán y otras se absorberán. Esta particularidad es la que da los colores a los objetos, tratándose del espectro visible. Cuando la reflexión se da en el ultravioleta o en el infrarrojo, no lo percibimos porque son componentes del espectro solar que pertenecen a la parte no visible del espectro, pero si pueden manifestarse en el deterioro del material o en su calentamiento⁴⁷.

El proceso de medición se llevó a cabo con las muestras rectangulares y consistió en tomar 30 lecturas por muestra, con un total de 90. El primer grupo de lectura se realizó sobre las muestras sin ser irradiadas en su estado basal (incoloro), obteniendo un promedio de 0.790. El segundo grupo de lecturas se realizó sobre las muestras irradiadas con una lámpara UV con longitud de onda de 340 nm, obteniendo un promedio de 0.781 (ver figura No. 52).

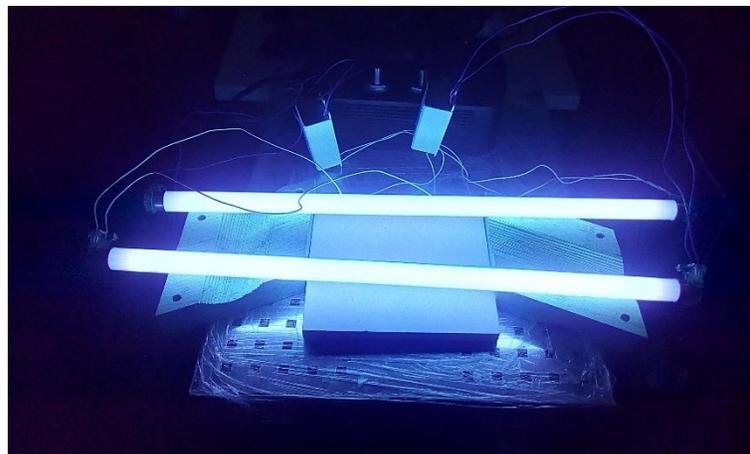


Imagen 52. Lámpara UV con 340 nm.

⁴⁷ Lira Oliver Adriana. Cálculo del índice de la Reflectancia Solar. Determinación y comprensión del índice de la reflectancia solar como factor determinante del comportamiento térmico de las envolventes de los edificios y de los pavimentos. (Práctica de Laboratorio). Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Arquitectura.

El tercer grupo de lecturas se realizó sobre las mismas muestras, pero irradiadas con una lámpara UV con longitud de onda de 313 nm (ver figura No. 53), obteniendo un promedio de 0.775.

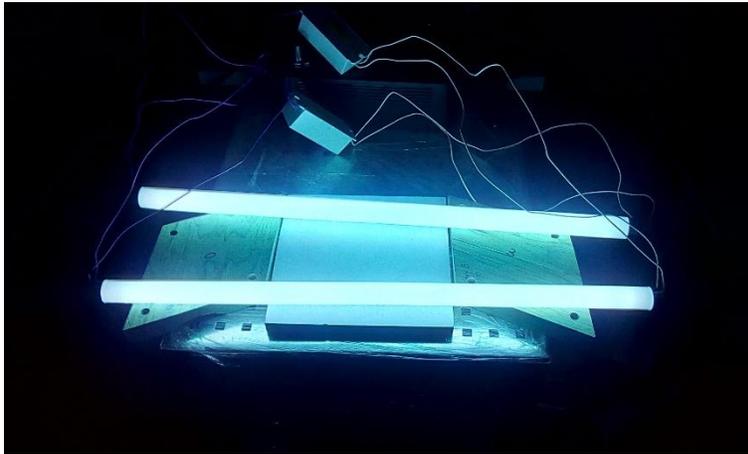


Imagen 53. Lámpara UV con 313 nm.

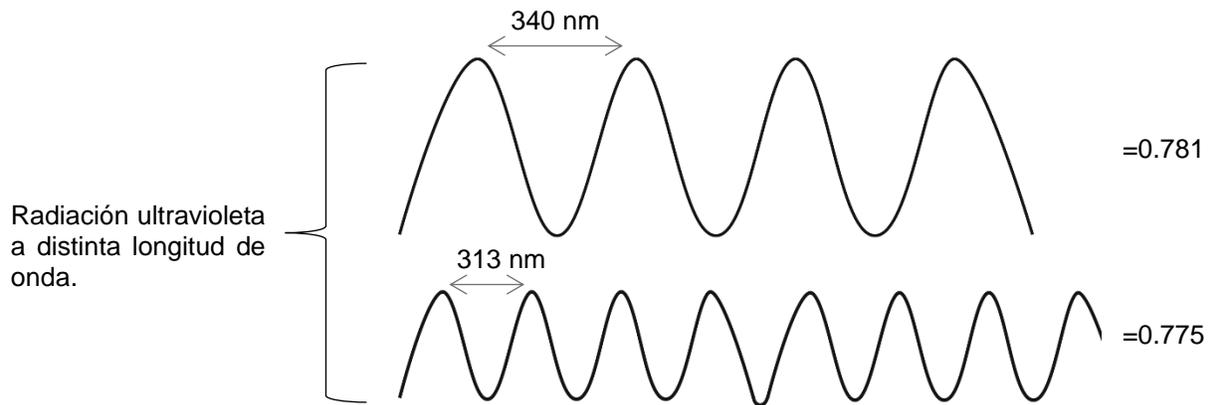


Imagen 54. Esquematación del análisis de reflectancia solar total. Elaboración propia.

4.5 Emitancia térmica.

Un cuerpo a una temperatura T emite radiación electromagnética con una cierta distribución espectral de acuerdo con su temperatura. Si el cuerpo es sólido o líquido el espectro será continuo. El cuerpo emite hacia el medio ambiente que lo rodea y también absorbe radiación de éste. Si el cuerpo está a mayor temperatura que su medio ambiente, radiará con mayor rapidez que con la que absorbe y terminará por enfriarse. Por el contrario, si está más frío que su medio ambiente, absorberá con mayor velocidad que la que emite y se calentará. Si el sistema cuerpo-medio ambiente evoluciona hasta estar ambos a la misma temperatura, se dice que están en equilibrio térmico, y la rapidez de absorción y emisión son iguales⁴⁸.

La emisividad puede tener un valor entre 0 (espejo brillante) y 1.0 (cuerpo negro). El proceso de medición se llevó a cabo con las muestras rectangulares sin ser irradiadas. El resultado obtenido fue de 0.878.

Las dos propiedades ópticas mencionadas juegan un papel importante en la interacción de la temperatura de los espacios interiores, debido a que se encuentran envueltos por este material. En la siguiente tabla se muestran algunas características ópticas de los materiales usados en construcción en conjunto con la información de la pasta fotocromática.

Material	Reflectancia 1 - 0	Emitancia 1 - 0
Concreto	0.10 - 0.35	0.940
Ladrillo rojo	0.23 - 0.27	0.900
Cemento blanco	0.82 - 0.89	-
Pasta fotocromática*	0.775 - 0.781 - 0.79	0.878

Tabla 7. Información de materiales obtenida de GARCIA PASCUA, N., SÁNCHEZ de ROJAS, M. I. y FRÍAS, M. Medidas de color en diferentes materiales de construcción. La restauración en edificios de arenisca. En: Materiales de Construcción. España.
Pasta fotocromática *: Información obtenida por medio de experimentación.

⁴⁸ Lira Oliver Adriana. Cálculo del índice de la Reflectancia Solar. Determinación y comprensión del índice de la reflectancia solar como factor determinante del comportamiento térmico de las envolventes de los edificios y de los pavimentos. (Práctica de Laboratorio). Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Arquitectura.

De acuerdo con las características ópticas de los materiales, la pasta fotocromática tiene una similitud en la reflectancia con el cemento blanco, ya que es un material compuesto con cemento y pigmento, aunque su proporción en masa es menor, debido a la adición del polvo fotocromático, dando como resultado una reflectancia menor.

Con esta información se puede deducir que de acuerdo con el rango de radiación UV aplicada a la pasta, existe una variación en la reflectancia. Debido a que una longitud de onda menor (313 nm) es más energética que una longitud de onda mayor (340 nm), estimulando mayormente el estado basal de la pasta, por lo tanto la excita y genera un dinamismo óptico con mayor intensidad (cambio de color más intenso). Donde podemos resumir todo lo descrito de la siguiente manera, a menor longitud de onda aplicada a la pasta mayor intensidad del color por lo tanto una menor reflectancia, a mayor longitud de onda aplicada a la pasta menor intensidad del color por lo tanto mayor reflectancia (mas cercano al color blanco). Ya que podemos apreciar que los resultados para la pasta sin ser irradiada, está más cercana a la pasta irradiada con 340 nm.

4.6 Intemperismo.

El total de horas analizadas fueron 336 (14 días), lo que simula realmente una duración de 3 meses aproximadamente. Como ya se mencionó, se fabricaron 3 especímenes, a los cuales se le realizaron los ensayos de intemperismo, estas muestras se realizaron sobre el diseño de pasta seleccionado en la segunda etapa de experimentación. El procedimiento consistió en registrar las características antes del ensayo y posterior a este, identificando todas las alteraciones surgidas en las placas.

Los especímenes previos al ensayo de intemperismo, se irradiaron con una lámpara Ultravioleta con longitud de onda de 340 nm para identificar el color en su estado excitado (ver figura No.55).

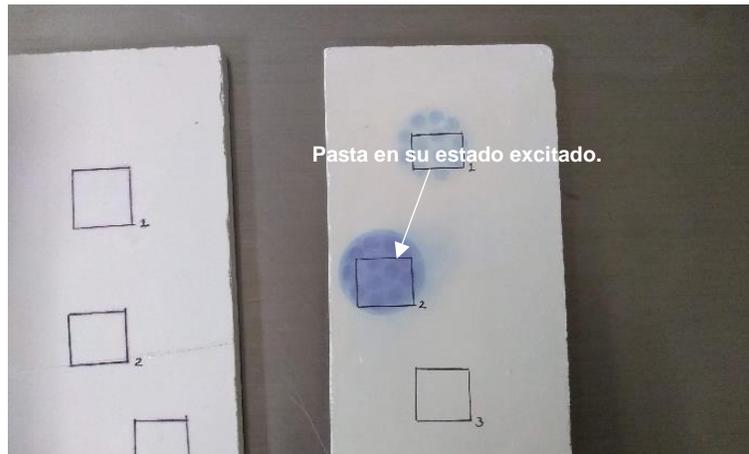


Figura 55. Muestra irradiada con lámpara UV 340 nm.

Especímenes después del ensayo, se irradiaron con la misma lámpara UV (ver figura No. 56).

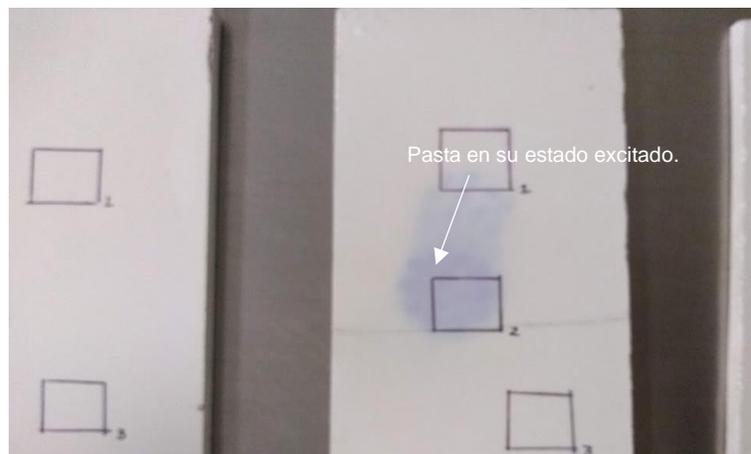


Figura 56. Muestra después de realizar la prueba de intemperismo, irradiada con lámpara UV 340 nm.

Se realizó la comparativa del color por medio de los códigos de RGB y los porcentajes de CMYK.

Especímenes material compuesto antes de ser ensayado			Especímenes material compuesto después de ser ensayado		
Valor de intensidad RGB			Valor de intensidad RGB		
R	112		R	162	
G	120		G	160	
B	166		B	181	
Valor de porcentaje CMYK			Valor de porcentaje CMYK		
C	68%		C	42%	
M	56%		M	36%	
Y	17%		Y	20%	
K	0%		K	0%	

Tabla 8. Cambio de color de muestras, con relación a valores RGB y porcentajes CMYK.



Figura 57. Degradación del color conforme a RGB y CMYK. El inicio es antes de ser ensayado y el final después de ser ensayado.

La degradación del color se debe a que el pigmento es un material orgánico y debido a esta naturaleza tiende a presentar una descomposición química por las reacciones provocadas por el cemento, ya que el polvo del pigmento en un estado puro y en condiciones controladas, no presenta o sufre disminución del color.

Las características observables se realizaron por medio del Microscopio estereoscópico Motic (ver figura No. 58).



Figura 58. Microscopio estereoscópico Motic.

Con este método se pretende conocer las modificaciones físicas que sufrió la placa, ya que debido a su alcance óptico se puede apreciar el comportamiento a una escala mejor que el ojo humano no alcanza a percibir.



Figura 59. Especimen 1, antes del ensayo. Zoom 1x.



Figura 60. Especimen 1, después del ensayo. Zoom 1x.



Figura 61. Especimen 1, antes del ensayo. Zoom 3x.



Figura 62. Especimen 1, después del ensayo. Zoom 3x.

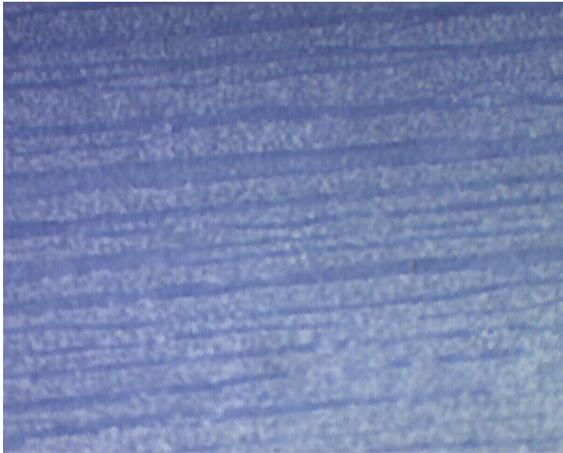


Figura 63. Especimen 1, antes del ensayo. Zoom 5x.



Figura 64. Especimen 1, después del ensayo. Zoom 5x.

Por medio de las imágenes obtenidas con el microscopio, se puede determinar que el material compuesto (pasta fotocromática), no tiene un acabado integral y uniforme, ya que presenta ciertos puntos blancos en la superficie que no pueden ser detectados a simple vista. Aún utilizando un tipo de molde liso y no absorbente, el acabado se verá de esta manera. También se detectaron pequeños poros, causados por burbujas de aire durante su fabricación, en esta parte es imprescindible tener cuidado al momento de vaciar la pasta para que cubra todos los espacios del molde.

A todas las muestras se les tomó un registro geométrico y el peso. Para identificar posibles alteraciones a las placas.

No. de probetas	Peso antes del ensayo (gramos)	Peso después del ensayo (gramos)
A	139.794	121.750
B	135.471	118.965
C	137.856	117.234

Tabla 9. Comparativa del peso de cada probeta, antes y después de ser ensayadas.

En esta parte de la experimentación por medio de los resultados, se aprecia que disminuye el peso de las probetas después de ser ensayadas. Tomando en cuenta que el material compuesto contiene agua, sufre una pérdida de hidratación debido a la

radiación generada por la cámara. En algunas partes de las probetas se llega a apreciar una descomposición del estado basal (incolore) a un color amarillento (ver figura No. 65). Esta descomposición altera la parte superficial de la placa que estuvo expuesta a la radiación (ver figura No. 66). El registro de la geometría no se vio afectada en ningún sentido, se mantuvieron las mismas características de forma ante y después de ser ensayadas.

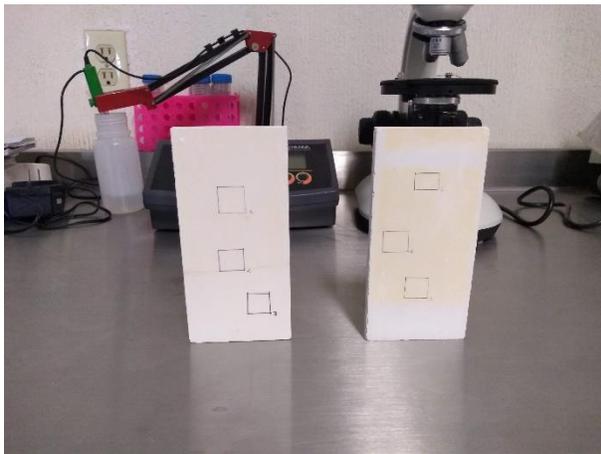


Figura 65. Especimen 1, antes del ensayo. Zoom 5x.

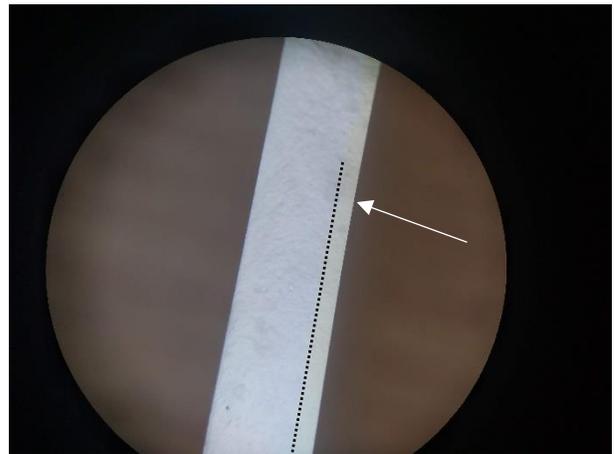


Figura 66. Especimen 1, después del ensayo. Zoom 5x.

4.7 Punto de fusión.

El procedimiento normal para determinar el punto de fusión del pigmento fotocromático en el equipo de Fisher-Jonhs fue:

1. Pesar la cantidad del pigmento fotocromático.
2. Colocar en un cubreobjetos el pigmento en polvo.
3. Encender el equipo y colocar el cubreobjetos en la muestra del contenedor.
4. Ajustar el equipo a una temperatura inicial de calentamiento.
5. Programar un proceso de tiempo gradual de calentamiento.
6. Observar por medio de la lupa el comportamiento físico del pigmento.

- Se registra la temperatura inicial de fusión y final, o en su defecto el registro de cualquier cambio físico que haya tenido la muestra.

Se pesó en la balanza analítica la cantidad de pigmento colocada en el portaobjetos 0.050 gramos. En este caso, no existe una cantidad de la muestra como parámetro para analizar la cantidad estudiada, está en función del tamaño del cubre objetos, considerando no excederse del contorno.



Imagen 67.- Comienzo y registro de aumento de temperatura en el termómetro en grados Centígrados.

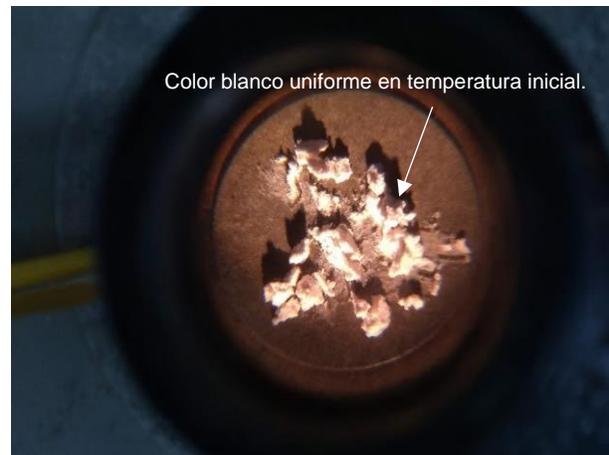


Imagen 68.- Pigmento fotocromático a temperatura ambiente.

En la figura No. 44 se observa un color blanco uniforme del pigmento. Esta imagen fue tomada a temperatura ambiente del laboratorio, antes de incrementar la temperatura.



Imagen 69.- Pigmento fotocromático a una temperatura de contacto 270°C.

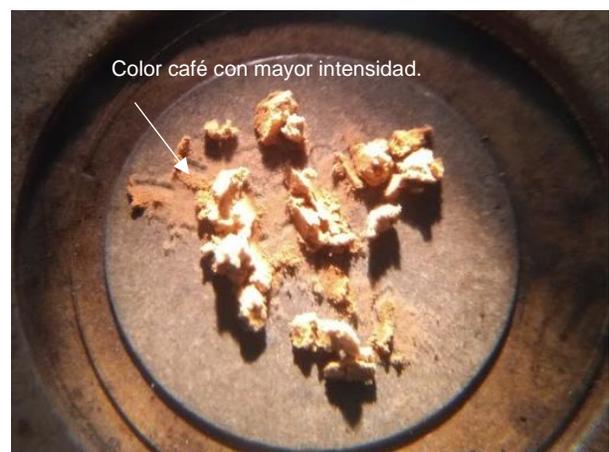


Imagen 70.- Pigmento fotocromático a una temperatura de contacto 300°C.

El pigmento comenzó a cambiar de color en la parte inferior, cuando el termómetro registró una temperatura de 270°C (ver figura No.69), esto se debe a que tenía el contacto más directo con la placa metálica, mientras que en la parte superior se mantuvo el color blanco en su estado basal. La temperatura se incrementó hasta los 300°C, donde el cambio de coloración se apreció con mayor intensidad en todo el pigmento (ver figura No.70), teniendo un aspecto café.

El único cambio físico que presentó la muestra en polvo fue de color, pasando del blanco al café. Esta modificación que sufrió el pigmento fue irreversible, esto significa que no regresó a su color blanco estando nuevamente en una temperatura ambiente.

Tiempo (minutos)	Temperatura °C	Observaciones en la muestra
Inicio	25 °C	Pigmento en color blanco uniforme
15	100 °C	Pigmento en color blanco uniforme
26	150 °C	Pigmento en color blanco uniforme
33	200°C	Pigmento en color blanco uniforme
38	250 °C	Pigmento en color blanco uniforme
42	270 °C	El pigmento sufrió un cambio en el color de blanco a café claro
48	300 °C	El cambio al color café se observó con mayor intensidad

Tabla 10.-Registro de la temperatura de fusión en el pigmento fotocromático.

Los compuestos orgánicos son sustancias químicas formadas por enlaces covalentes carbono-carbono o carbono-hidrógeno. La principal característica de estas sustancias es que arden y pueden ser quemadas, teniendo como resultado una descomposición de la muestra.

La descomposición química es una reacción química no deseada donde la estabilidad de un compuesto es siempre limitada cuando se les expone a condiciones extremas como el calor.

4.8 Espectroscopia UV-visible.



Imagen 71.- Pesaje de la muestra en la balanza analítica.

El análisis se realizó en el pigmento fotocromático, considerando un rango de 285 nm a 500 nm. Primero se tomó una muestra el pigmento y se pesó en la balanza analítica (ver figura No. 71). Posteriormente se limpiaron todas las portas muestras para eliminar cualquier residuo de grasa o polvo que pudiera alterar los resultados y se colocó el pigmento.

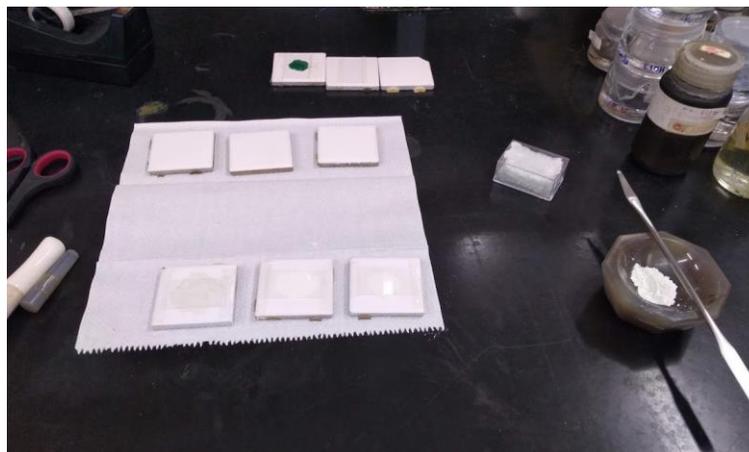
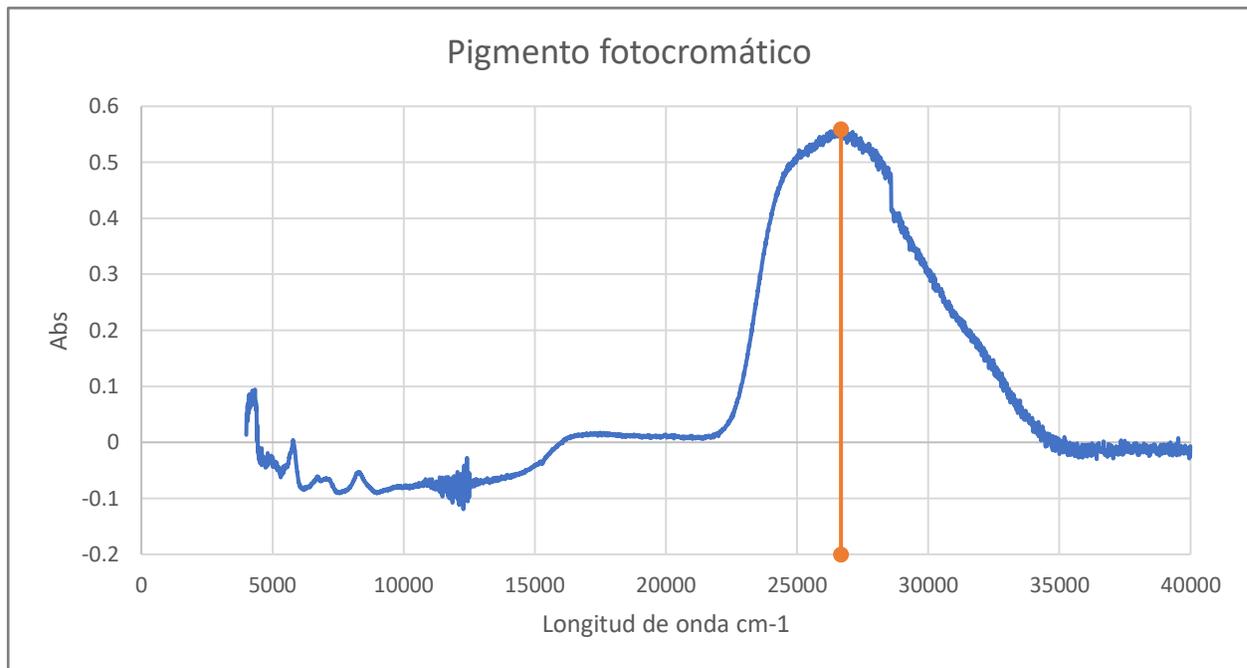


Imagen 72.- Colocación del pigmento en los porta muestras ya limpios.

El espectro de absorción del pigmento se muestra en la Gráfica No.2, se observa que el pico donde probablemente hay un cambio de estructura química es en los 377 nm. Esto significa que el pigmento en el espectro ultravioleta tiene un cambio de estructura y de acuerdo con sus propiedades ópticas, modifica su tonalidad y pasa al espectro visible donde se apreciaría un color azul.



Gráfica 2. Resultados de espectroscopia UV. El pico representa donde absorbe con mayor frecuencia en el espectro ultravioleta. Hay un cambio de estructura del pigmento al espectro visible.

Los materiales fotocromáticos absorben la energía radiante que causa un cambio reversible de una sola especie química entre dos materiales inteligentes con diferentes estados de energía, los cuales tienen diferente absorción de espectros.

También absorben radiación electromagnética en la región ultravioleta para producir un intrínseco cambio de propiedad. Dependiendo de la energía incidente, en el material cambia entre lo reflectivo y lo absorbente, estas partes selectivas del espectro visible. La molécula utilizada para los pigmentos fotocromáticos aparece incolora en su forma inactiva. Cuando se expone a radiación de una longitud de onda particular, su estructura

molecular se altera en un estado excitado, y por lo tanto comienza a reflejarse en longitudes de onda más largas en el espectro visible. Al eliminar la fuente ultravioleta (UV), la molécula volverá a su estado original.

4.9 Análisis elemental.

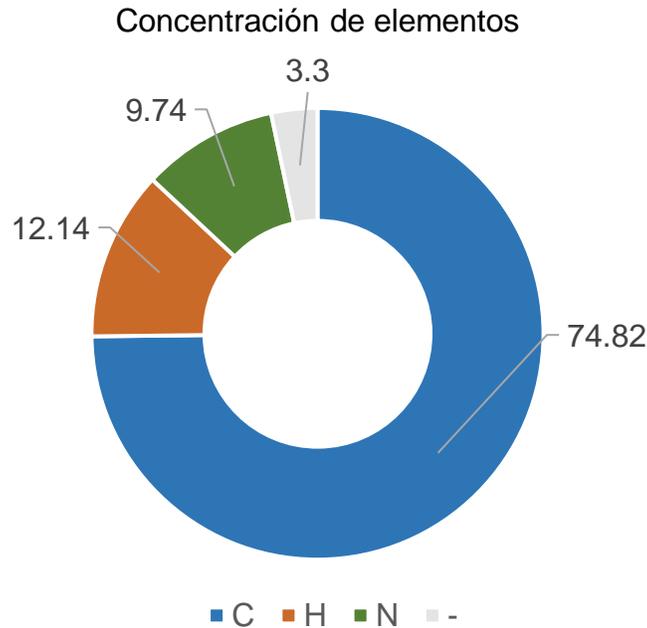
Para la determinación de cada uno de los elementos químicos se realizó la prueba de análisis elemental, la cual identifica de una manera rápida 4 elementos en muestras orgánicas, el resultado final es el promedio de la prueba No. 1 y 2 (ver tabla No.11).

Donde se aprecia una concentración alta de carbono con un porcentaje promedio de 74.82, seguido del hidrógeno con 12.14 y el nitrógeno con 9.74. Los resultados no mostraron presencia de azufre.

Muestra	Composición elemental %			
	N	C	H	S
Pigmento fotocromático (prueba 1)	9.744351387	74.89601135	11.8068161	0.00
Pigmento fotocromático (prueba 2)	9.74755764	74.75893402	12.4883709	0.00
Pigmento fotocromático (promedio)	9.745954514	74.82747269	12.1475935	0.00

Tabla 11.-Resultados del análisis elemental.

Se consideran compuestos orgánicos a todas aquellas sustancias químicas que contienen algún átomo de carbono en su molécula. Los compuestos orgánicos están formados principalmente por diferentes combinaciones de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno.



Gráfica 3.- Composición elemental del pigmento.

La cantidad de 3.3 es el residuo de la sumatoria de todas las concentraciones de los 3 elementos que mostraron concentración en la prueba. Se considera un 100% de concentración en el material analizado.

4.10 Fluorescencia de Rayos X.

La técnica de Fluorescencia se realizó sobre dos muestras, la primera únicamente al pigmento y la segunda a una placa de pasta fotocromática.

Para el pigmento fotocromático, el compuesto que tuvo mayor concentración fue el MgO (óxido de magnesio), de acuerdo con la literatura es un compuesto químico mineral sólido y es una fuente del magnesio. Como segundo compuesto con mayor concentración fue el CaO (óxido de calcio).



Imagen 73.- Fluorescencia de rayos X en el pigmento fotocromático.

En el caso de la pasta fotocromática los valores que presentaron mayor concentración fueron para el compuesto CaO (óxido de calcio) y seguido el SiO_2 (óxido de silicio). Estos resultados verifican las características del cemento blanco en donde predominada el óxido de calcio que es el compuesto que se añade al cemento para sustituir en porcentaje a los óxidos férricos dándole la peculiaridad del color blanco.



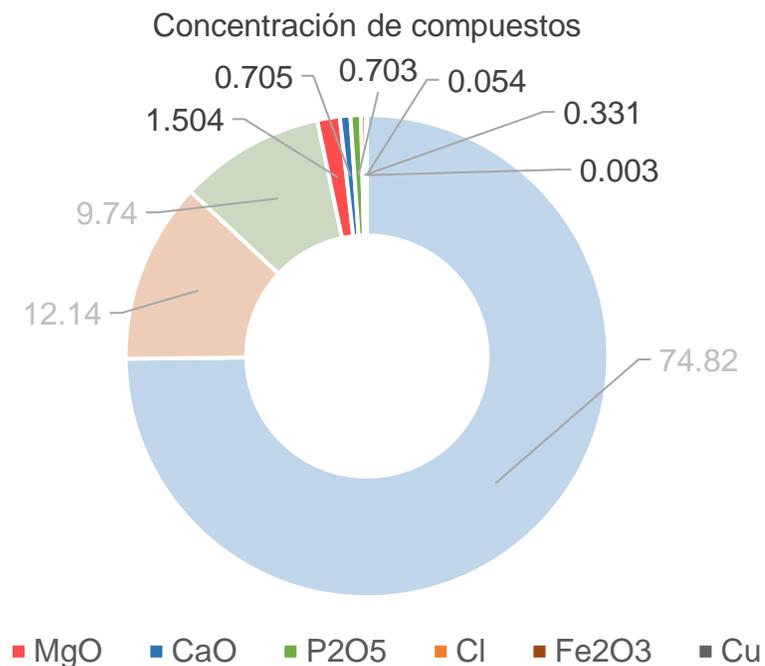
Imagen 74.- Fluorescencia de rayos X en la pasta fotocromática.

La concentración en masa de cada una de las muestras analizadas se describe en la tabla No.12, los resultados son el promedio de 5 pruebas en cada caso.

Muestra	Composición elemental (mg/kg)												
	MgO	CaO	P2O5	Cl	S	Fe2O3	Cu	SiO2	K2O	Al2O3	Al2O3	TiO2	Sr
Material compuesto	-	51.591	0.380	-	0.031	0.255	-	14.394	3.788	1.764	-	0.045	0.030
Pigmento fotocromático	1.504	0.336	0.334	0.331	-	0.054	0.003	-	-	-	-	-	-

Tabla 12.-Resultados de la composición elemental.

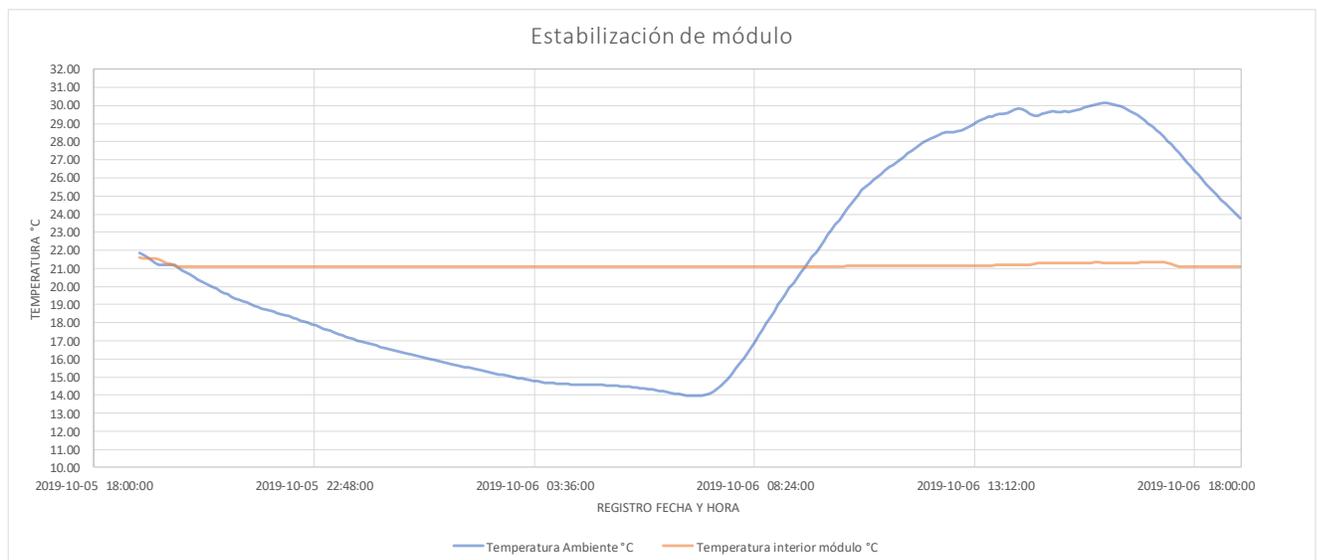
De acuerdo con los resultados en la técnica de análisis elemental, se consideró un residuo del 3.3% de la concentración del material. En la técnica de fluorescencia de rayos X se analizó el residuo faltante ya que es una prueba que analiza un rango más amplio de elementos químicos y/o compuestos. En la gráfica No.4 se muestra la composición total del pigmento.



Gráfica 4.- Compuestos químicos del pigmento.

4.11 Módulo de prueba.

Se realizaron mediciones de temperatura del espacio interior en intervalos de 5 minutos durante 24 hrs, tomando como referencia de inicio el día 03 de octubre a las 19:00 hrs y término el día 04 de octubre a las 19:00 hrs, con una orientación norte sur. Se consideró un día con una temperatura ambiente máxima de 30.17°C y mínima de 14°C, mientras que el módulo mantuvo una temperatura interior de 21°C durante las 24 hrs. Este módulo fue tomado de una investigación de posgrado de generación anterior⁴⁹, el cual se construyó con las mismas características, aunque ya se contaba con antecedentes de su previa evaluación de estabilización térmica, se procedió a realizarlo nuevamente para descartar posibles fallas.



Gráfica 5.-Resultados de hermeticidad en un día con condiciones ambientales.

Una vez comprobada la hermeticidad del módulo de experimentación, se procedió a retirar su cara desmontable con orientación sur y colocar una nueva cara con una placa de la pasta fotocromática (ver figura No.75).

⁴⁹ Gómez, García David Arnulfo (2017). Muro colector solar para calentamiento de agua en vivienda vertical (Tesis para obtener el grado de maestra en arquitectura) Universidad Nacional Autónoma de México.

En esta etapa del análisis con el módulo hermético, fue comprobar las fluctuaciones de temperatura del espacio interior, generadas por el material compuesto.



Imagen 75.- Módulo de experimentación con la muestra colocada.

Se registro una nueva temperatura interior de 23.88 °C como base el día 07 de octubre del 2020 a las 12 p.m., y al mismo tiempo se registró la temperatura ambiente de 22.75 °C. La temperatura de control se modificó con relación a los 21°C con los que se realizó la prueba de hermeticidad, debido a las maniobras de montar y desmontar nuevamente una cara del módulo, lo que genero un intercambio entre el exterior e interior, dando como resultado una nueva temperatura en el espacio interior.

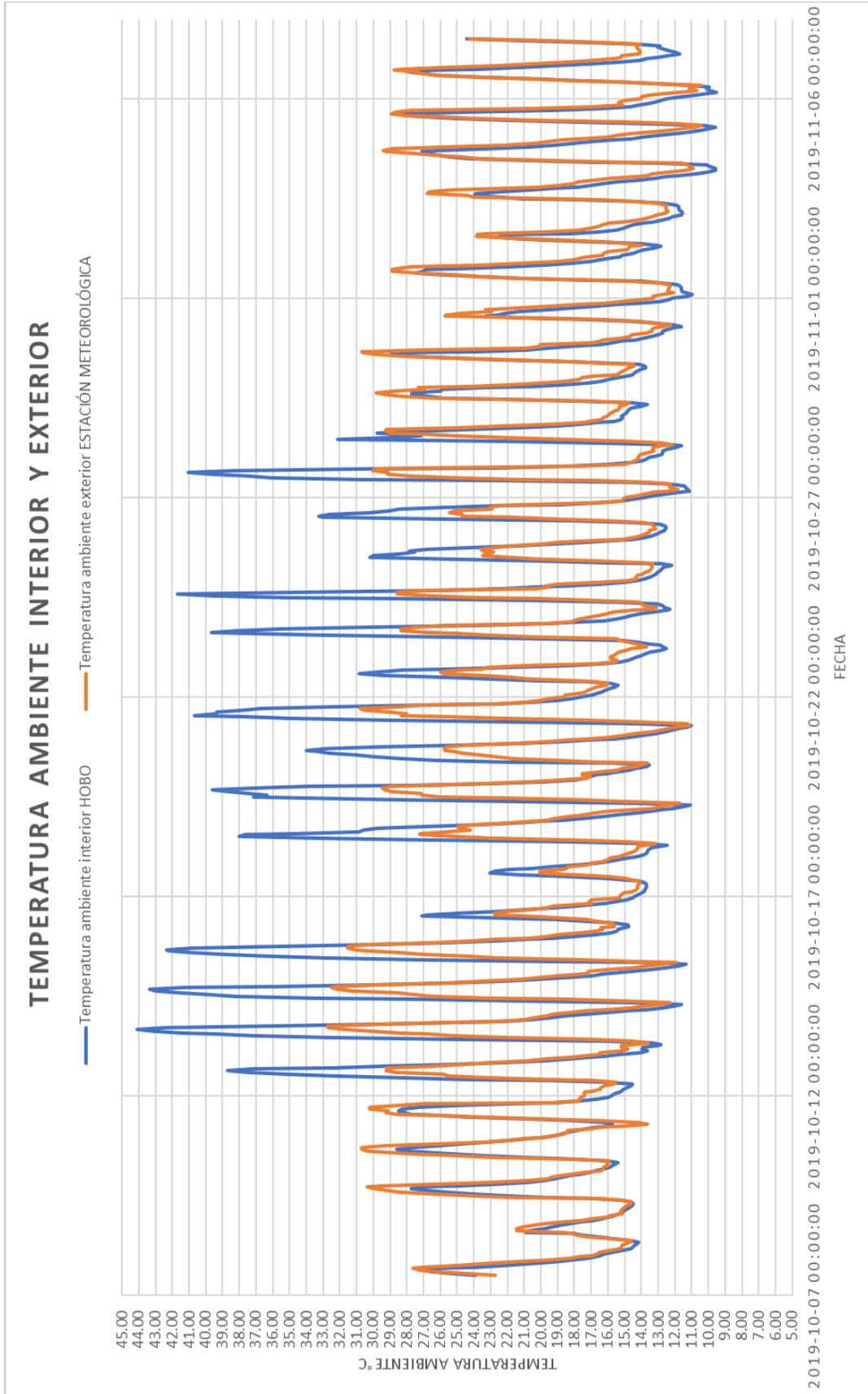


Imagen 76.- Estación meteorológica, Laboratorio de Edificación Sostenible, Facultad de arquitectura, UNAM.

La estación meteorológica donde en la cual se obtuvo la información, está ubicada en la Facultad de Arquitectura de la UNAM, perteneciente al Laboratorio de Edificación Sostenible (ver figura No. 76).

Las mediciones con el material compuesto se realizaron durante un mes iniciando el 07 de octubre a las 12 hrs y terminando el 07 de noviembre a las 12 hrs del mismo año 2019.

Los resultados se muestran la siguiente gráfica No.6, donde se hace la comparativa de los registros de un mes entre ambas temperaturas, los datos que se registraron corresponden a la lectura entre cada hora. Se obtuvo un total de 745 lecturas por cada espacio.



Gráfica 6.-Resultados de la temperatura del espacio interior del módulo y temperatura ambiente exterior.

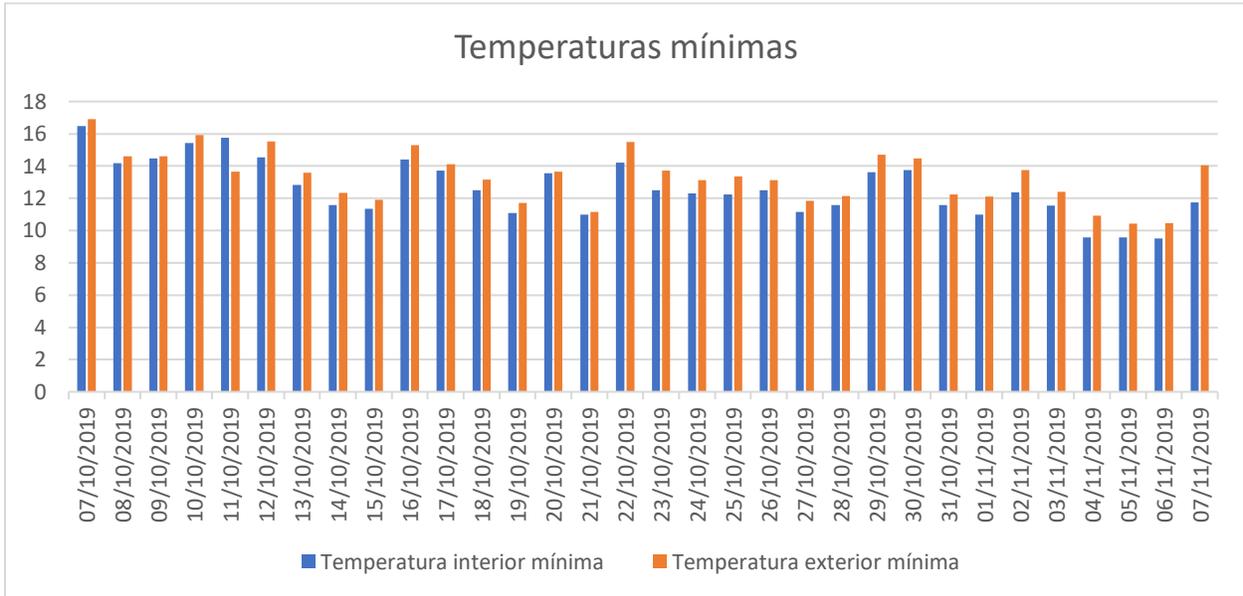


Se observa que las fluctuaciones entre ambos espacios son graduales, esto significa que al momento en que las condiciones exteriores aumentaban o disminuían, el espacio interior del módulo se comportaba igual, aunque en rangos de temperatura diferente, mas altos y mas bajos. Las temperaturas mas altas se registraron durante el día entre las 14:00 y 16:00 hrs durante todo el mes, la lectura del espacio interior mas alta corresponde al 13 de octubre a las 16:00 hrs que fue de 44.07°C, de igual manera la temperatura exterior mas alta fue el mismo día y pero a las 17:00 hrs que fue de 32.70°C. Mientras que las temperaturas mas bajas se registraron por la mañana entre las 04:00 y 08:00 hrs durante todo el mes, la lectura del espacio interior mas baja corresponde al 06 de noviembre a las 04:00 hrs que fue de 9.51°C, mientras que la temperatura exterior mas baja fue el 05 de noviembre a las 08:00 hrs que fue de 10.43 °C.

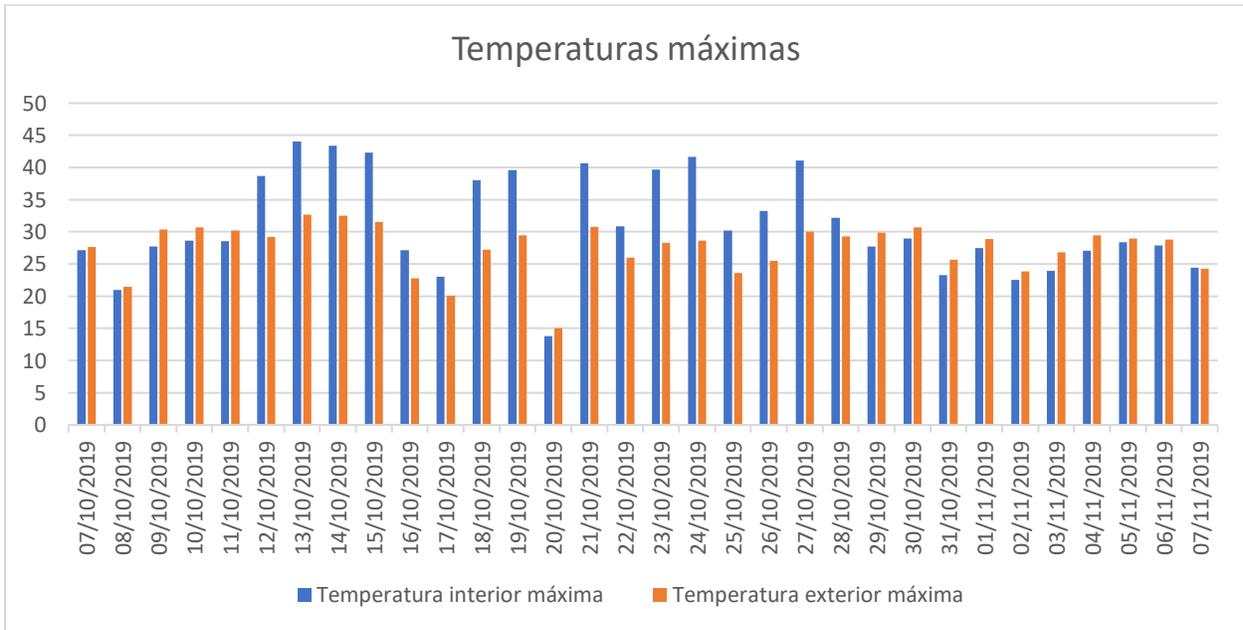
En la tabla No.13 se muestran las temperaturas mas bajas y altas tanto en interior como exterior.

Fecha	Temperatura interior mínima	Temperatura exterior mínima	Temperatura interior máxima	Temperatura exterior máxima
07/10/2019	16.49	16.91	27.11	27.63
08/10/2019	14.17	14.59	20.94	21.45
09/10/2019	14.48	14.59	27.75	30.36
10/10/2019	15.41	15.92	28.62	30.71
11/10/2019	15.75	13.66	28.52	30.19
12/10/2019	14.53	15.51	38.70	29.22
13/10/2019	12.82	13.59	44.07	32.70
14/10/2019	11.59	12.33	43.37	32.48
15/10/2019	11.35	11.91	42.33	31.55
16/10/2019	14.39	15.31	27.11	22.78
17/10/2019	13.71	14.11	23.04	20.08
18/10/2019	12.49	13.16	38.00	27.21
19/10/2019	11.08	11.70	39.60	29.48
20/10/2019	13.55	13.66	13.83	15.02
21/10/2019	11.00	11.15	40.69	30.78
22/10/2019	14.22	15.48	30.87	26.01
23/10/2019	12.51	13.71	39.66	28.33
24/10/2019	12.29	13.12	41.68	28.59
25/10/2019	12.22	13.35	30.19	23.58
26/10/2019	12.51	13.14	33.23	25.46
27/10/2019	11.15	11.84	41.04	30.05
28/10/2019	11.59	12.14	32.15	29.25
29/10/2019	13.62	14.71	27.70	29.85
30/10/2019	13.74	14.47	28.97	30.71
31/10/2019	11.59	12.23	23.30	25.70
01/11/2019	10.98	12.12	27.48	28.89
02/11/2019	12.36	13.75	22.49	23.84
03/11/2019	11.54	12.39	23.93	26.81
04/11/2019	9.58	10.93	27.09	29.42
05/11/2019	9.56	10.43	28.39	28.95
06/11/2019	9.51	10.45	27.90	28.76
07/11/2019	11.73	14.06	24.44	24.25
	9.51	10.43	44.07	32.70
	Mínima interior	Mínima exterior	Máxima interior	Máxima exterior

Tabla 13.-Temperaturas mínimas y máximas por día y general.



Gráfica 7.-Comparativa entre temperaturas mínimas en interior y exterior.



Gráfica 8.-Comparativa entre temperaturas máximas en interior y exterior.

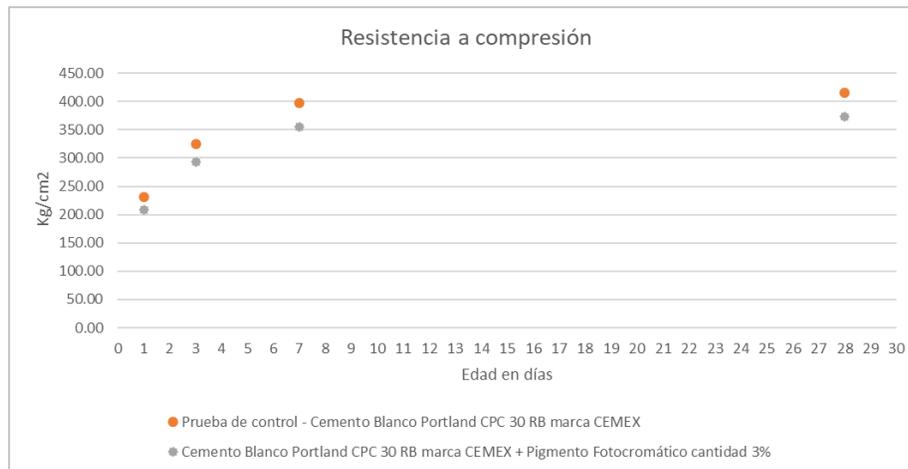
4.12 Resistencia a esfuerzos de compresión.

Los resultados para la muestra de control fueron los esperados ya que cumplieron con las especificaciones establecidas en la ficha técnica, estos números funcionaron como punto de partida para verificar que los ensayos a la pasta fotocromática fueran factibles, donde se observó una disminución de la resistencia en promedio de un 10.14% (ver tabla No. 14).

Tipo de muestra	Promedio de resistencia de 3 muestras a 24 hr (kg/cm ²)	Promedio de resistencia de 3 muestras a 3 días (kg/cm ²)	Promedio de resistencia de 3 muestras a 7 días (kg/cm ²)	Promedio de resistencia de 3 muestras a 28 días (kg/cm ²)
Prueba de control - Cemento Blanco Portland CPC 30 RB marca CEMEX	231.00	326.00	398.00	416.00
Cemento Blanco Portland CPC 30 RB marca CEMEX + Pigmento Fotocromático cantidad 3%	208.00	293.00	355.00	373.00
Relación de disminución de la resistencia (%)	9.95%	10.12 %	10.80 %	10.33 %
Promedio disminución de resistencia (%)	10.30 %			

Tabla 14.-Resultados de pruebas a compresión.

Se llegó a la conclusión de que esta disminución de la resistencia es debido a que el pigmento no tiene un comportamiento mecánico como el cemento, ya que la proporción del pigmento fue del 3% en relación con la masa del cemento seco. Manteniendo la misma cantidad de agua para todas las muestras ensayadas.



Gráfica 9.-Resultados de pruebas a compresión.

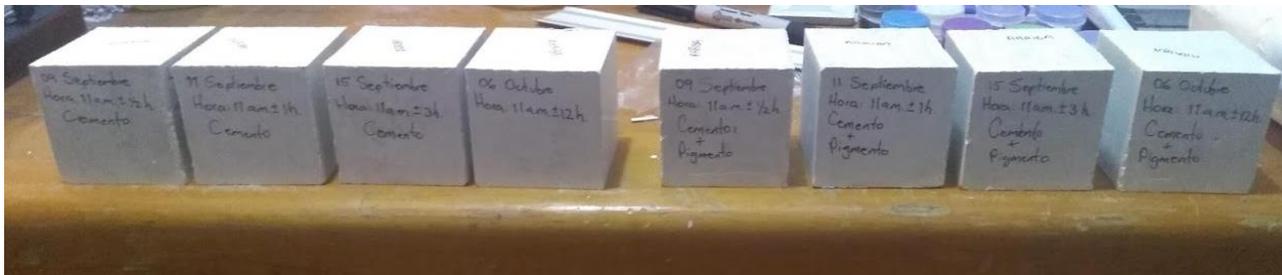


Imagen 77.- Muestras en cubos de 5 cm para ser ensayados – Referencia NMX-C-061-ONNCCE-2015.

4.13 Simulación módulo de prueba.

4.13.1 Localización del módulo de prueba.

Se consideró la Ciudad de México como lugar de estudio y se utilizó un archivo EPW con información climática del mismo sitio, el cual es un archivo de datos meteorológicos guardado en el formato estándar de EnergyPlus y que es utilizado por el software de simulación térmica dinámica ya mencionado, desarrollado por el Departamento de Energía de Estados Unidos (DoE); contiene datos meteorológicos que se utilizan para ejecutar simulaciones de uso de energía.

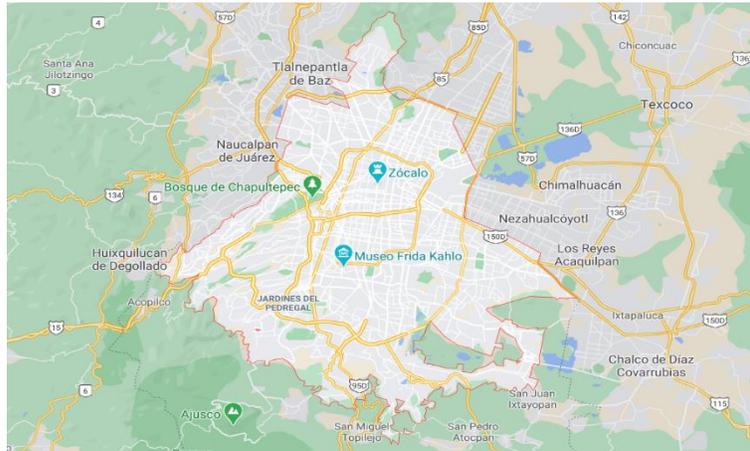


Imagen 78.- Ciudad de México, lugar de estudio con información del archivo EPW.

4.13.2 Descripción del módulo.

El módulo simulado, tuvo una geometría en forma de cubo con 1 metro por lado. Su envolvente durante la simulación consistió en un sistema constructivo adiabático, para evitar el intercambio de calor con el entorno. Durante el proceso de la simulación, solo una cara no mantuvo estas características (ver figura No.79) y se consideró la información de la pasta fotocromática obtenida previamente en la experimentación con un espesor del material de 1.5 cm.

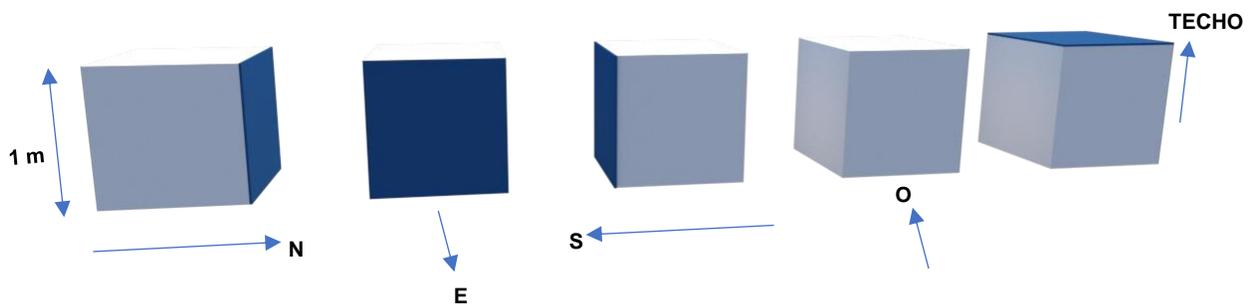


Imagen 79.- Proceso de simulación, se consideró una cara por corrida para el material fotocromático.

4.13.3 Descripción de la simulación.

Para fines prácticos a continuación se describe el proceso de la simulación de una sola corrida, se toma como ejemplo la pasta excitada con una longitud de onda de 313 nm con orientación norte.

Se utilizó la versión 9.1.0 del software Energy Plus. Esta versión se actualizó por medio del IDF versión update (herramienta propia del EP), ya que existía una versión generada automáticamente 8.1.0 del archivo (ver figura No. 80). Se muestra la ruta del archivo.

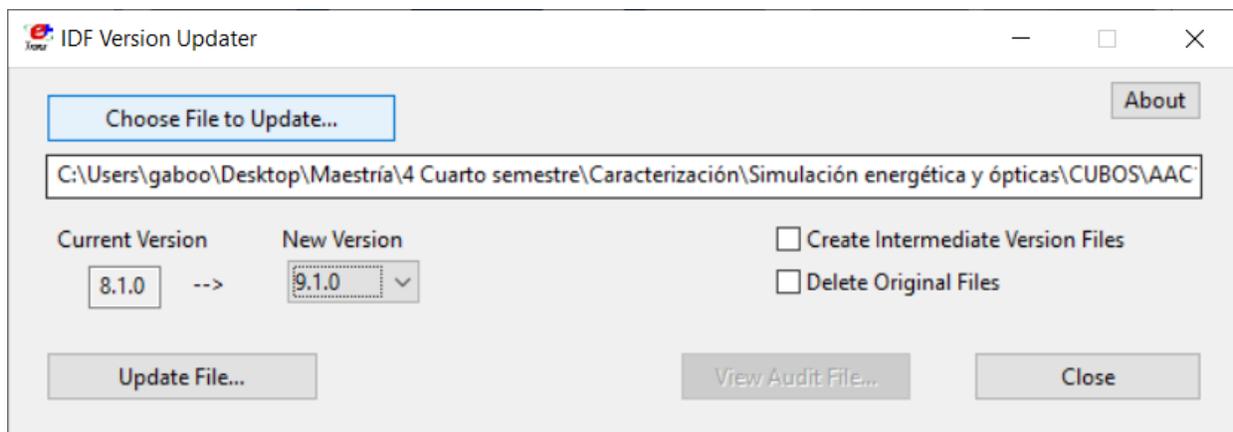


Imagen 80.- IDF versión updater, proceso para cambio de versión 8.1.0 a 9.1.0

La información para la simulación se introdujo por medio del componente EP launch (ver figura No.81), como ya se mencionó es una forma fácil de selección y ejecución de archivos. Se localizó el archivo del módulo por medio del navegador, así como el archivo climático EPW directamente de la página de energy plus,⁵⁰ una vez obtenida la ruta de ambos archivos se utilizó el componente IDF editor para modificar las características propias del elemento (ver figura No.82).

⁵⁰ https://energyplus.net/weather-location/north_and_central_america_wmo_region_4/MEX//MEX_Mexico.City.766790_IWEC

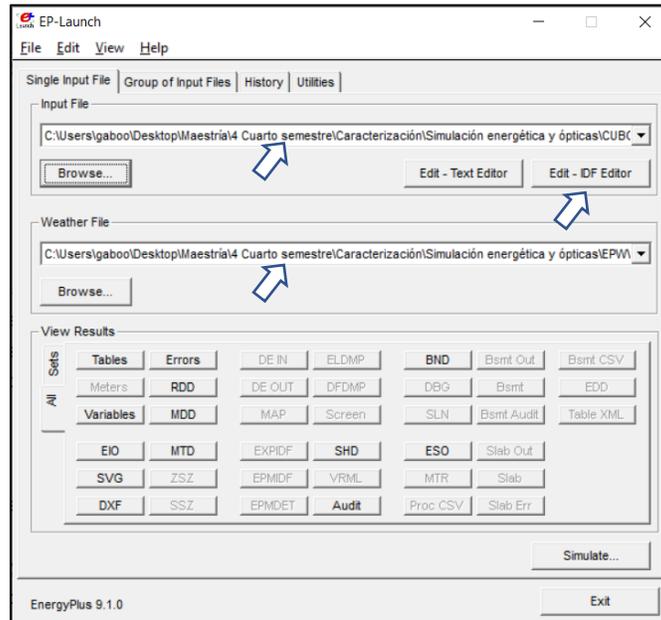


Imagen 81.- EP launch.

La simulación considera el análisis únicamente de los materiales que conforman la envolvente del módulo. No se toman en cuenta factores de calefacción, ventilación y aire acondicionado mecánicos, así como de ocupación por horario que puedan modificar las condiciones de temperatura del espacio interior.

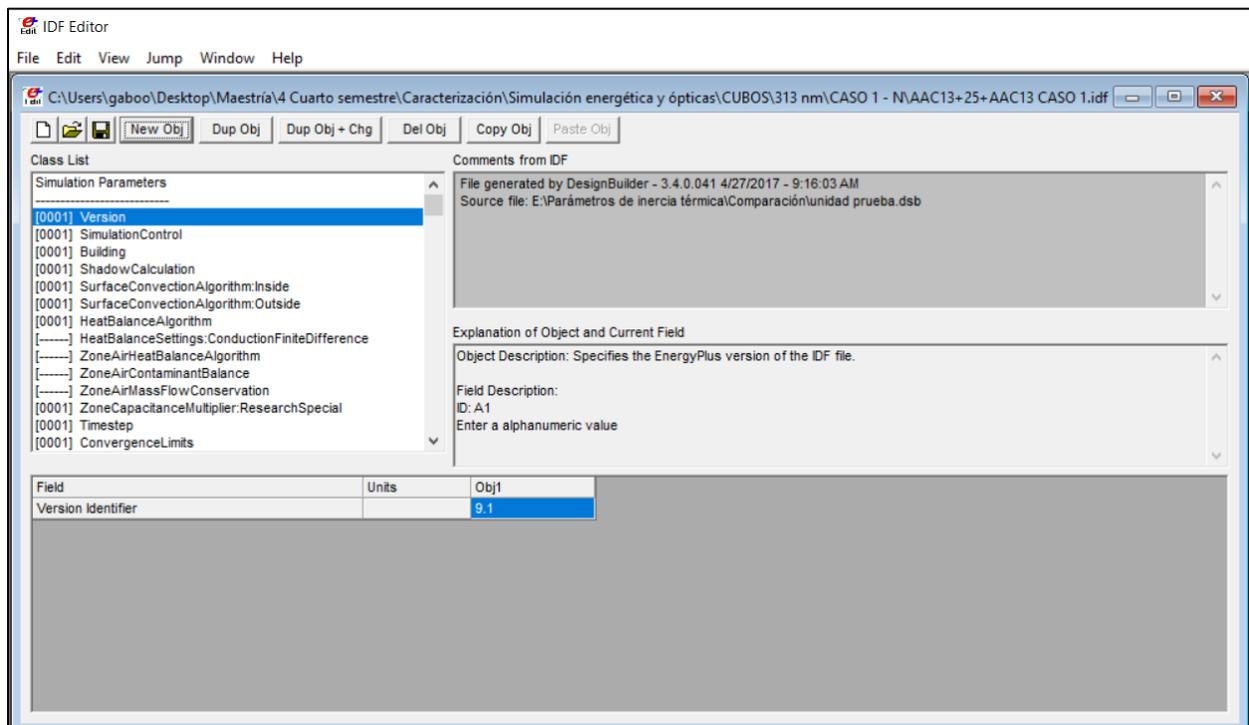


Imagen 82.- IDF editor.

Se utilizó un algoritmo de convección superficial en el interior TARP y exterior DOE-2. Se trabajó con un algoritmo de balance de calor “conduction transfers function”. La localización del sitio se configura por defecto al introducir el archivo EPW.

La pestaña de Material contiene la información térmica propia de un material. Se ingresaron los resultados obtenidos en la caracterización térmica de la pasta fotocromática (ver Figura No.83). También se ingresó la información del concreto considerando un espesor de 10 cm.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4	Obj5	Obj6
Name		AAC	RT25HC	Poliuretano	AAC rojo	concreto	pasta UV 313
Roughness		MediumRough	MediumSmooth	MediumSmooth	MediumRough	MediumSmooth	MediumSmooth
Thickness	m	0.013	0.074	0.013	0.013	0.1	0.015
Conductivity	W/m-K	0.19	0.2	0.023	0.19	1.4	0.749
Density	kg/m3	700	880	24	700	2300	1260.42
Specific Heat	J/kg-K	1050	2000	1590	1050	880	2282.721
Thermal Absorptance		0.9	0.9	0.9	0.9	0.88	0.878
Solar Absorptance		0.6	0.7	0.7	0.7	0.6	0.225
Visible Absorptance		0.6	0.7	0.7	0.7	0.6	0.225

Imagen 83.- IDF editor, pestañas de trabajo.

La pestaña Construction (ver figura No.84) contiene las características de un sistema constructivo (conformado por más de un material).

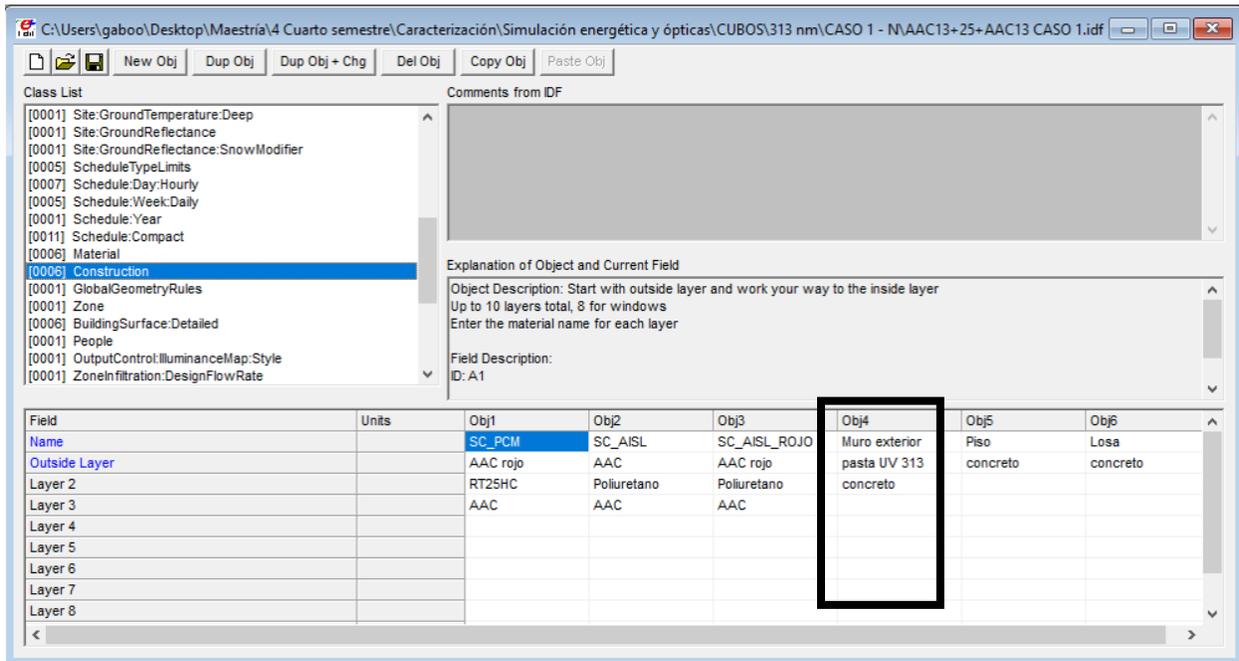


Imagen 84.- IDF editor, pestaña Construction.

En la pestaña de BuildingSurface:Detailed se generan las modificaciones del espacio interior por medio de la subpestaña outside boundary conditions: ya que se coloca un sistema adiabático en toda la envolvente excepto en la orientación norte donde se utiliza un sistema outdoors. Esta personalización de trabajo permite que la simulación únicamente modifique las condiciones de la temperatura para el espacio interior debido al material propuesto.

4.13.2 Determinación de los intervalos de confort.

El estado de confort de una persona es aquel que se caracteriza por tener las condiciones estables psicológicas y físicas. Esto es posible debido a la interacción entre el entorno y la persona, propiciando los niveles óptimos de temperatura para que el cuerpo humano sea capaz de entrar en estabilidad, sin alterarlo físicamente.

El rango de confort térmico se obtiene a partir de la temperatura térmica neutra basada en la ecuación del modelo de Dear.

$$T_n = 17.8 + 0.31 T_{\text{amb mens}}$$

Donde $T_{\text{amb mens}}$, es la temperatura ambiente mensual media de la Ciudad de México y T_n es la temperatura térmica neutra. Tomando como referencia esta ecuación los límites de confort se consideran restando y sumando 2.5 °C de la temperatura térmica neutra para obtener la temperatura máxima térmica admisible.

Mes	T neutra mínima	T neutra máxima
enero	19.9	24.9
febrero	20.1	25.1
marzo	20.8	25.8
abril	21.1	26.1
mayo	21.2	26.2
junio	21.1	26.1
julio	20.8	25.8
agosto	20.7	25.7
septiembre	20.7	25.7
octubre	20.3	25.3
noviembre	20.1	25.1
diciembre	19.5	24.5

Tabla 15.-Rangos de confort térmico mensuales en la Ciudad de México.

Se cuantificó las horas mas frías, las mas calientes y las horas de confort térmico en un año. Se consideraron 8,760 horas anuales, tomando como referencia la siguiente ecuación:

$$T_{\text{confort}} = 8760 - (t_{\text{fría}} - t_{\text{caliente}})$$

Donde T_{confort} es el número de horas dentro del rango de confort térmico, $t_{\text{fría}}$ son las horas frías por debajo del rango de confort térmico y t_{caliente} el número de horas sobre el rango de confort térmico.

Pasta	Tiempo	Horas de confort	Horas frías	Horas calientes
340 nm	Anual	3,680.00	4,110.00	970.00
313 nm	Anual	3,560.00	4,120.00	1,080.00
sin excitación	Anual	3,453.00	4,187.00	1,120.00

Tabla 16.-Número de horas anuales (horas frías, horas calientes y horas de confort).

El número de horas con un mayor confort térmico fue para la pasta de 340 nm, ya que la coloración presenta una mayor tonalidad cuando está excitada con este rango de longitud de onda. Lo que reduce las horas frías y las horas calientes en mayor medida comparadas cuando son irradiadas a diferente longitud.

La diferencia entre las 3 pastas no es tan variable cuando se comparan con la que no está excitada, siendo esta la que no presenta una variación en el tono, conservando su estado basal (blanco).

CONCLUSIONES

La selección del porcentaje del pigmento fotocromático está en función de los límites máximos y mínimos para que muestren un aspecto de color apreciable para el ojo humano, sin afectar su capacidad mecánica.

La diferencia de temperatura superficial fue de 0.4°C para las placas de 5% y 3%, 1.86°C para las placas de 3% y 1%, 0.4°C para las placas de 1% y 0.5%.

El aumento de la temperatura superficial de la pasta está relacionado a la cantidad de pigmento adicionado. Cuando se incrementa el porcentaje de pigmento fotocromático, las temperaturas son cada vez más altas, siempre y cuando estén expuestas a la radiación solar (estado excitado).

Las propiedades ópticas presentan una variación de 0.01 entre las lecturas de la muestra sin ser irradiada y la de 340 nm, 0.006 entre las lecturas de la muestra irradiadas a 340 y 313 nm.

La caracterización química demuestra una naturaleza orgánica en el pigmento, correspondiente a concentraciones altas de elementos químicos tales como el carbono (material carbónico).

El Cemento Blanco Portland CPC 30 RB baja su resistencia mecánica al agregarle pigmento de manera gradual. A mayor cantidad de pigmento se presenta una deficiencia al observar los resultados de los ensayos mecánicos.

El efecto del cambio de tono blanco a café del pigmento se debió a una descomposición térmica, causada por la aplicación de la temperatura.

Cuando una pasta fotocromática es implementada en una envolvente, las condiciones de confort al interior aumentan, esto se debe al cambio de estructura molecular del material, lo que sería para el ojo humano un cambio de color. La reflectancia de la pasta esta en función de la onda que transmite y absorbe, calentando y/o enfriando, dependiendo del material y de su tonalidad.

Un pigmento orgánico es una molécula orgánica que actúa como pigmento, lo que significa que cambia el color de la luz reflejada o transmitida como resultado de la absorción selectiva de longitud de onda.

Bibliografía:

Cengel, Yunus A. (2007). Transferencia de calor y masa. Un enfoque práctico. Universidad de Nevada, Reno. Mc Graw Hill.

Addington, Michelle., Schodek Daniel. (2005). Materiales inteligentes y nuevas tecnologías: Para la arquitectura y profesiones de diseño. Harvard University. ELSEVIER.

Chávez, Galán Jesús (2009). Evaluación experimental de propiedades térmicas de materiales de construcción nacionales y desarrollo de ventanas ahorradoras de energía. (Tesis para obtener el grado de Doctor). Universidad Nacional Autónoma de México.

Bachiller, R., (2009) "El Sol: nuestra estrella, nuestra energía" El Sol. Pp. 371-382.

Riveros Rosas, D., Valdés Barrón, M., Arancibia Bulnes, C.A., & Bonifaz Alfonso, R. (2012). La radiación solar. México D.F. UNAM. Editorial Terracota.

Mazria, E., Serra-florensa, R., & Mazria, E. (1983). El libro de la energía solar pasiva. México. Gustavo Gili.

National Renewable Energy Laboratory. (Noviembre 2015). Recuperado de http://www.nrel.gov/rredc/solar_data.html.

The European Database of Daylight and Solar Radiation. (Noviembre 2015). Recuperado de: <http://www.satel-light.com/core.htm>.

Marte R. Manuel Alberto, Saltos del Hierro Paul (2011). Fachadas. Segunda Práctica. Escuela Politécnica Superior de Edificación de Barcelona.

Sosa, Ma. Eugenia. "Desarrollo de Método Paramétrico para Determinar Índices de

Eficiencia Energética para Fachadas en Edificios con Sistema de Acondicionamiento Activo. Caso Estudio: Edificios de Oficina en Caracas y Maracaibo-Venezuela”. Tesis Doctorado de la Facultad de Arquitectura y UrbanismoUCV – Caracas, Diciembre 2008.

Maldonado, Sanchez Liliana Yeraldine (2018). Irradiación Solar Global en planos verticales para aplicación arquitectónica (Tesis para obtener el grado de maestra en arquitectura) Universidad Nacional Autónoma de México.

Gómez, García David Arnulfo (2017). Muro colector solar para calentamiento de agua en vivienda vertical (Tesis para obtener el grado de maestra en arquitectura) Universidad Nacional Autónoma de México.

Powers, T.C., (1958), Estructura y propiedades físicas de la pasta de cemento, fraguado. Callejas Ortego, M. A. (2015). Análisis y estudios metodológicos de las aplicaciones de los materiales con memoria de forma y super elasticidad en arquitectura y urbanismo (Doctorado). Escuela Técnica Superior de Arquitectura Departamento de estructuras de la edificación e ingeniería del terreno Universidad de Sevilla.

Cuesta Rios, K. M. (2018). Estrategias de diseño sostenible a partir de la noción de confort térmico (Maestría). Universidad católica de Colombia Facultad de Diseño.

Montalván Luna, R. I., Suárez Mora, D. L., & Téllez Linares, A. E. (2010). Estudio y fabricación normativa de la fabricación del cemento (Licenciatura). Instituto Politécnico Nacional.

Keiman Freire, Ana Carolina (2011). Propiedades ópticas de polímeros aplicadas a pinturas decorativas. (Tesis para obtener el grado de maestro en ciencias) Universidad Nacional Autónoma de México.

Neponuceno Herrera, Juan Luis (2017). Diseño y construcción de un equipo de medición para el estudio de la transmitancia y el esparcimiento de la luz (EMETEL) en una

suspensión. (Tesis para obtener el título de ingeniero en comunicaciones y electrónica) Instituto Politécnico Nacional.

Callejas Ortego, Miguel Angel (2015). Análisis y estudio metodológico de las aplicaciones de los materiales con memoria de forma y super elasticidad en arquitectura y urbanismo. (Tesis Doctoral). Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Departamento de estructuras de la edificación e ingeniería del terreno. Universidad de Sevilla.

Guillén Guillén, César Armando (2020). Eficiencia energética de envolventes arquitectónicas para su desempeño térmico. (Tesis para obtener el grado de Doctor). Universidad Nacional Autónoma de México.

Sánchez Moreno, Flor Irene (2020). Desarrollo de mortero termocrómico de revestimiento: Aplicación en fachadas arquitectónicas. (Tesis para obtener el grado de maestro). Universidad Nacional Autónoma de México.

Guadarrama Gándara, Cecilia Genova (2017). Luz natural en la arquitectura aportaciones científicas, tecnológicas y de diseño. (Tesis para obtener el grado de doctor). Universidad Nacional Autónoma de México.

Lira Oliver Adriana. Radiación solar. Comprensión del espectro electromagnético en la región del espectro solar. (Práctica de Laboratorio). Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Arquitectura.

Lira Oliver Adriana. Reflectancia de la radiación electromagnética en materiales opacos. Visualización del efecto del color y la textura de una superficie en la composición espectral en la reflectancia difusa de la radiación electromagnética. (Práctica de Laboratorio). Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Arquitectura.

Normatividad consultada.

NMX-C-414-ONNCCE-2004: “Industria de la construcción cementos hidráulicos. Establece el procedimiento para llevar a cabo el ensayo en especímenes cúbicos para cementos hidráulicos.

ASTM C 979 “Pigmentos para la coloración integral del concreto”.

ASTM D5334-08 “Método de prueba estándar para la determinación de la conductividad térmica del suelo y roca blanda mediante un procedimiento de sonda de aguja térmica”.

ASTM C518 – 17 Método de prueba estándar para las propiedades de transmisión térmica en estado estable por medio del aparato medidor de flujo de calor.

ASTM E903-12 “Método De Prueba Estándar Para Absorción Solar, Reflectancia Y Transmitancia De Materiales Usando Esferas Integradoras”.

NMX-ES-002-NORMEX-2007 Definiciones y terminología.

Establece los vocablos, simbología y definición de los conceptos más usados en la investigación y desarrollo de la tecnología para el mejor uso de la radiación solar como fuente alternativa de la energía.

NOM-008-SCFI-2002 Sistema General de Unidades de Medida.

Se basa principalmente en los acuerdos sobre el Sistema Internacional de Unidades (SI), facilita a todas las dependencias que lo adopten para la estructuración de sus sistemas metrológicos.

NOM-008-ENER-2001: “Eficiencia energética en edificaciones, envolvente de edificios no residenciales”

NMX-C-460-ONNCCE—2009: “Industria de la construcción, aislamiento térmico-valor “R” para las envolventes de vivienda por zona térmica para la república mexicana, especificaciones y verificación”.

Glosario.

Absortancia: Es el índice y representa en sí la fracción de radiación incidente que es absorbida por un material, con valores que van de 0.0 a 1.0 (aunque también se puede expresar en términos de porcentaje, de 0% a 100%).

Absortividad: Es la propiedad de un material que determina la cantidad de radiación incidente que puede absorber.

Caracterización de materiales: Es la obtención de la información (color, morfología, estructura) de un material a partir del estímulo de una señal.

Compuesto orgánico: Es un compuesto químico que contiene carbono, formando enlaces carbono-carbono y carbono-hidrógeno. En muchos casos contienen oxígeno, nitrógeno, azufre, fósforo, boro, halógenos y otros elementos menos frecuentes en su estado natural.

Compuesto químico: Sustancia formada por la combinación química de dos o más elementos distintos.

Conductividad térmica: Propiedad física de los materiales que mide la capacidad de conducción de calor.

Efecto invernadero: Fenómeno por el cual los gases que se encuentran en la atmósfera retienen el calor emitido por la Tierra. Este calor proviene de la radiación solar, pero

cuando rebota sobre la superficie terrestre queda atrapado por la barrera de gases.

Elemento químico: Es una sustancia definida por un conjunto de átomos que tienen igual cantidad de protones en su núcleo llamado número atómico. Se considera un elemento químico a la forma más simple de una sustancia.

Emisividad: La emisividad de un material representa la proporción entre la energía radiada por dicho material y la energía que radiaría un cuerpo negro ideal, dada la misma temperatura y superficie.

Energía electromagnética: Es la cantidad de energía almacenada en una región del espacio que podemos atribuir a la presencia de un campo electromagnético, y que se expresará en función de las intensidades del campo magnético y campo eléctrico.

Espectro electromagnético: es el conjunto de longitudes de onda de todas las radiaciones electromagnéticas.

Espectro visible: La parte del espectro electromagnético que el ojo humano es capaz de percibir se denomina espectro visible. La luz visible está compuesta por radiaciones de longitudes de onda comprendidas entre 400 y 700 nm.

Efecto fotocromático: Una transformación reversible de una especie química entre dos estados A y B, los cuales tienen diferentes espectros de absorción. Esta transformación es inducida en una o ambas direcciones por la radiación electromagnética.

Irradiación: Densidad de flujo de energía de radiación que emite un objeto durante cierto tiempo.

Longitud de onda: Es la distancia que recorre una perturbación periódica que se propaga por un medio en un ciclo.

Materia: Es todo aquello que tiene masa y peso, ocupa un lugar en el espacio.

Radiación infrarroja: Es un tipo de radiación electromagnética, de mayor longitud de onda que la luz visible, pero menor que la de las microondas.

Radiación solar: Radiación electromagnética del sol.

Radiación solar directa: Flujo proveniente directamente del Sol atenuado por la absorción y esparcimiento en las diferentes capas de la atmósfera.

Radiación ultravioleta: Es la radiación electromagnética cuya longitud de onda está comprendida aproximadamente entre los 10 nm y los 400 nm.

Reflectancia solar: Es un parámetro (Índice de Reflectancia Solar o SRI) que indica la capacidad de un material para reflejar el calor solar experimentando un débil aumento de temperatura cuando se expone a los rayos solares. El valor del Índice de Reflectancia Solar está comprendido entre 0 y 1.

Sensor: Dispositivo que detecta una determinada acción externa, temperatura, presión, transmitiéndola adecuadamente.

Transmitancia térmica: Es el flujo de calor, en régimen estacionario, para un área y diferencia de temperaturas unitarias, de los medios situados a cada lado del elemento que se considera.

Índice de imágenes.

Figura 1. Fachada dinámica - Kiefer Techni Showroom Bad Gleichenberg, Austria. Paneles abiertos para la entrada de luz.	17
Figura 2. Fachada dinámica - Kiefer Techni Showroom Bad Gleichenberg, Austria. Paneles cerrados evitan la entrada de luz.	17
Figura 3. Fachada Instituto del Mundo Árabe - Jean Nouvel.	20
Figura 4. Vista exterior Instituto del Mundo Árabe - Jean Nouvel	20
Figura 5. Concreto biológico en fachadas, generación de musgos.	21
Figura 6. Simulación de una fachada vegetal en el Centro Cultural Aeronáutico de El Prat de Llogregat.	21
Figura 7. Representación gráfica de una onda electromagnética. Laboratorio de Entornos Sostenibles, Facultad de Arquitectura, UNAM.	27
Figura 8. Componentes y estructura de una onda electromagnética. Referencia: http://uapas1.bunam.unam.mx/ciencias/efecto_doppler/	27
Figura 9. Diagrama del espectro electromagnético, mostrando el tipo, longitud de onda con ejemplos, frecuencia y temperatura de emisión de cuerpo negro. Referencia: https://es.wikipedia.org/wiki/Espectro_electromagn%C3%A9tico	30
Figura 10. Representación gráfica del proceso de absorción de la radiación solar debido a las moléculas de aire. Laboratorio de Entornos Sostenibles, Facultad de Arquitectura, UNAM.	31
Figura 11. Fenómeno de interacción entre la luz y un material. Fuente: Keiman, Freire Ana C. (2011). Propiedades ópticas de polímeros aplicadas a pinturas decorativas. (Tesis para obtener el grado de maestro). Universidad Nacional Autónoma de México.	34
Figura 12. Representación gráfica del comportamiento de un material rojo con la radiación. Laboratorio de Entornos Sostenibles, Facultad de Arquitectura, UNAM.	39
Figura 13. Curva de reflectancia espectral del material rojo. Laboratorio de Entornos Sostenibles, Facultad de Arquitectura,	

UNAM.	39
Figura 14. Círculo cromático, color absorbido y observado.	40
Figura 15. Los materiales fotocromáticos cambian de color cuando se exponen a la luz (un cambio en la estructura molecular de un material fotocromático provoca un cambio en sus propiedades ópticas).	41
Figura 16. Diagrama de procedimiento experimental. Elaboración propia.	44
Figura 17. Pigmento fotocromático de la marca ACTIVFX color blanco-azul, sin ser expuesto al sol.	45
Figura 18. Pigmento fotocromático de la marca ACTIVFX color blanco-azul, siendo expuesto al sol.	45
Figura 19. Bulto de cemento utilizado en la experimentación.	46
Figura 20. Diagrama de proceso experimental.	48
Figura 21. Esquema de la placa de pasta fotocromática.	49
Figura 22. Esquema y probeta cúbica de la pasta fotocromática.	50
Figura 23. Esquema y probeta cúbica de la pasta fotocromática.	50
Figura 24. Esquema y probeta rectangular de la pasta fotocromática.	51
Figura 25. Esquema y probeta rectangular de la pasta fotocromática.	51
Figura 26. Esquema y probeta rectangular de la pasta fotocromática.	52
Figura 27. Moldes de MDF.	52
Figura 28. Placas coladas con agrietamiento, después de retirar el molde.	52
Figura 29. Placas coladas con manchas causadas por el desmoldante (vaselina).	53
Figura 30. Molde de acrílico con 6 mm de espesor, para colado de muestras.	53
Figura 31. Cámara termográfica de la marca twilight modelo TG165.	54
Figura 32. Sensores de contacto tipo k para medir temperatura superficial.	55
Figura 33. Instrumento KD2 PRO.	56
Figura 34. Muestras cúbicas de 10 centímetros sobre equipo de barrenación.	56
Figura 35. Reflectómetro 410-Solar visible. Laboratorio de Entornos Sostenibles, Facultad de Arquitectura, UNAM.	57
Figura 36. Emisómetro térmico de mano ET100. Laboratorio de Entornos Sostenibles, Facultad de Arquitectura, UNAM.	58

Figura 37. Equipo QUV/Spray para simulación de radiación UV.	59
Figura 38.- Aparato Fisher Jonhs. Laboratorio Facultad de Química UNAM.	61
Figura 39.- Espectrofotómetro Cary 5000 UV-Vis-NIR. Laboratorio de Posgrado Facultad de Química UNAM.	63
Figura 40.- Micro analizador elemental CHNS, con sistema de detección de Micro TruSpec de LECO.	64
Figura 41.- Espectrómetro modelo S1 TITAN. Laboratorio de Conservación del Patrimonio Natural y Cultural, Unidad de Posgrados, UNAM.	65
Figura 42. Modelo, colocación de placa de pasta fotocromática.	66
Figura No.43: Corte muro de la envolvente.	66
Figura No.44: Planta del módulo.	66
Imagen 45. Ubicación de la experimentación en el Edificio J de la Unidad de Posgrado UNAM (punto rojo).	67
Figura 46. Construcción del módulo de prueba. Aplicación de impermeabilizante color blanco en el exterior.	67
Figura 47. Colocación de dispositivo HOBO modelo U-10 en el interior del módulo de prueba para monitoreo de la temperatura interior.	68
Figura 48. Instalación de panel fotovoltaico (alimentador), datalogger y termopares.	68
Figura 49. Diagrama de simulación por cada rango de onda.	71
Figura 50. Toma de la primera lectura por medio de la cámara termográfica placas No. 1,2,3 y 4. De derecho a izquierda.	72
Figura 51. Placas con diferente porcentaje de pigmento expuestas a la radiación solar (intemperie).	73
Figura 52. Lámpara UV con 340 nm.	76
Figura 53. Lámpara UV con 313 nm.	77
Figura 54. Esquema del análisis de reflectancia solar total. Elaboración propia.	77
Figura 55. Muestra irradiada con lámpara UV 340 nm.	80
Figura 56. Muestra después de realizar la prueba de intemperismo, irradiada con lampara UV 340 nm.	80
Figura 57. Degradación del color conforme a RGB y CMYK. El inicio es antes	

de ser ensayado y el final después de ser ensayado.	81
Figura 58. Microscopio estereoscópico Motic.	82
Figura 59. Especimen 1, antes del ensayo. Zoom 1x.	82
Figura 60. Especimen 1, después del ensayo. Zoom 1x.	82
Figura 61. Especimen 1, antes del ensayo. Zoom 3x.	82
Figura 62. Especimen 1, después del ensayo. Zoom 3x.	82
Figura 63. Especimen 1, antes del ensayo. Zoom 5x.	83
Figura 64. Especimen 1, después del ensayo. Zoom 5x.	83
Figura 65. Especimen 1, antes del ensayo. Zoom 5x.	84
Figura 66. Especimen 1, después del ensayo. Zoom 5x.	84
Figura 67.- Comienzo y registro de aumento de temperatura en el termómetro en grados Centígrados.	85
Figura 68.- Pigmento fotocromático a temperatura ambiente.	85
Figura 69.- Pigmento fotocromático a una temperatura de contacto 270°C.	85
Figura 70.- Pigmento fotocromático a una temperatura de contacto 300°C.	85
Figura 71.- Pesaje de la muestra en la balanza analítica.	87
Figura 72.- Colocación del pigmento en los porta muestras ya limpios.	87
Figura 73.- Fluorescencia de rayos X en el pigmento fotocromático.	91
Figura 74.- Fluorescencia de rayos X en la pasta fotocromática.	91
Figura 75.- Módulo de experimentación con la muestra colocada.	94
Figura 76.- Estación meteorológica, Laboratorio de Edificación Sostenible, Facultad de arquitectura, UNAM.	94
Figura 77.- Muestras en cubos de 5 cm para ser ensayados – Referencia NMX-C-061-ONNCCE-2015.	100
Figura 78.- Ciudad de México, lugar de estudio con información del archivo EPW.	101
Figura 79.- Proceso de simulación, se consideró una cara por corrida para el material fotocromático.	101
Figura 80.- IDF versión updater, proceso para cambio de versión 8.1.0 a 9.1.0.	102
Figura 81.- EP launch.	103
Figura 82.- IDF editor.	103

Figura 83.- IDF editor, pestañas de trabajo.	104
Figura 84.- IDF editor, pestaña Construction.	105

Índice de tablas.

Tabla 1. Relación entre el color absorbido y observado del espectro visible expresado en nanómetros.	40
Tabla 2. Dosificación de muestras cemento, pigmento y agua.	49
Tabla 3. Propiedades térmicas de los materiales que conforman la envolvente.	68
Tabla 4. Información de las tres lecturas obtenidas de las placas.	72
Tabla 5. Resultados de las características termo físicas.	74
Tabla 6. Información de materiales obtenida del artículo "Selección de materiales en la concepción arquitectónica bioclimática.	75
Tabla 7. Información de materiales obtenida de GARCIA PASCUA, N., SÁNCHEZ de ROJAS, M. I. y FRÍAS, M. Medidas de color en diferentes materiales de construcción. La restauración en edificios de arenisca. En: Materiales de Construcción. España.	78
Tabla 8. Cambio de color de muestras, con valores RGB y porcentajes CMYK.	81
Tabla 9. Comparativa del peso de cada probeta, antes y después de ser ensayadas.	83
Tabla 10. Registro de la temperatura de fusión en el pigmento fotocromático.	86
Tabla 11. Resultados del análisis elemental.	89
Tabla 12. Resultados de la composición elemental.	92
Tabla 13. Temperaturas mínimas y máximas por día y general.	97
Tabla 14. Resultados de pruebas a compresión.	99

Índice de gráficas.

Gráfica 1. Resultados de temperatura superficial.	73
Gráfica 2. Resultados de espectroscopia UV. El pico representa donde absorbe con mayor frecuencia en el espectro ultravioleta. Hay un cambio de estructura del pigmento al espectro visible.	88
Gráfica 3.- Composición elemental del pigmento.	90
Gráfica 4.- Compuestos químicos del pigmento.	92
Gráfica 5.-Resultados de hermeticidad en un día con condiciones ambientales.	93
Gráfica 6.-Resultados de la temperatura del espacio interior del módulo y temperatura ambiente exterior.	95
Gráfica 7.-Comparativa entre temperaturas mínimas en interior y exterior.	98
Gráfica 8.-Comparativa entre temperaturas máximas en interior y exterior.	98
Gráfica 9.-Resultados de pruebas a compresión.	100