



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

CONCRETO TRANSLÚCIDO
TRANSMISIÓN DE LUZ VISIBLE A TRAVÉS DE MORTEROS CON
FLUORITA COMO AGREGADO FINO

ARY ALAIN HOYOS MONTILLA

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA – SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MÍNAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE MATERIALES
MEDELLÍN
2012

CONCRETO TRANSLÚCIDO
TRANSMISIÓN DE LUZ VISIBLE A TRAVÉS DE MORTEROS CON
FLUORITA COMO AGREGADO FINO.

ARY ALAIN HOYOS MONTILLA

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magíster en Ingeniería - Materiales y Procesos

Director de la Tesis:

M.S.C.E. YOSEF FARBIARZ FARBIARZ ^[1]

^[1] Director Centro de Proyectos e Investigaciones Sísmicas CPIS
Facultad de Minas Universidad Nacional de Colombia
Sede Medellín

Codirector de la Tesis:

Ph.D. JORGE IVÁN TOBÓN ^[2]

^[2] Director Grupo de Investigación Grupo del Cemento y Materiales de Construcción
Facultad de Minas Universidad Nacional de Colombia
Sede Medellín

Línea de Investigación:

Prospección, Exploración y evaluación de nuevos cementos, morteros y concretos.

Grupo de Investigación:

Centro de Proyectos e Investigaciones Sísmicas CPIS
Grupo del Cemento y Materiales de Construcción

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA – SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MÍNAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE MATERIALES
MEDELLÍN
2012

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado
Alejandro Toro Betancur, Ph.D.

Firma del jurado
Alejandro Toro Betancur, Ph.D.

Firma del jurado
Juan Guillermo Morales Rendón, M.Sc.

A mi Mamita, Teresa de Jesús Montilla Ñaños, mis Hermanitos, Harold Giovanni Hoyos Montilla y German Ferney Hoyos Montilla, dedico los resultados de ésta tesis y todo lo que se requirió para su materialización; pero enfáticamente, les brindo todo el conocimiento que adquirí para amarlos cada vez más. Son como mis brazos, como mis ojos.

AGRADECIMIENTOS

A mi Hermano Harold y su familia, por acogerme en su hogar, por su apoyo económico y por brindarme un espacio para dialogar.

A toda mi Familia, a mi Ciudad natal, Popayán, a la Ciudad de Pasto, a la Ciudad de Cali, por sus aportes a mi formación cultural, personal y humana.

A mis Amigos, por sus críticas, por compartir parte de sus vidas conmigo, por los encuentros para comunicarnos ideas y argumentarlas.

A los responsables de mi formación académica, mi Papá Ary Hoyos Grijalba, Los Colegios* por los que pasé, La Universidad del Cauca y La Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín.

Al Profesor Josef Farbiarz Farbiarz, Director de la tesis, por inculcarme el aprendizaje autónomo. Me quedo con una herramienta eficaz.

Al Profesor Jorge Iván Tobón, Codirector de la tesis, por inculcarme el pensamiento científico basado en el trabajo y compañerismo.

A los Jurados de la tesis, Juan Guillermo Morales M.Sc. Por sus aportes de conocimiento sobre el tema, por su generosa paciencia y credibilidad en la tesis. Y Alejandro Toro Betancur Ph.D. por su participación y dedicación en la evaluación de la tesis. Por sus grandes enseñanzas técnicas y humanas desde la docencia.

Al Laboratorio de Química del Cemento y Nuevos Materiales de Construcción, dirigido por Jorge Iván Tobón Ph.D. por el espacio, materiales y equipos brindados durante la fase experimental de la tesis.

Al Laboratorio de Cerámicos y Vítreos, dirigido por Claudia Patricia García García Ph.D. Quien me facilitó el espacio y trabajo experimental de la tesis.

Al Laboratorio de Construcción y su Laboratorista José de la Cruz, por su gran vocación a trabajar en equipo.

A la Empresa *Reframetal S.A.*, al Ingeniero Wilmar Alberto Echeverri P. y a la Ingeniera Carolina Cárdenas Ramírez por su aporte de material utilizado durante la investigación, con un único interés, el desarrollo investigativo.

A la ciudad de Medellín, por las oportunidades, por acogerme, por permitirme conocer amigos.

* Jardín Infantil Piloto – Popayán; Colegio Normal Nacional – Pasto; Colegio San Felipe Neri – Pasto; Colegio Ciudad de Pasto.

RESUMEN

Esta investigación presenta los resultados y la evaluación de las propiedades ópticas que se le realizaron a morteros preparados con fluoruro de calcio como agregado. Inicialmente, se define la modelación matemática que permite formular la hipótesis acerca de cuál debe ser la variación del tamaño del agregado para mejorar la transmitancia de un haz de luz en el rango visible, a través de este material. Se utilizó fundamentalmente: fluorita y cemento pórtland tipo III gris y blanco y se midieron tres propiedades ópticas: Reflexión, absorción y transmitancia mediante la utilización de un espectrofotómetro y dos fuentes de luz; se identificó que los morteros con cemento blanco, mayor tamaño de agregado, y una relación cemento:agregado óptima, presentan los mejores resultados.

PALABRAS CLAVE: Propiedades ópticas en morteros, reflexión, absorción, transmitancia, fluorita, tamaño del agregado.

ABSTRACT

This research presents the results and evaluation of optical properties that were performed on mortars prepared with aggregate calcium fluoride. Initially, defined mathematical modeling allows formulating the hypothesis about what should be the size variation aggregate to improve the transmittance of the light beam in the visible range through this material. Mainly used: Fluorite and white and gray type III Portland cement, three optical properties were measured: Reflection, absorption and transmittance using a spectrophotometer and two light sources; identified that mortars with white cement, bigger aggregate and optimal cement:aggregate ratio present the best results.

KEYWORDS: Optical properties in mortars, reflection, absorption, transmittance, fluorite, size aggregate.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	12
2 OBJETIVOS	14
2.1 Objetivo general	14
2.2 Objetivos específicos	14
3 METODOLOGÍA	16
4 ESTADO DEL ARTE	18
4.1 Antecedentes	18
4.2 Análisis de las principales propuestas existentes en la literatura mundial	19
4.2.1 Adiciones y remplazo en concretos tradicionales	19
4.2.2 Sustitución del cementante tradicional	20
5 MARCO TEÓRICO	21
5.1 Conceptos generales de la física óptica	21
5.1.1 Interacción luz materia	21
5.1.2 Propiedades ópticas	22
5.1.3 Modelo matemático	24
5.1.4 Propuesta complementaria a la transmisión de luz	27
6 FASE EXPERIMENTAL	31
6.1 Diseño de experimentos	31
6.1.1 Variables de respuesta	35
6.1.2 Factores controlables	35
6.1.3 Factores no controlables	37
6.1.4 Materiales usados	37
6.1.5 Métodos y ensayos	39
7 PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	43
7.1 Evaluación de reflexión, absorción y transmitancia en fluorita	43
7.2 Evaluación de reflexión, absorción y transmitancia en pastas de cemento	45
7.3 Evaluación de reflexión, absorción y transmitancia en morteros	48
7.4 Evaluación de los factores controlables en los morteros	51
7.5 Índice de refracción, n , y Coeficiente de extinción, k , en morteros y fluorita	58

7.6	Verificación de supuestos del modelo experimental	60
8	CONCLUSIONES	61
8.1	Conclusiones generales	61
8.2	Conclusiones particulares	62
9	RECOMENDACIONES	63
	ANEXO (REGISTRO FOTOGRÁFICO)	64
	BIBLIOGRAFÍA	68

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Factores controlables y sus valores	32
Tabla 2. Factores controlables y sus valores para pastas de cemento	32
Tabla 3. Factores controlables y sus valores para morteros, parte I	33
Tabla 4. Factores controlables y sus valores para morteros, parte II	34
Tabla 5. Factores controlables y sus valores para morteros, parte III	35
Tabla 6. Dosificaciones para pastas de cemento	41
Tabla 7. Dosificaciones para morteros de cemento	42
Tabla 8. Mezclas de pastas de cemento	45
Tabla 9. Mezclas de los morteros evaluados ópticamente	48
Tabla 10. Valore de p-value para las variables controlables	55
Tabla 11. Relaciones cemento:agregado	56
Tabla 12. Resumen de los niveles de mejor resultado en transmitancia para los morteros	58
Tabla 13. Índice de refracción y coeficiente de extinción en morteros	59

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema metodológico del proyecto.	17
Figura 2. Tres tipos de concreto translúcido, de izquierda a derecha: Pixel Panels, LITRACON, Producto Mexicano Illum.	18
Figura 3. Reflexión de un haz de luz sobre la superficie de un mortero	22
Figura 4. Movimiento de un haz de luz a través de un prisma de mortero	23
Figura 5. Transmitancia de un haz de luz a través de un mortero	23
Figura 6. Haz de luz visible sobre un sólido	24
Figura 7. Movimiento de un haz de luz en un sólido	27
Figura 8. Material heterogéneo compuesto por los materiales i y j	28
Figura 9. Transmitancia en los materiales i y j	29
Figura 10. Transmitancia en los materiales i, j e i	29
Figura 11. Transmitancia en N materiales i y j	30
Figura 12. Factores y variables para los diseños de experimentos	31
Figura 13. Isométrica (b) y vista en plata (a) del modelo de la estructura atómica del fluoruro de calcio	37
Figura 14. Modelo experimental	40
Figura 15. Porcentaje de transmitancia para la fluorita en función de la variación del espesor	43
Figura 16. Índice de refracción para fluorita a diferentes espesores	44
Figura 17. Coeficiente de extinción de la fluorita a diferentes espesores	45
Figura 18. Índice de refracción y coeficiente de extinción en pastas de cemento	46
Figura 19. Diagrama de Pareto y gráfica de efectos principales para pastas de cemento, %reflectancia y %absorción	47
Figura 20. Variación del porcentaje de transmitancia en morteros por espesor	49
Figura 21. Reflexión en morteros	50
Figura 22. Índice de refracción para morteros	50
Figura 23. Absortividad en morteros	51
Figura 24. Diagrama de Pareto y gráfica de efectos principales etapa I, %reflexión y %absorción	52
Figura 25. Cara de un cubo de mortero con fluorita	53
Figura 26. Gráfica de efectos principales para etapa I, %transmitancia	54
Figura 27. Gráfica de efectos principales para etapa II, %absorción y %transmitancia	55
Figura 28. Gráfica de efectos principales para parte III, %transmitancia	56
Figura 29. Esquema de la variación en la reflexión y absorción	57
Figura 30. Índice de refracción, n , y coeficiente de extinción, k , para fluorita y morteros	58
Figura 31. Verificación de supuestos para etapa tres, %reflectancia	60

1 INTRODUCCIÓN

El uso de la luz artificial dentro de las edificaciones genera un gran consumo de los recursos naturales que la producen, lo que trae como consecuencia el aumento en la escasez de materias primas en su mayoría no renovables ⁽¹⁾. Una manera de reducir su utilización, es lograr el uso de la luz natural, pero las alternativas existentes en cuanto a materiales que permitan el paso de la luz complementan pero no sustituyen los materiales de construcción convencionales, de manera que debe decidirse entre materiales que aporten resistencia y rigidez estructural o materiales translúcidos, lo que, en muchos casos, limita significativamente el área disponible para materiales que permitan el uso de la luz natural para la iluminación de espacios interiores de las edificaciones residenciales o industriales. El material de mayor uso en la construcción, es el concreto, cuyas propiedades; de acuerdo con el ACI ^{(2) (3)} (American Concrete Institute) no incluye la de ser translúcido. Resulta obvio que si fuese posible conferirle al concreto esta propiedad se contribuiría a reducir el uso de luz artificial. A nivel mundial se han desarrollado tres líneas de investigación alrededor de este tema: la primera de ellas se basa en el reemplazo del cemento Portland por un cementante polimérico translúcido ⁽⁴⁾; las otras dos, se han concentrado en la adición o sustitución del agregado por materiales que permitan la transmisión de una onda electromagnética dentro del intervalo de luz visible. De acuerdo con los datos reportados, los mejores resultados de translucidez, en términos de porcentaje de transmitancia, se han logrado con diferentes tipos de fibras ópticas ⁽⁵⁾ ⁽⁶⁾. Sin embargo, algunos informes se limitan a reportar la evaluación del porcentaje de transmitancia y el comportamiento mecánico bajo tensiones de compresión. Sin reportar datos de absorción, reflexión, concentración de materiales absorbentes, coeficiente de extinción y espesor de la muestra haciendo difícil comparar, directamente, un material con respecto a otro a partir de sus propiedades ópticas. Con la investigación que se presenta aquí se estudia el comportamiento de morteros cuando se incide sobre ellos un haz de luz dentro del intervalo visible, utilizando fluoruro de calcio como agregado por ser un material abundante y significativamente translúcido ⁽⁷⁾. A cada probeta se le midió tres propiedades ópticas: Reflexión, Absorción y Transmitancia. Estas propiedades ayudan a entender, que en el mismo orden, cómo se comporta el haz de luz desde el momento en que pasa del aire al mortero, viajando por su interior, hasta atravesarlo completamente para salir de nuevo al aire. Para cada mezcla ensayada se calcularon dos variables de caracterización óptica, el índice de refracción, n , que relaciona la velocidad de la luz en el vacío y dentro del mortero, y el coeficiente de extinción, k , que determina cuánta energía pierde un haz de luz cuando atraviesa un sólido. Los valores de referencia para comparar los resultados fueron los obtenidos para fluorita sola y para pasta de cemento sin agregado. Se incluyeron ocho factores controlables para evaluar con las mezclas de morteros: tamaño del agregado, espesor de la muestra, tipo de cemento, tipo de agregado, relación agua/cemento, relación cemento:agregado, porcentaje de aire incorporado y porcentaje de fibra óptica. Las evaluaciones se basan en la ley Bouguer–Lambert–Beer ^{(8) (9) (10)} que establece que la intensidad del haz de luz transmitido está en función del haz de luz incidente el cual, a su vez, se ve afectado por las pérdidas por reflexión y absorción, estas últimas dependen del índice de refracción, n , del coeficiente de extinción, k , de la concentración del absorbente, c , y del espesor de la muestra, b . Ahora bien, el modelo Bouguer–Lambert–Beer se basa en el paso de la luz a través de un sólo material isotrópico; los morteros son en realidad materiales compuestos, con heterogeneidad de propiedades en sus ingredientes; así, en la investigación desarrollada aquí, se plantea la hipótesis para saber lo que sucede en un sólido formado por materiales diferentes, en este caso pasta y agregado, cuando el haz de luz atraviesa cíclicamente la frontera agregado-pasta antes de salir de nuevo al medio ambiente. Este nuevo modelo incluye entonces, además de la reflexión externa, la reflexión interna en el paso de cada

fase agregado-pasta, que produce una disminución adicional en el haz de luz visible transmitido, en comparación con el modelo de un sólo material. El desarrollo de la fase experimental de la investigación se realizó con base en un diseño de experimentos factorial completo y fraccionado ⁽¹¹⁾ ⁽¹²⁾, donde las variables de respuesta son dos de las tres propiedades ópticas evaluadas, reflexión y transmitancia, con base en las cuales se calculó la absorción con la ecuación de equilibrio que dice, la intensidad del haz de luz incidente es igual a la suma de las intensidades del haz de luz reflejado, absorbido y transmitido ⁽⁹⁾, en los diferentes pasos de fase al interior del material compuesto. Los resultados mostraron que los factores de mayor incidencia sobre la transmitancia son el tamaño del agregado y el tipo de cemento.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Determinar las propiedades ópticas de morteros de cemento Portland tipo III.

2.2 Objetivos específicos

Para cumplir con el objeto establecido es necesario establecer los siguientes objetivos específicos:

- Evaluar la transmitancia electromagnética, T , en el intervalo de luz visible, obtenida al dirigir un haz de luz a través de mezclas de mortero de cemento Portland Tipo III.
- Determinar la reflectividad, R , en el intervalo de luz visible, obtenida al dirigir un haz de luz a través de mezclas de mortero de cemento Portland Tipo III.
- Identificar la granulometría de fluoruro de calcio que produzca el menor índice de absorción lineal, k , en mezclas de mortero de cemento Portland Tipo III, tal que permita el mayor grado de translucidez.
- Evaluar el efecto que tiene el tamaño del agregado en las propiedades de transmitancia electromagnética, T , reflectividad, R , y absorción, A , sobre un mortero que es incidido por un haz de luz en el intervalo visible.
- Evaluar el efecto que tiene el tipo de agregado en las propiedades de transmitancia electromagnética, T , reflectividad, R , y absorción, A , sobre un mortero que es incidido por un haz de luz en el intervalo visible.
- Evaluar el efecto que tiene el espesor de la muestra en las propiedades de transmitancia electromagnética, T , reflectividad, R , y absorción, A , sobre un mortero que es incidido por un haz de luz en el intervalo visible.
- Evaluar el efecto que tiene el color del cemento en las propiedades de transmitancia electromagnética, T , reflectividad, R , y absorción, A , sobre un mortero que es incidido por un haz de luz en el intervalo visible.
- Evaluar el efecto que tiene la relación agua/cemento en las propiedades de transmitancia electromagnética, T , reflectividad, R , y absorción, A , sobre un mortero que es incidido por un haz de luz en el intervalo visible.
- Evaluar el efecto que tiene la relación cemento:agregado en las propiedades de transmitancia electromagnética, T , reflectividad, R , y absorción, A , sobre un mortero que es incidido por un haz de luz en el intervalo visible.

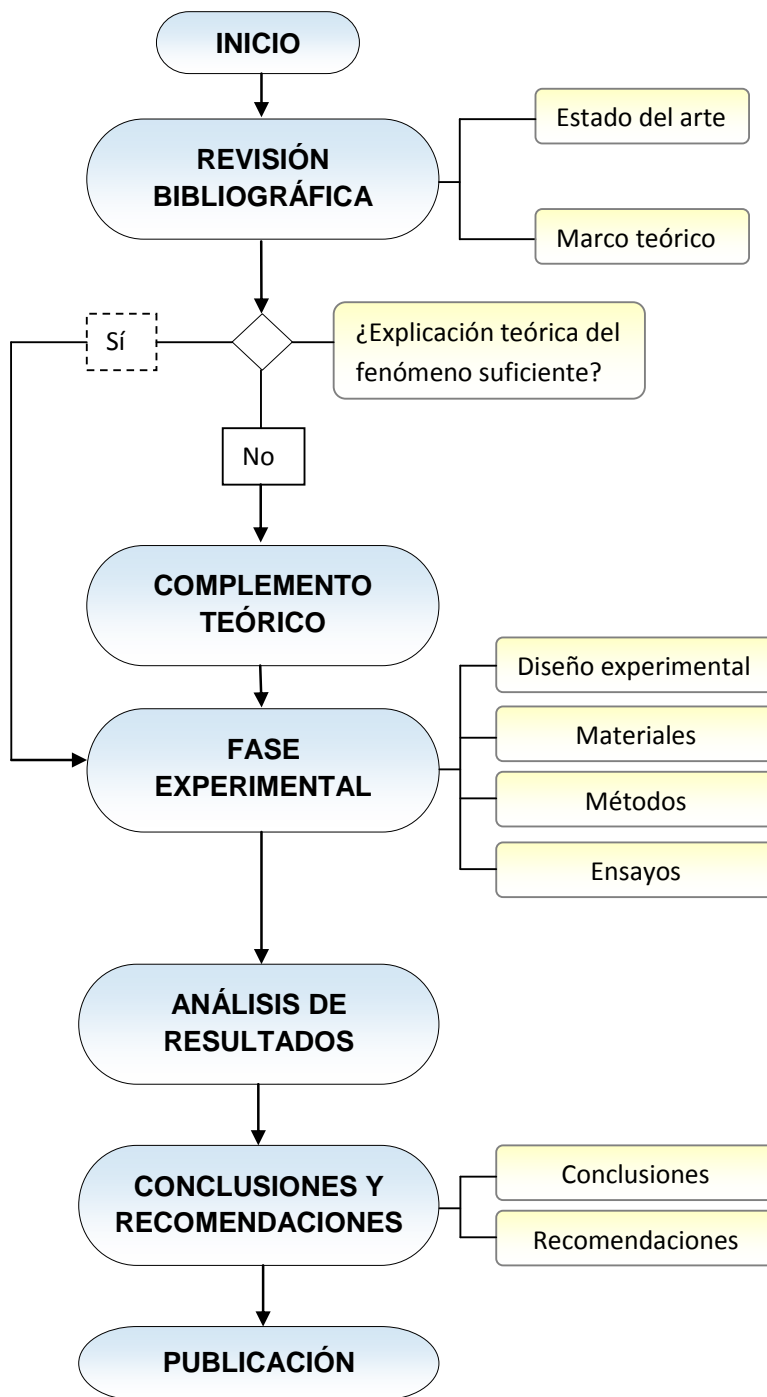
- Evaluar el efecto que tiene el porcentaje de aire incorporado en las propiedades de transmitancia electromagnética, T , reflectividad, R , y absorción, A , sobre un mortero que es incidido por un haz de luz en el intervalo visible.
- Evaluar el efecto que tiene el porcentaje de fibra óptica en las propiedades de transmitancia electromagnética, T , reflectividad, R , y absorción, A , sobre un mortero que es incidido por un haz de luz en el intervalo visible.

3 METODOLOGÍA

La metodología empleada para el desarrollo de esta investigación, que se ilustra con el esquema de la Figura 1, consta de cinco fases:

1. Revisión bibliográfica: Esta primera fase se divide en la revisión del estado del arte de la producción de los concretos traslúcidos y el marco teórico que fundamenta su comportamiento en términos de transmisión de un haz de luz.
2. Complemento teórico: Con base en el estudio del marco teórico a la luz del estado del arte actual, se concluyó que se requería complementar la teoría para el paso de luz a través de un sólido constituido por un material compuesto, es decir, a través de un sólido con propiedades ópticas variables, como en el caso de los concretos que representan un sólido compuesto por pasta de cemento y agregados. De manera que en esta fase se presenta el desarrollo del complemento teórico para explicar el comportamiento del haz de luz al atravesar en el sólido los diversos materiales que lo componen.
3. Fase experimental: con base en todo lo anterior, en esta fase se presenta el diseño del experimento ⁽¹¹⁾, los materiales seleccionados para su ejecución, los métodos y normas empleados.
4. Análisis de resultados: En esta fase se presentan los resultados obtenidos en las pruebas experimentales, y se discute su significado en términos de la transmitancia efectiva del haz de luz en las probetas con los materiales que representan los factores controlables del experimento.
5. Conclusiones y recomendaciones: Por último, en esta fase se presentan las conclusiones que pueden colegirse de la investigación teórica y de los resultados experimentales obtenidos, así como las recomendaciones que pueden sugerirse para el futuro desarrollo del tema.

Figura 1. Esquema metodológico del proyecto.



4 ESTADO DEL ARTE

Antes de pasar a la relación de las actividades realizadas durante la presente investigación, se reportan a continuación los resultados del estudio de las referencias bibliográficas consultadas que otorgan una visión resumida del estado del arte de la fabricación de concreto translúcido.

4.1 Antecedentes

Es posible que la primera inspiración para el desarrollo de concreto translúcido la haya dado Rem Koolhaas al preguntar en un comité de trabajo de su empresa, (Office for Metropolitan Architecture - OMA, Rotterdam, Holanda) si se puede o no hacer translúcido el concreto; esta pregunta produjo en uno de los asistentes, el Profesor Bill Price el interés necesario para empezar a investigar sobre el tema ⁽¹³⁾. Las primeras referencias que se tienen a nivel mundial sobre el desarrollo del concreto translúcido se centran en tres grupos de investigación. El primero, en la Universidad de Houston, Estados Unidos, a Cargo del mencionado Profesor Bill Price. El segundo, en la Universidad Autónoma Metropolitana de México D.F., a cargo de dos estudiantes, en esa época de pregrado, Sergio Galván Cáceres y Joel Sosa Gutiérrez. El tercer grupo por el arquitecto de origen Húngaro Áron Losonczi, quien inició con las investigaciones en el año de 1999 con resultados concretos a partir del año 2002 ⁽¹⁴⁾. En abril de 2006, en el National Building Museum de Washington D.C., Estados Unidos, durante la exposición “*Liquid Stone: New Architecture in Concrete*” se expuso el tema *Translucent*, que hizo referencia a la propuesta de concretos translúcidos, presentando tres variantes diferentes; la primera presentada por Bill Price con el nombre Pixel Panels; Aron Losonczi presentó *LITRACON* (Concreto que Transmite Luz, por sus siglas en inglés); y *Translucent Panel* desarrollado por Will Wittig Profesor Asistente en la Universidad de Detroit, Mercy, cuyos paneles son lo suficientemente delgados para permitir el paso de la luz ⁽¹⁴⁾ ⁽¹⁵⁾. Los tres productos presentados en el Museo utilizan fibras ópticas dentro del concreto para permitir el paso de la luz; Los investigadores mexicanos no utilizan morteros de cemento Portland sino que reemplazan la pasta de cemento Portland por un cemento polimérico, ver Figura 2.

El Señor Kengo Kuma presenta un material similar al de Losonczi llamado *LUCCON*, material que se expuso en *Tokyo Fiber '09 Senseware Exhibition* desarrollado por una empresa en Aachen, Alemania, donde se utilizó un tejido de fibras ópticas diseñado especialmente para la conducción de luz ⁽¹⁵⁾ ⁽¹⁶⁾.

Francisco Carvalho de Arruda Coelho de la Universidad del Valle de Acaraú, en Sobral, Brasil, produjo en el 2008 una pieza de hormigón translúcido de color rojo incorporando fibras ópticas con excelentes resultados estéticos ⁽¹⁷⁾.

Figura 2. Tres tipos de concreto translúcido, de izquierda a derecha: Pixel Panels, LITRACON, Producto Mexicano Ilum.



Fuente: National Building Museum in Washington D.C

4.2 Análisis de las principales propuestas existentes en la literatura mundial

4.2.1 Adiciones y remplazo en concretos tradicionales

El Profesor Bill Price parece ser el más indicado para colocarlo como el gestor en la materialización de este nuevo producto⁽¹⁸⁾. En septiembre de 1999 realiza las primeras pruebas buscando dos objetivos: primero, materiales que permitan remplazar los agregados por materiales que cumplan con la propiedad de translucidez, como el vidrio y el plástico; segundo, remplazar el conglomerante tradicional del concreto por otro que permita el paso de la luz⁽¹⁹⁾.

A principios del año 2000 se realizaron las primeras pruebas de compresión y flexión que produjeron diagramas de esfuerzo-deformación para esta nueva mezcla⁽¹³⁾. La entidad que ha sido testigo de todo este trabajo es el Laboratory at Virginia Tech, los resultados de las investigaciones realizadas hasta el momento no han sido publicados por Bill Price quien asegura haber logrado un 25% de transmitancia⁽¹⁹⁾.

Áron Losonczi nació en Szolnok, Hungría, en 1977. Estudió arquitectura en la Universidad Técnica de Budapest, donde en el 2001 obtuvo dos pregrados, Arquitectura e Ingeniería Civil⁽²⁰⁾. La mezcla que desarrolló fue LITRACON compuesta por miles de fibras ópticas con un contenido aproximado de 4% en volumen; las fibras tienen diámetros que van desde los 2 micrones hasta los 2 milímetros^{(21) (22) (23) (24)}; la manipulación de las fibras permite conferirle a la superficie la posibilidad de animarse a través de textos o imágenes haciendo de los edificios agentes de comunicación. Inicialmente se han producido bloques con un espesor máximo de 500 mm⁽²⁵⁾.

De la documentación existente hasta el momento, el mejor respaldo para LITRACON Y LUCCON son las tres patentes que se han presentado, dos de ellas por Aron Losonczi (LITRACON) que son: "*Bulding block comprising light transmitting fibres and a method for producing the same*"⁽²⁶⁾ en mayo de 2002 y "*Translucent building block and method for manufacturing the same*"⁽²⁷⁾ en julio de 2007. Jürgen Halm (LUCCON) presenta en febrero de 2007 la patente "*Method for producing moulded bricks with fibres*"⁽²⁸⁾.

Investigadores de la Universidad de Florida y otros, han logrado manipular la fase de la luz. El estudiante de posgrado Zsolt Marcet del grupo de investigación de Ho Bun Chan's de la Universidad de Florida, utilizó dos rendijas (Nano-Optics) y simuló el paso de la luz a través de ellas analizando la variación del campo electromagnético cuando las rendijas se desplazaban una con respecto a la otra. Las posibilidades para lograr una mayor transmisión de luz se presenta cuando existe un alineamiento entre los agujeros de los nano-optics por donde se pretende hacer pasar el haz de luz o, cuando se encuentran desfasados medio periodo de la onda el uno con respecto al otro. Se observa una mejor distribución del campo electromagnético en la superficie cuando los Nano-Optics se encuentran alineados o intercalados medio periodo, efecto que alcanza la superficie cuando la distancia entre las capas de Nano-Optics es la adecuada⁽²⁹⁾. Este diminuto material en un momento dado puede hacer parte de la matriz de un concreto o mortero y permitir algún grado de translucidez.

N. Mohamed⁽⁵⁾ y Zhi Zhou⁽⁶⁾ cada uno, junto a sus coinvestigadores, han realizado un mejor acercamiento de cuales pueden ser las características ópticas, físicas y mecánicas de morteros y concretos adicionados con fibras ópticas, los resultados presentados por N. Mohamed muestran un

aumento en la intensidad del haz de luz transmitido cuanto mayor es el porcentaje de fibra adicionado, con un incremento de más del 100% entre una mezcla de concreto sin fibra y aquella que fue adicionada con el máximo de fibra (10%) siempre y cuando el acomodo de la fibra sea en la dirección de las caras, esta última mezcla presentó una disminución en la resistencia a la compresión y a la flexión en un 50% respecto a la mezcla sin fibra, e incrementó la pérdida de masa por ataque de sulfatos en un 70% ⁽⁵⁾.

Zhi Zhou y su equipo midieron la transmitancia en concretos teniendo en cuenta la relación entre el área total de la cara y el área que ocupan las fibras, logrando aumentar la intensidad de luz visible a mayor cantidad de fibras, con transmitancia hasta del 2.3% con porcentajes de fibra cercanas al 4.5%, las resistencias caen a medida que el porcentaje de fibra aumenta llegando hasta un 10% menos que la muestra sin fibra ⁽⁶⁾.

4.2.2 Sustitución del cementante tradicional

Los alumnos de la UAM (Universidad Autónoma Metropolitana), Sergio Galván Cázares y Joel Sosa Gutiérrez, autores del concreto translúcido Ilum, quedaron en el tercer lugar del Primer Premio Santander Serfín a la Innovación Empresarial 2004-2005 en México ⁽³⁰⁾. El 17 de octubre de 2005 la empresa "Concretos Translúcidos, S. de R.L. de C.V", fundada por los estudiantes mexicanos, realiza la solicitud internacional de la patente para un nuevo producto cuya descripción se presentó en un documento denominado "*formulation for obtaining a translucent concrete mixture*". La invención se refiere a una formulación para obtener una mezcla de concreto translúcido definido como un concreto polimérico con base en una mezcla mineral de óxidos metálicos, polímeros, cemento y agua, con mejores propiedades mecánicas que el concreto convencional y niveles de paso de luz hasta de un 80 %, además de permeabilidad reducida ⁽³¹⁾.

5 MARCO TEÓRICO

Para poner en contexto la metodología empleada en la investigación que aquí se presenta, a continuación se realiza una síntesis del marco teórico con el cual se estableció el modelo matemático, para medir la cantidad de luz que sale al otro lado del material que recibe el haz incidente. Así, en primer lugar, se presentan conceptos generales de la física óptica; en segundo lugar, se presenta el modelo desarrollado por Bouguer–Lambert–Beer sobre el comportamiento físico de un haz de luz, en el intervalo visible, cuando atraviesa un sólido formado por un sólo material, describiendo las propiedades ópticas que se presentan y la formulación propuesta para su modelación; en tercer lugar, se describe la propuesta desarrollada por el autor del presente trabajo, a partir de la teoría existente, para modelar los fenómenos de interacción entre un haz de luz, en el intervalo visible, y un sólido formado por fluorita y pasta de cemento, materiales con propiedades diferentes.

5.1 Conceptos generales de la física óptica

5.1.1 Interacción luz materia

La luz visible tiene longitudes de onda (λ) que oscilan entre 400 nm y 700 nm. Desde el punto de vista de la mecánica cuántica la luz en el visible viene en pequeños paquetes de fotones cuya energía esta cuantizada, es decir, solo puede tener valor específicos definidos por la siguiente relación ^{(32) (33)}.

$$E = \frac{h * c}{\lambda}$$

Ecuación 1

Donde E es la energía de un fotón, h es la constante de Planck que equivale a $4,13 \times 10^{-15}$ (eV-s), c es la velocidad de la luz en el vacío (3×10^8 m/s) y λ son las longitudes de onda de la luz en cuestión ⁽⁹⁾. Si la longitud de onda λ tiene el valor mínimo del intervalo, es decir, 400 nm, la energía es de 497 zJ (3.1eV), mientras que si la longitud de onda tiene el valor superior del intervalo, es decir, 700 nm la energía correspondiente es de 288 zJ (1.8eV) ⁽⁹⁾. Una de las características de los materiales sólidos que permiten el paso de luz visible, es que, su estructura atómica de bandas tiene un intervalo prohibido de energía mayor a 497 zJ ⁽⁸⁾. Esto quiere decir, que cuando los fotones de un haz de luz tienen la energía necesaria para interactuar con los electrones de valencia de un sólido, el haz de luz no lo atraviesa. Cuando un haz de luz incide sobre un material se presenta uno o varios de tres fenómenos físicos: Reflexión, absorción o transmitancia. El valor de la intensidad del rayo incidente I_o , se puede expresar como ^{(8) (34)}:

$$I_r + I_a + I_t = I_o$$

Ecuación 2

Donde I_r , I_a e I_t representan la intensidad del rayo reflejado, absorbido y transmitido, respectivamente.

5.1.2 Propiedades ópticas

Reflexión

La relación que existe entre la intensidad del haz reflejado y el haz incidente se denomina *Reflectancia*, R ⁽³⁴⁾:

$$R = \frac{I_r}{I_o}$$

Ecuación 3

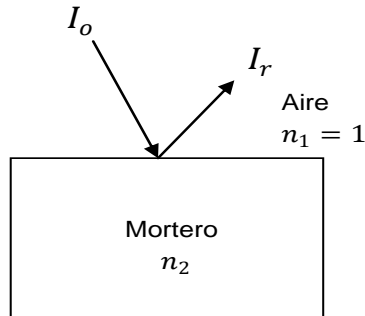
El coeficiente de reflexión o reflectancia R mide la reflexión, valor que depende del índice de refracción, n , del material y relaciona la velocidad de la luz en el vacío con la velocidad de la luz dentro del material. Cuando el rayo incidente es perpendicular a la superficie, se cumple, de acuerdo con la relación de Fresnel⁽³⁵⁾, que:

$$R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2$$

Ecuación 4

Como la pérdida de intensidad por reflexión se produce cuando el haz de luz pasa de un medio a otro, como se muestra Figura 3, la primera pérdida se produce en la frontera entre el aire y el material; ahora bien, suponiendo que la luz en el aire se desplaza a la misma velocidad a la cual lo hace en el vacío $n_1 = 1$. Reemplazando este valor en la Ecuación 4 la reflectancia depende entonces de una sola variable, en este caso el índice de refracción del material, n_2 ⁽⁸⁾.

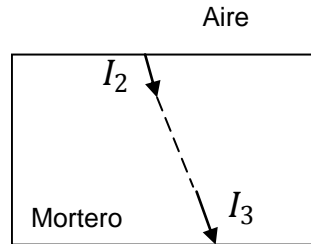
Figura 3. Reflexión de un haz de luz sobre la superficie de un mortero



Absorción

Si un haz de luz, con una intensidad I_o , va por el aire y choca contra un prisma de mortero, como se ilustra en la Figura 3, cada material, el aire y el mortero, tienen un índice de refracción diferente que se relacionan mediante las relaciones de Fresnel. De I_o parte se convierte en intensidad reflejada, I_r , y parte entra al material con una intensidad disminuida, I_2 . Parte de la energía se disipa por absorción al atravesar el material, llegando a la cara opuesta del cuerpo atravesado con una intensidad I_3 ⁽³⁴⁾, como se muestra en la Figura 4.

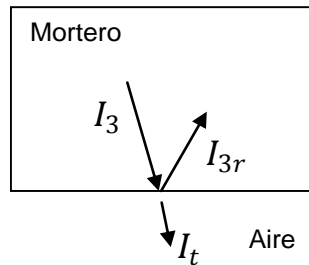
Figura 4. Movimiento de un haz de luz a través de un prisma de mortero



Transmitancia

Por último, cuando el haz pasa del material de nuevo al aire, parte de la energía se disipa por reflexión, como se ilustra en la Figura 5, ya que el material y el aire tienen diferentes índices de refracción; la energía disipada en la cara de salida es igual a la energía disipada en la cara de entrada. De tal manera, después de atravesar completamente el material, el haz de luz sale con una intensidad reducida final que no es otra cosa que la intensidad transmitida, I_t ^{(8) (34)}, como se muestra en la Figura 5.

Figura 5. Transmitancia de un haz de luz a través de un mortero



Luz transmitida

En otras palabras, la intensidad del haz de luz que sale del material, es decir, la intensidad transmitida, es el resultado de sustraer de I_o , las dos reflexiones, I_r e I_{3r} , y la intensidad absorbida, $I_2 - I_3$, efecto que puede determinarse con la siguiente ecuación^{(8) (34)}.

$$I_t = I_o(1 - R)^2 e^{-kcb}$$

Ecuación 5

Donde I_t es la intensidad del rayo transmitido; I_o es la intensidad del rayo inicial; R es la reflectancia o coeficiente de reflexión, en función del índice de refracción, n ; k es el coeficiente de extinción, o índice de absorción de luz por unidad de masa, expresado en $\left[\frac{\text{litro}}{\text{g*cm}}\right]$; c es la concentración del absorbente en el material que indica la cantidad de sustancia absorbente presente en el sólido, expresado en $\left[\frac{\text{g}}{\text{litro}}\right]$ y b es el espesor del material en $[\text{cm}]$ ⁽⁸⁾.

De lo anterior se deduce que la multiplicación $k \times c \times b$, es decir, la absorción por unidad de masa, $\left[\frac{\text{litro}}{\text{g} \cdot \text{cm}}\right]$, por la concentración de material absorbente, $\left[\frac{\text{g}}{\text{litro}}\right]$, y por el espesor del cuerpo atravesado [cm], resulta en un valor adimensional que representa el porcentaje de luz absorbida, denominado *absorbancia*. Ahora bien, el producto kc , es decir, la absorción por unidad de masa, $\left[\frac{\text{litro}}{\text{g} \cdot \text{cm}}\right]$, por la concentración de material absorbente, $\left[\frac{\text{g}}{\text{litro}}\right]$, resulta en la energía absorbida por unidad de espesor del cuerpo atravesado, $[\text{cm}^{-1}]$, que se denomina *absortividad*, medida que, para concentraciones iguales de absorbente, debe permanecer constante, independientemente del espesor de la muestra⁽³⁴⁾.

5.1.3 Modelo matemático

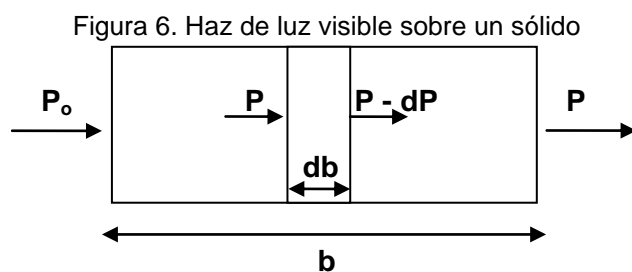
El fenómeno descrito de transmisión de luz a través de un sólido, ha sido modelado matemáticamente por diversos investigadores^{(32) (33)}. En particular son mundialmente conocidas las propuestas presentadas por Bouguer (1729), Lambert (1768) y Beer (1859)⁽³⁴⁾.

Ley de Bouguer – Lambert

Bouguer y Lambert proponen que cuando sobre una superficie incide un haz de luz de radiación monocromática (esto es, radiación de una sola longitud de onda) a través de un material homogéneo, el material absorbe una fracción constante, K_1 , por unidad de espesor del material, para una concentración determinada de material absorbente⁽³⁶⁾. Así, si P_0 es la energía del rayo incidente sobre un sólido y P es la energía de salida al final del espesor b del sólido, como lo muestra la Figura 6, la disminución infinitesimal de la energía radiante, dP , por unidad de espesor del sólido es proporcional a la energía incidente P ⁽³⁶⁾, es decir:

$$-\frac{dP}{db} = K_1 P$$

Ecuación 6



El signo negativo en la Ecuación 6 indica que el paso por cada diferencial de material significa una pérdida de energía. Para obtener la energía total disipada por absorción basta con integrar entre los límites P_0 y P , y, 0 y b :

$$-\int_{P_0}^P \frac{1}{P} dP = \int_0^b K_1 db$$

Ecuación 7

Ahora bien, lo anterior puede desarrollarse como sigue:

$$-(\ln P - \ln P_0) = K_1 b$$

Ecuación 8

$$\ln P_0 - \ln P = K_1 b$$

Ecuación 9

$$\ln \left(\frac{P_0}{P} \right) = K_1 b$$

Ecuación 10

$$\frac{P_0}{P} = e^{K_1 b}$$

Ecuación 11

Ley de Beer

A diferencia de Bouguer y Lambert, Beer no relaciona el grado de absorción con el espesor, **b**, del sólido, sino con la concentración del absorbente⁽³⁶⁾, **c**:

$$-\frac{dP}{dc} = K_2 P$$

Ecuación 12

Realizando un procedimiento similar al desarrollado para la Ecuación 11 el resultado es:

$$\ln \left(\frac{P_0}{P} \right) = K_2 c$$

Ecuación 13

$$\frac{P_0}{P} = e^{K_2 c}$$

Ecuación 14

De la Ecuación 11 y Ecuación 14 se deduce que:

$$K_1 b = K_2 c$$

Ecuación 15

$$\frac{K_1}{c} = \frac{K_2}{b} = K$$

Ecuación 16

$$K_1 = Kc; K_2 = Kb$$

Ecuación 17

Sustituyendo en Ecuación 11 o Ecuación 14

$$\ln\left(\frac{P_0}{P}\right) = Kcb$$

Ecuación 18

$$\frac{P_0}{P} = e^{Kcb}$$

Ecuación 19

$$\frac{P_0}{e^{Kcb}} = P$$

Ecuación 20

$$P = P_0 e^{-Kcb}$$

Ecuación 21

De la Ecuación 21 se concluye que la energía se disipa exponencialmente, en función del espesor del sólido y de la concentración del absorbente ⁽³⁶⁾.

Ahora bien, la energía absorbida por unidad de tiempo a través de la unidad de área perpendicular a la dirección de propagación corresponde a la intensidad absorbida, expresada en vatios por metro cuadrado ⁽⁹⁾. Esto permite expresar la Ecuación 21, en términos de intensidad, de la siguiente manera:

$$I_3 = I_2 e^{-kcb}$$

Ecuación 22

Intensidad transmitida

La Ecuación 22 representa la intensidad de luz resultante después de la absorción, que ocurre al atravesar el material hasta la frontera de salida. Para modelar completamente la transmisión de la luz hasta salir del sólido de nuevo hacia el aire, pueden considerarse seis etapas ⁽⁸⁾, como se muestra en la Figura 7.

Etapa 1: El haz de luz viaja por el aire y se encuentra con un sólido; esta etapa se conoce como incidencia inicial.

Etapa 2: Al incidir sobre la superficie exterior de entrada al sólido parte del haz se refleja, etapa que se conoce como reflexión.

Etapa 3: El haz inicia su viaje por el interior del sólido con una intensidad reducida debido a la reflexión.

Etapa 4: El haz llega a la cara de salida con una energía reducida debida a la absorción.

Etapa 5: Al incidir sobre la superficie de salida parte del haz se refleja.

Etapa 6: El haz sale del sólido con una intensidad reducida por dos reflexiones y por la absorción; esta etapa se conoce como la transmitancia.

Figura 7. Movimiento de un haz de luz en un sólido



Con base en la cuantificación de la intensidad del haz de luz, descrita con la Ecuación 3, considerando la cantidad absorbida, calculada con Ecuación 22 y reemplazando los valores de las demás etapas, se tiene que:

$$I_2 = I_1 R$$

Ecuación 23

$$I_3 = I_1 - I_1 R$$

Ecuación 24

$$I_3 = I_1 (1 - R)$$

Ecuación 25

$$I_4 = I_1 (1 - R) e^{-Kcb}$$

Ecuación 26

$$I_5 = I_4 R$$

Ecuación 27

$$I_6 = I_4 - I_4 R$$

Ecuación 28

$$I_6 = I_1 (1 - R) (1 - R) e^{-Kcb}$$

Ecuación 29

$$I_6 = I_1 (1 - R)^2 e^{-Kcb}$$

Ecuación 30

A hora bien, la intensidad en la primera etapa, es decir, I_1 , no es otra cosa que la intensidad del haz de luz incidente, y la intensidad en la etapa seis, es decir, I_6 , es la intensidad del haz de luz después de salir del sólido completamente atravesado. De tal manera, la Ecuación 30 puede expresarse así:

$$I_t = I_o \times (1 - R)^2 \times e^{-kcb}$$

La anterior expresión matemática corresponde a la Ecuación 5 mencionada anteriormente⁽⁸⁾.

5.1.4 Propuesta complementaria a la transmisión de luz

En los dos numerales anteriores se expuso los resultados de la revisión bibliográfica sobre los aspectos teóricos que regulan el estado del arte del fenómeno de la trasmisión luminosa a través de diferentes medios. Incluyendo la presentación del modelo matemático más utilizado en la literatura internacional^{(8) (33)}.

La revisión del estado del arte, independientemente de la utilización de resinas poliméricas translúcidas o fibra óptica en la elaboración de concretos o morteros translúcidos, no arroja nuevas luces sobre la modelación teórica del paso del haz luz a través de materiales compuestos^{(5) (6)}.

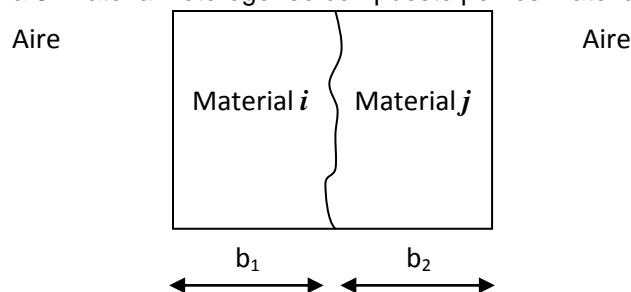
Consecuentemente, en este numeral, se incluye el desarrollo de un modelo matemático específico para la transmisión de luz a través de materiales compuestos, como son las secciones de concreto, modelo matemático que es la hipótesis que se aporta en este estudio como argumento para explicar el comportamiento de la luz transmitida.

En el modelo teórico planteado que describe la intensidad de luz transmitida ^{(8) (9)}, el valor de I_t , ver la Ecuación 5, depende de tres términos: el primero, I_o , representa la intensidad del rayo incidente; el segundo, $(1 - R)^2$, indica las pérdidas por reflexión en ambas caras del sólido, y el tercero, e^{-kcb} , las pérdidas por absorción que varían exponencialmente. Sin embargo, este modelo es válido solamente para materiales homogéneos o para materiales heterogéneos con propiedades ópticas similares ⁽⁸⁾.

El concreto es un material heterogéneo cuyos ingredientes pueden tener características ópticas disímiles, caso en cual el modelo convencional no es aplicable.

Para establecer un modelo válido, supóngase que i y j son dos materiales con diferentes características ópticas, espesores b_1 y b_2 respectivamente y que ambos están íntimamente ligados dentro de un sólo sólido heterogéneo, como se ilustra con la Figura 8.

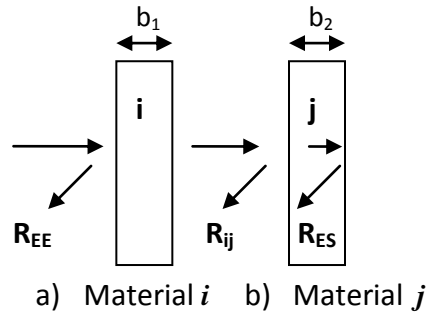
Figura 8. Material heterogéneo compuesto por los materiales i y j



Cuando un haz de luz incide sobre el sólido, en la cara expuesta del material i , el haz pasa de un medio (aire) a otro (material i). Similarmente, cambia dos veces más de medio, al pasar al material j y al salir del sólido de nuevo al aire.

El paso del haz a través del primer material se esquematiza con la Figura 9 (a). Cuando el haz incide sobre el sólido sufre una reflexión, R_{EE} , en la frontera aire - material i ; de manera que sólo una fracción del haz incidente comienza el viaje a través del sólido. Al llegar a la frontera material i - material j se produce una segunda reflexión, R_{ij} , que, a diferencia de la anterior, ocurre al interior del sólido. Así, el haz de luz que viaja a través del segundo material tiene una intensidad disminuida en comparación con el haz de luz que atravesó el primer material. Finalmente, al llegar a la frontera material j - aire, como se observa en la Figura 9 (b), parte del haz se refleja nuevamente, R_{ES} , saliendo al exterior con una intensidad final menor que todas las anteriores y que es la luz que se transmite a través del sólido, I_t . En resumen, la intensidad disminuye por pérdidas por reflexión en tres cambios de medio, las dos caras exteriores y la interfase interna entre los dos materiales. Adicionalmente, falta mencionar que cada material absorbe parte del haz que lo atraviesa, de manera que hay dos fuentes adicionales de pérdida de intensidad en el modelo de esta hipótesis.

Figura 9. Transmitancia en los materiales i y j



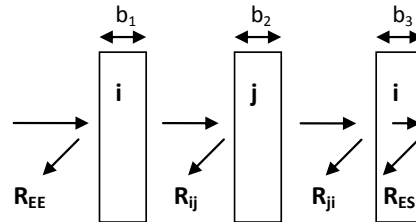
Partiendo de la expresión para un material homogéneo, es posible expresar la transmisión completa a través del material compuesto así:

$$I_T = I_o(1 - R_{EE})(1 - R_{ij})(1 - R_{ES})(e^{-(kc)_i b_1})(e^{-(kc)_j b_2})$$

Ecuación 31

De lo anterior se deduce que si el material heterogéneo está compuesto por tres materiales en lugar de dos, existen, además de las reflexiones externas de entrada y salida R_{EE} y R_{ES} , dos reflexiones internas R_{ij} y R_{ji} , como se observa en la Figura 10. Obviamente, cada uno de los tres materiales absorbe una porción del haz que los atraviesa. Ahora bien, con base en la relación de Fresnel⁽³⁵⁾, representada en la Ecuación 4, la reflexión en las caras opuestas de un mismo material tiene el mismo valor, independientemente si el haz pasa del material i al j o del j al i ⁽⁸⁾ así $R_{xy} = R_{yx}$.

Figura 10. Transmitancia en los materiales i, j e i



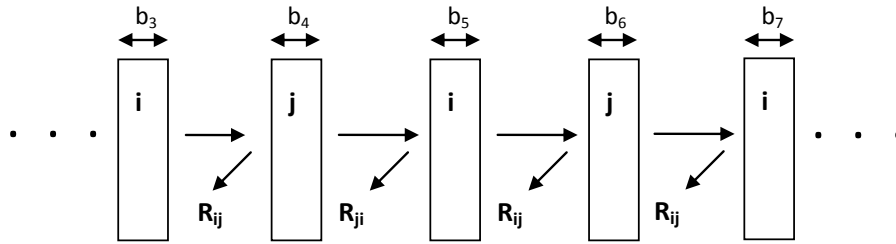
La intensidad del haz de luz al salir finalmente al aire, es decir el valor de la transmitancia, puede calcularse con la Ecuación 32:

$$I_T = I_o(1 - R_{EE})(1 - R_{ij})(1 - R_{ji})(1 - R_{ES})(e^{-(kc)_i b_1})(e^{-(kc)_j b_2})(e^{-(kc)_i b_3})$$

Ecuación 32

En términos generales, si un sólido heterogéneo, como el concreto, está constituido por dos medios, pasta de cemento y agregado, que se ligan alternadamente varias veces, al incidir sobre él un haz de luz, como lo muestra la Figura 11, la transmitancia resulta de las pérdidas de intensidad del haz de luz incidente por dos reflexiones externas R_{EE} y R_{ES} , las reflexiones internas R_{ij} y las absorciones en el paso alternado por cada material.

Figura 11. Transmitancia en N materiales i y j



El valor de la transmitancia a través de numerosos cambios de medio puede calcularse con la Ecuación 33:

$$I_T = I_o(1 - R_{EE})(1 - R_{ij})^{N-1}(1 - R_{ES})[\dots(e^{-(kc)i b_3})(e^{-(kc)j b_4})(e^{-(kc)i b_5})(e^{-(kc)j b_6})(e^{-(kc)i b_7}) \dots)]$$

Ecuación 33

Donde:

N : número de veces que el haz atraviesa las pasta de cemento y el agregado.

Ahora bien, en el caso de los concretos, resulta cuando menos difícil, medir expresamente los espesores de cada fase de pasta de cemento o de agregado atravesada por el haz de luz, razón por la cual puede simplificarse el problema suponiendo, que tanto para los espesores del material i como para el material j son iguales, lo que resulta en:

$$I_T = I_o(1 - R_{EE})(1 - R_{ES})(1 - R_{ij})^{N-1}(e^{-(kcb)i})^x(e^{-(kcb)j})^y$$

Ecuación 34

Donde:

x, y : Exponentes que dependen de N :

Si N es par $\{x = y = N/2\}$

Si N es impar $\left\{x = \frac{N+1}{2}; y = \frac{N-1}{2}\right\}$

Esta hipótesis es válida solamente para materiales compuestos por dos ingredientes que se ligan alternadamente, de manera que el paso de un medio interno al otro siempre será de i a j o de j a i .

En el caso de los morteros, donde las fronteras serían {pasta – agregado}, es claro que a menor tamaño del agregado, mayor es N y aumentan las pérdidas por reflexión en el interior del mortero, disminuyendo el porcentaje de luz transmitida.

Por otra parte, si varían n, k o c , es decir, si, por ejemplo, dos cementos tienen diferentes propiedades óptica en términos de índice de reflexión y coeficiente de extinción, o si hay mayor concentración de cemento en una mezcla que la otra o si se introduce un agregado con mayor o menor absorción o varía el espesor total del sólido, varía el valor de la transmitancia. Por lo tanto, son estos parámetros los que deben participar en el diseño de la etapa experimental de esta investigación.

6 FASE EXPERIMENTAL

En esta fase, se describe el diseño del experimento, los materiales seleccionados para ensayar, la metodología seguida y la normativa que reguló los ensayos realizados.

El modelo experimental fue elaborado de tal manera que sobre las muestras de mortero y pasta se haga incidir un haz de luz dentro del intervalo de luz visible para medir, mediante la utilización del espectrofotómetro⁽³⁷⁾, la intensidad del haz de luz reflejado y transmitido, junto con la evaluación de otras propiedades como densidad, fluidez y consistencia como patrones de comparación entre diversas mezclas de concreto.

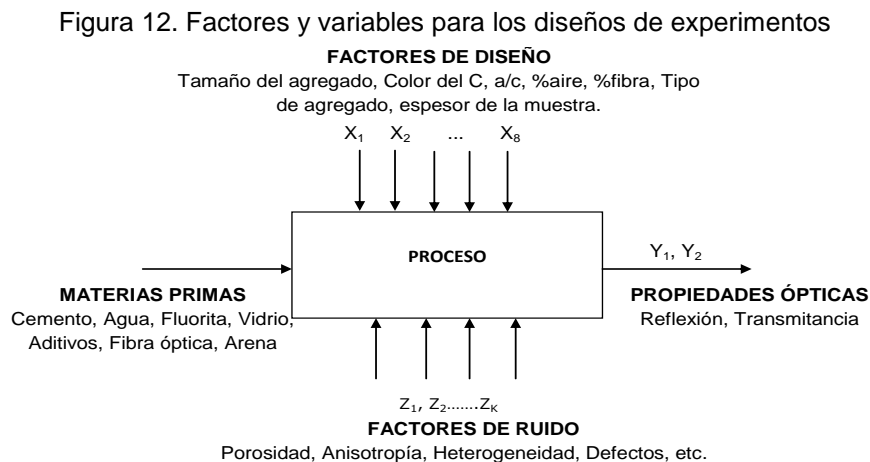
La metodología se basa en el uso de fluorita como agregado en las probetas, buscando transmitir ondas electromagnéticas en el intervalo de luz visible y su posible comportamiento dentro de una matriz cementante, comparado con el comportamiento de probetas de referencia de pasta de cemento y fluorita sola.

La selección de las variables controlables y sus valores se fundamentó en la hipótesis propuesta aquí y en los valores usuales de parámetros del diseño de mezclas de concreto.

6.1 Diseño de experimentos

El montaje experimental se diseñó a partir de la metodología de los modelos factoriales y factoriales fraccionados^{(11) (12)} con un nivel de confianza del 95% lo que representa una significancia predefinida de $\alpha = 0,05$. Se buscó que los diseños fraccionados tuvieran resolución IV para evitar la aparición de alias en los efectos principales⁽¹¹⁾.

Con la Figura 12 se describe la participación de las materias primas, factores controlables, factores no controlables o de ruido y variables de respuesta dentro del proceso de diseño de experimentos planteado en esta investigación.



Fuente. Elaboración propia, a partir de la figura 1.4, página 9, del libro, Análisis y diseño de experimentos, Gutiérrez H⁽¹²⁾

En la Tabla 1 se listan los factores controlables y sus valores utilizados durante esta investigación. La descripción de los elementos que participan en el diseño de experimentos se presenta en el siguiente numeral.

Tabla 1. Factores controlables y sus valores

Factores controlables	Valores	
	Bajo	Alto
Tamaño del agregado	Pasa No. 16 Retiene No. 20 Prom (1,015mm)	Pasa No. 4 Retiene No. 8 Prom (3,56mm)
Tipo de cemento	Gris	Blanco
Relación a/c en morteros	0,50	0,60
Relación a/c en pastas	0,30	0,33
% superplastificante en pastas	0	1,90
% aire (en peso)	0	0,50
% fibra óptica (en peso)	0	0,05
Tipo de agregado	Fluorita	Vidrio
Relación Cemento:Agregado	1:2,75 1:3	1:3,75 1:4
Espesor de la muestra (mm)	5 mm - 10 mm - 20 mm - 50mm	

El montaje experimental se realizó en tres etapas:

Etapa uno: Se hizo una caracterización óptica de la fluorita para determinar, para diferentes espesores, los valores de índice de refracción, n , y coeficiente de extinción, k , para ser utilizados como referencia de las probetas de mortero y pasta evaluadas durante la experimentación.

Etapa dos: Con base en el modelo de diseño de experimentos factoriales ⁽¹²⁾ se realizó la caracterización óptica para las pastas de cemento. Los factores controlables y sus valores para cada ensayo se listan en la Tabla 2.

Tabla 2. Factores controlables y sus valores para pastas de cemento

Ensayo	Espesor (mm)	Relación a/c	Tipo de Cemento	Superplastificante (%)	Aire (%)
1	5	0,3	Gris	0	0,5
2	5	0,3	Blanco	1,9	0,5
3	5	0,33	Blanco	0	0,5
4	5	0,33	Gris	0	0
5	5	0,33	Blanco	1,9	0
6	5	0,3	Gris	1,9	0
7	5	0,33	Gris	1,9	0,5
8	5	0,3	Blanco	0	0
9	2,5	0,3	Gris	0	0,5
10	2,5	0,3	Blanco	1,9	0,5

11	2,5	0,33	Blanco	0	0,5
12	2,5	0,33	Gris	0	0
13	2,5	0,33	Blanco	1,9	0
14	2,5	0,3	Gris	1,9	0
15	2,5	0,33	Gris	1,9	0,5
16	2,5	0,3	Blanco	0	0

Etapas tres: Para la evaluación de las propiedades ópticas de los morteros se utilizaron los modelos factoriales ⁽¹²⁾. Se evaluaron ocho factores controlables para diferentes espesores de probetas divididos en tres partes experimentales; en la primera parte de la etapa tres participan cinco factores: Relación agua/cemento, porcentaje de aire, tipo de cemento, tamaño del agregado de fluorita y porcentaje de fibra óptica. En la segunda parte se evalúa la relación cemento:agregado y el tipo de agregado; la tercera, y última, se evalúan nuevamente la relación cemento:agregado debido a la existencia de una tendencia inconsistente en la segunda parte.

El efecto de la variable del tipo de cemento se evaluó en los tres diseños experimentales para tener claro su efecto sobre las variables de respuesta.

En la Tabla 3, en la Tabla 4 y en la Tabla 5, se especifica, respectivamente, los factores controlables y sus valores, para cada ensayo ejecutado en las tres partes de la etapa tres.

Tabla 3. Factores controlables y sus valores para morteros, parte I

Ensayo	Espesor (mm)	Relación a/c	Aire (%)	Tipo de Cemento	Tamaño agregado de fluorita (mm)	Fibra óptica (%)
1	50	0,6	0,5	Gris	3,56	0
2	50	0,5	0	Blanco	3,56	0
3	50	0,6	0	Gris	1,015	0
4	50	0,5	0,5	Blanco	1,015	0
5	50	0,5	0	Gris	3,56	0,05
6	50	0,5	0,5	Gris	1,015	0,05
7	50	0,6	0	Blanco	1,015	0,05
8	50	0,6	0,5	Blanco	3,56	0,05
9	20	0,6	0,5	Gris	3,56	0
10	20	0,5	0	Blanco	3,56	0
11	20	0,6	0	Gris	1,015	0
12	20	0,5	0,5	Blanco	1,015	0
13	20	0,5	0	Gris	3,56	0,05
14	20	0,5	0,5	Gris	1,015	0,05
15	20	0,6	0	Blanco	1,015	0,05
16	20	0,6	0,5	Blanco	3,56	0,05
17	10	0,6	0,5	Gris	3,56	0
18	10	0,5	0	Blanco	3,56	0

19	10	0,6	0	Gris	1,015	0
20	10	0,5	0,5	Blanco	1,015	0
21	10	0,5	0	Gris	3,56	0,05
22	10	0,5	0,5	Gris	1,015	0,05
23	10	0,6	0	Blanco	1,015	0,05
24	10	0,6	0,5	Blanco	3,56	0,05
25	5	0,6	0,5	Gris	3,56	0
26	5	0,5	0	Blanco	3,56	0
27	5	0,6	0	Gris	1,015	0
28	5	0,5	0,5	Blanco	1,015	0
29	5	0,5	0	Gris	3,56	0,05
30	5	0,5	0,5	Gris	1,015	0,05
31	5	0,6	0	Blanco	1,015	0,05
32	5	0,6	0,5	Blanco	3,56	0,05

Tabla 4. Factores controlables y sus valores para morteros, parte II

Ensayo	Espesor (mm)	Relación cemento:agregado	Tipo de agregado	Tipo de Cemento
1	50	4	fluorita	gris
2	50	4,75	fluorita	blanco
3	50	4,75	vidrio	blanco
4	50	4	fluorita	blanco
5	50	4,75	fluorita	gris
6	50	4	vidrio	gris
7	50	4	vidrio	blanco
8	50	4,75	vidrio	gris
9	20	4	fluorita	gris
10	20	4,75	fluorita	blanco
11	20	4,75	vidrio	blanco
12	20	4	fluorita	blanco
13	20	4,75	fluorita	gris
14	20	4	vidrio	gris
15	20	4	vidrio	blanco
16	20	4,75	vidrio	gris
17	10	4	fluorita	gris
18	10	4,75	fluorita	blanco
19	10	4,75	vidrio	blanco
20	10	4	fluorita	blanco
21	10	4,75	fluorita	gris
22	10	4	vidrio	gris

23	10	4	vidrio	blanco
24	10	4,75	vidrio	gris
25	5	4	fluorita	gris
26	5	4,75	fluorita	blanco
27	5	4,75	vidrio	blanco
28	5	4	fluorita	blanco
29	5	4,75	fluorita	gris
30	5	4	vidrio	gris
31	5	4	vidrio	blanco
32	5	4,75	vidrio	gris

Tabla 5. Factores controlables y sus valores para morteros, parte III

Ensayo	Espesor (mm)	Tipo de cemento	Relación cemento:agregado
1	10	Gris	3,75
2	10	Gris	4
3	10	Gris	5
4	10	Blanco	3,75
5	10	Blanco	4
6	10	Blanco	5
7	5	Gris	3,75
8	5	Gris	4
9	5	Gris	5
10	5	Blanco	3,75
11	5	Blanco	4
12	5	Blanco	5

6.1.1 Variables de respuesta

Teniendo en cuenta el marco teórico se deben evaluar, por exploración, el valor de cuatro variables de caracterización óptica en los morteros para realizar una evaluación de sus propiedades ópticas: Índice de refracción, n , coeficiente de extinción, k , concentración del absorbente, c , y espesor, b . Estas variables ópticas dependen de las siguientes propiedades ópticas, que son en este caso las variables de respuesta evaluadas: Reflexión, R , absorción, A , y transmitancia, T ; R y T se miden directamente y A se obtiene a partir de éstas dos.

6.1.2 Factores controlables

La selección de los factores se hace teniendo en cuenta el análisis para el desarrollo del complemento teórico propuesto en este estudio.

Tamaño del agregado

Este factor es consecuencia directa de la hipótesis planteada, si se varía el tamaño del agregado se afecta el número de fronteras pasta-agregado. Por lo tanto, sus valores se direccionaron a tener agregados de la parte alta de la distribución granulométrica que corresponden a los tamices, pasa No. 4 retiene No. 8 y pasa No. 16 retiene No. 20⁽³⁸⁾.

Tipo de cemento

Cuando al cemento se le sustraen las fracciones de materiales como óxidos de hierro, su color cambia⁽³⁹⁾; Así, por ejemplo, se obtiene el cemento blanco⁽⁴⁰⁾. Es posible que esta modificación influya en las propiedades ópticas de cada tipo de cemento, por lo que se decidió involucrar esta variable usando cemento gris, **G**, y cemento blanco, **B**, en los ensayos.

Relación Agua/Cemento (a/c)

Como ya se expuso, la transmitancia depende, entre otros factores, de la capacidad de cada material de absorber la radiación de luz; obviamente, la absorción en los morteros, depende entonces, de la concentración del absorbente, **c**, que varía, para el cemento, en función de la relación a/c. Se escogieron, para este caso, las relaciones de 0,5 y 0,6.

Relación cemento:agregado (c:Af)

De manera similar que para la relación a/c, la proporción c:Af influye en la concentración del cemento como material absorbente. Consecuentemente, se seleccionaron las relaciones 1:2.75, 1:3, 1:3.75 y 1:4.

Aditivo

Es frecuente utilizar aditivo reductor de agua en las mezclas con cemento para controlar su fluidez; también se utiliza eventualmente aditivo inclusor de aire para mejorar la durabilidad de las mezclas, entre otros factores^{(2) (39)}.

De tal manera, se realizaron ensayos en pastas de cemento con o sin cada uno de ambos aditivos para evaluar el impacto en el valor de la transmitancia. En los morteros sólo se evaluó el inclusor de aire teniendo en cuenta que las burbujas de aire pueden representar menos absorción de luz. Se incorporó el 1.9%, por peso de cemento, de plastificante y el 0.5% de inclusor de aire.

Fibra óptica

Por sus obvias características ópticas, la fibra óptica ha sido objeto de numerosas investigaciones sobre transmisión de luz a través de sólidos^{(5) (6) (41)}, usándola como canales para el haz de luz a través de matrices de cemento o de resinas poliméricas; el alineamiento de las fibras con la dirección del rayo incidente juega un papel en la efectividad en la transmitancia. En el presente estudio se incluyó esta variable, para servir de patrón de referencia más, pero sin alinear las fibras con la dirección del rayo incidente, sino que se incorporaron a la mezcla de manera aleatoria, en proporción de 0,05% por peso del cemento.

Tipo de agregado

La capacidad de absorción de luz del agregado influye en la transmitancia. Materiales más opacos transmiten menos luz. La fluorita es un material menos opaco que la arena de fuente silíceas; a su vez, vidrio transparente transmite más luz que la fluorita⁽³⁴⁾. Se comprobó que no existe diferencia en la transmitancia entre pastas de cemento o morteros de cemento con arena silícea convencional, de manera que se escogió utilizar fluorita y vidrio como valores del tipo de agregado.

Espesor de la muestra

El espesor, *b*, de la muestra afecta directamente la transmitancia. Los valores utilizados fueron 5 mm, 10 mm, 20 mm y 50 mm.

6.1.3 Factores no controlables

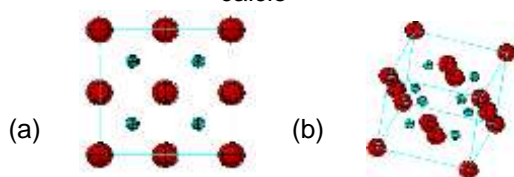
Es importante destacar que pueden existir otros factores que afecten la transmitancia en los morteros y que no pudieron tenerse en cuenta en este trabajo como factores controlables. Entre otros: Porosidad, anisotropía, heterogeneidad y defectos (fisuras, rugosidad, etc.)^{(8) (34)}. Estos factores no controlables harán parte del error aleatorio⁽¹²⁾.

6.1.4 Materiales usados

Fluorita

El fluoruro de calcio es uno de los materiales naturales que cumple con dos características específicas, es abundante y presenta una buena propiedad de translucidez⁽⁷⁾. Los elementos que se unen para su formación pertenecen a los grupos 2 y 17 de la tabla periódica que, en su orden son el calcio y el flúor. El calcio presenta una configuración electrónica donde en su último subnivel (4s) tiene dos electrones, lo que le permite cederlos para convertirse en un Catión Ca^+ . El flúor que en su último subnivel (2p) contiene cinco electrones, le es más sencillo recibir electrones para quedar completo, convirtiéndose en un Anión F^- . Como el catión cede dos electrones, y el flúor solo puede recibir uno, se necesitan dos aniones⁽⁷⁾. La reacción de estos dos elementos, el uno muy electropositivo (Ca) y el otro muy electronegativo (F), forma iones con una configuración electrónica muy estable, manteniéndose unidos por la acción de fuerzas electrostáticas⁽¹⁰⁾. La estequiometría de este sólido iónico es de tipo MX_2 (CaF_2), o fluoruro de calcio, conocido como fluorita. Su cristalización es cúbica centrada en las caras como se muestra en la Figura 13, donde los cationes están distribuidos en los vértices y centros de las caras de una celda unitaria cúbica, los aniones están coordinados tetraédricamente con cuatro cationes y cada catión está coordinado con ocho aniones que lo rodean en los vértices de un cubo⁽⁷⁾.

Figura 13. Isométrica (b) y vista en planta (a) del modelo de la estructura atómica del fluoruro de calcio



Las esferas rojas representan los cationes, que son de mayor tamaño, porque poseen un número atómico mayor que los aniones.

Una característica importante de la fluorita es que es un material isotrópico, en el cual el movimiento de la luz en todas sus direcciones tiene la misma velocidad y, por lo tanto, tiene un solo índice de refracción ⁽⁷⁾.

A la hora de utilizar un agregado en la preparación de una mezcla de concreto o mortero se debe considerar los posibles efectos al reaccionar con el cementante y sus componentes. Debido a las características que presenta la fluorita en su composición química y mineralógica, es poco probable que genere una reacción con los álcalis del cemento u otra reacción de inestabilidad, ya que en su estado puro carece de sílices, arcillas, sulfuros o sulfatos que son los que podrían ocasionar cambios volumétricos perjudiciales dentro del material ⁽³⁹⁾.

En un estudio realizado por el Grupo de Investigación Química del Cemento y Materiales de Construcción de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín donde se compara la fluorita Colombiana con la Mexicana ⁽⁴²⁾, la fluorita colombiana presenta contenidos de flúor cercanos al valor máximo teórico (48,7% de flúor y 51,3% de calcio), lo que indica el alto grado de pureza química; sin embargo, mineralógicamente, su pureza es menor pues contiene principalmente dos contaminantes, la barita y el cuarzo, que pueden afectar la durabilidad de la mezcla ⁽⁴²⁾. La fluorita mexicana, aunque tiene menor pureza química, su porcentaje de contaminantes es mucho menor, lo que favorece el comportamiento entre agregado y pasta cementante ⁽⁴³⁾. Los agregados que presentan densidades bajas son más sensibles a los cambios volumétricos ⁽²⁾. La densidad teórica de la fluorita está alrededor de 3.16 g/cm^3 ⁽⁷⁾, densidad similar a la del cemento, lo que puede indicar una sensibilidad a cambios volumétricos similares.

Desde el punto de vista térmico, el coeficiente de dilatación, la conductividad y el calor específico determinan el comportamiento ante cambios de temperatura de los agregados dentro del compuesto; la fluorita, por su naturaleza iónica y sus características particulares, es un aislador, ya que los iones están fijos en la red y no hay movilidad que permita la conducción eléctrica, esto, sumado a la fuerte interacción entre los iones, permite afirmar que la dilatación térmica tiende a ser muy pequeña o inofensiva para los morteros o pastas de cemento ^{(7) (39)}.

Para la elaboración de los ensayos se utilizó fluorita Colombiana donada por la empresa *Reframetal S.A.*

Cemento

La anisotropía del material producto de la mezcla del cemento con el agua ⁽⁴⁰⁾, hace que sus propiedades ópticas sean diferentes según la dirección de análisis, esto implica, que cuando en este documento se refiera a las variables y propiedades ópticas, de estos materiales, será en términos de un valor promedio del material analizado. Los cementos más utilizados y de uso común en la industria de la construcción, disponibles en la región, son cementos tipo III, fabricados tanto en versión gris como en blanco.

Incorporador de aire

Es un aditivo líquido de color ámbar, con base en resinas neutralizadas y que cumple con la norma ASTM C260/C260M – 10^a ⁽⁴⁴⁾, Se seleccionó el aditivo AIRTOC D, marca TOXEMENT, aditivo frecuentemente utilizado en la construcción local.

Superplastificante

Es un aditivo reductor de agua de alto desempeño, sin cloruros, que da un excelente aumento en la manejabilidad de mezclas con baja relación agua/cementante, cumple con los requerimientos de la norma ASTM C494/C494M – 11 ⁽⁴⁵⁾, Se seleccionó el aditivo EUCON 1037, marca TOXEMENT, aditivo frecuentemente utilizado en la construcción local.

Fibra óptica

La Fibra óptica es un material con excelentes propiedades para transportar la luz visible, la utilizada en los ensayos corresponde a un material de uso frecuente por parte de las Empresas Públicas de Medellín para conducción de datos. Su diámetro es de 0,12 mm.

Agua

El agua empleada para la realización de morteros y pastas se obtuvo del suministro de agua potable de la ciudad de Medellín.

Vidrio

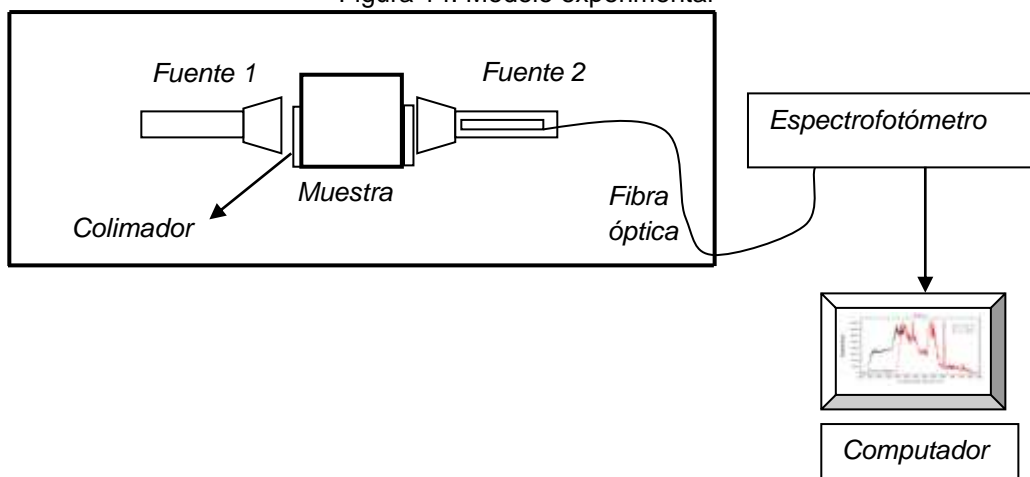
El vidrio es del tipo comercial clasificado como vidrio plano, según NTC 1547 ⁽⁴⁶⁾. Constituido principalmente por compuestos de silicio, calcio y sodio, incoloro, con altas propiedades de translucidez, se obtiene de procesos de laminado, estirado o flotado.

6.1.5 Métodos y ensayos

Medición de propiedades ópticas

La medición de transmitancia, reflectancia y absorbancia en los morteros y pastas se reguló con las normas ASTM E1175-09 ⁽⁴⁷⁾ y ASTM E971 – 11 ⁽⁴⁸⁾ (Equivalente a la NTC 2631 ⁽⁴⁹⁾). El modelo experimental se presenta en la Figura 14. La fuentes 1 y 2 son linternas de foco de luz blanca basado en una matriz LED (Light-Emitting Diode) de alta eficacia, iluminación uniforme en todo su alcance y longitud de onda de luz blanca. Dentro de la fuente 2 se instala el detector de fibra óptica que dependiendo de la fuente encendida identifica la intensidad de luz transmitida o reflejada. Si la linterna que se encuentra encendida es la fuente 1 se estaría midiendo transmitancia; si se encuentra encendida la fuente 2 se mediría reflectancia. Entre la muestra y la fuente, cualquiera que fuese, se colocó un lente colimador para lograr perpendicularidad de los rayos incidentes y transmitidos. Las mediciones se realizaron para una longitud de onda de 550 nm, por ser ésta la de mayor visibilidad para el ojo humano ⁽³⁴⁾.

Figura 14. Modelo experimental



Cada una de las muestras se fabricó teniendo en cuenta la norma ASTM C109/c109M-08 ⁽⁵⁰⁾ (Equivalente a la NTC 220 ⁽⁵¹⁾) donde se describe la forma de preparar cubos de mortero de 50.8 mm de lado a los que se les mide las propiedades ópticas para posteriormente ser cortados a 20 mm, 10 mm y 5 mm con el fin de evaluarles las mismas propiedades. La información recopilada por el detector es conducida a un espectrofotómetro profesional ⁽³⁷⁾. Para cada muestra se tomaron espectros de referencia 15 minutos después de encendida la fuente de luz con emisión continua en un intervalo de longitudes de onda de 350 nm a 750 nm.

Probetas para ensayo

A continuación se presenta la nomenclatura utilizada para identificar cada una de las probetas utilizadas y la dosificación con base en la cual se fabricaron.

Nomenclatura y dosificación para pastas y morteros

Pastas

Cada probeta de pasta de cemento se identifica con una clave de seis símbolos, así:

A B C D E F

- A: Número de vaciado
- B: Tipo de cemento:
 - G: Cemento gris
 - B: Cemento blanco
- C: Relación agua/cemento
- D: Superplastificante:
 - C: Con superplastificante
 - S: Sin superplastificante
- E: Día del ensayo después del vaciado
- F: Incorporador de aire:

C: Con Incorporador de aire
S: Sin Incorporador de aire

Morteros

Cada probeta de mortero de cemento se identifica con una clave de ocho símbolos, así:

A B C D E F G H

A: Número de vaciado
B: Tipo de agregado:
 A: Arena común de obra
 F: Fluorita
 V: Vidrio
C: Peso total de cemento y agregado expresada en partes de cemento
D: Tipo de cemento:
 G: Cemento gris
 B: Cemento blanco
E: Incorporador de aire:
 C: Con Incorporador de aire
 S: Sin Incorporador de aire
F: Relación agua/cemento
G: Adición de fibra óptica:
 C: Con fibra óptica
 S: Sin fibra óptica
H: Día del ensayo después del vaciado

Dosificación

Las mezclas de pastas y morteros se prepararon con las siguientes dosificaciones, ver Tabla 6 y Tabla 7 respectivamente, en función del peso del cemento:

Tabla 6. Dosificaciones para pastas de cemento

Mezcla	Cemento	Agua	Aditivo 1	Adición 2
1	1	0,3	0	0,005
2	1	0,3	0,019	0,005
3	1	0,33	0	0,005
4	1	0,33	0	0
5	1	0,33	0,019	0
6	1	0,3	0,019	0
7	1	0,33	0,019	0,005
8	1	0,3	0	0

Tabla 7. Dosificaciones para morteros de cemento

Mezcla	Cemento	Agregado	Agua	Aditivo	Adición
1	1	2,75	0,5	0	0
2	1	2,75	0,6	0,005	0
3	1	2,75	0,6	0	0
4	1	2,75	0,6	0	0
5	1	2,75	0,5	0,005	0
6	1	2,75	0,5	0	0,0005
7	1	2,75	0,5	0,005	0,0005
8	1	2,75	0,6	0	0,0005
9	1	2,75	0,6	0,005	0,0005
10	1	3	0,6	0,005	0
11	1	3,75	0,6	0,005	0
12	1	4	0,6	0,005	0

El proceso para la fabricación de las muestras para la realización de los experimentos es idéntico al utilizado en la determinación de la resistencia a compresión de morteros con cubos normalizado en ASTM C109/c109M-08⁽⁵⁰⁾ (Equivalente a la NTC 220⁽⁵¹⁾). La mezcla se realiza siguiendo la ASTM C305-11⁽⁵²⁾ (Equivalente a la NTC 112⁽⁵³⁾).

Para la dosificación de los agregados se determinó su densidad y absorción siguiendo el procedimiento presentado en ASTM C128 - 07a⁽⁵⁴⁾ (Equivalente a la NTC 237⁽⁵⁵⁾).

La fluidez de las mezclas de mortero se midió con el procedimiento establecido en ASTM C1437-0⁽⁵⁶⁾ (Equivalente a la NTC 5784⁽⁵⁷⁾).

Para fabricar las pasta se utilizó la prueba de consistencia normal del cemento siguiendo el procedimiento descrito en ASTM C187 - 11^{e1}⁽⁵⁸⁾ (Equivalente a la NTC 110⁽⁵⁹⁾), que permite identificar la cantidad de agua necesaria para una plasticidad específica de la pasta.

7 PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con base en la metodología propuesta y en todo el desarrollo presentado en los anteriores capítulos, se ejecutaron los ensayos de la fase experimental, cuyos resultados se presentan y analizan a continuación.

La comparación de resultados se realizó principalmente contra los valores obtenidos en la caracterización óptica para la fluorita, teniendo en cuenta también, el comportamiento de las pastas de cemento cuando se incide sobre ellas un haz de luz en el intervalo visible.

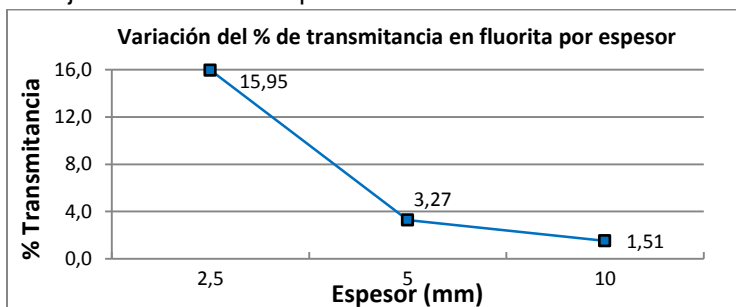
La evaluación de la influencia de los factores controlables se basó en el diagrama de Pareto que muestra los factores que tuvieron efectos significativos sobre las variables de respuesta; para aquellos que no fueron influyentes se realizó un análisis para argumentar si se tenían o no en cuenta ⁽¹²⁾; consecuentemente, se vacía la información seleccionada en el diagrama de efectos principales de los factores de mayor influencia sobre la variable de respuesta y finalmente se hace la verificación de supuesto del modelo experimental donde se comprueba la validez de los resultados por normalidad, varianza constante e independencia ⁽¹¹⁾. Para este proceso se utilizó un algoritmo comercial para computador*.

Todos los valores necesarios como insumo (densidad, concentración, índices ópticos, etc.) fueron obtenidos durante la investigación mediante pruebas sobre los materiales utilizados. Debido a las restricciones propias de las circunstancias, v.gr., fechas límite, disponibilidad de materiales, etc., el diseño del experimento adolece de transversalidad; en otras palabras, las propiedades se midieron en un sólo instante en el tiempo sin introducir la variable de la edad de la muestra. La presente investigación es principalmente experimental, midiendo empíricamente las consecuencias de la variación de los valores de las variables controlables ^{(11) (60)}.

7.1 Evaluación de reflexión, absorción y transmitancia en fluorita

Cuando se incide con un haz de luz sobre la superficie de la fluorita, los porcentajes de transmitancia disminuyen a medida que aumenta el espesor de la muestra, como se observa en la Figura 15.

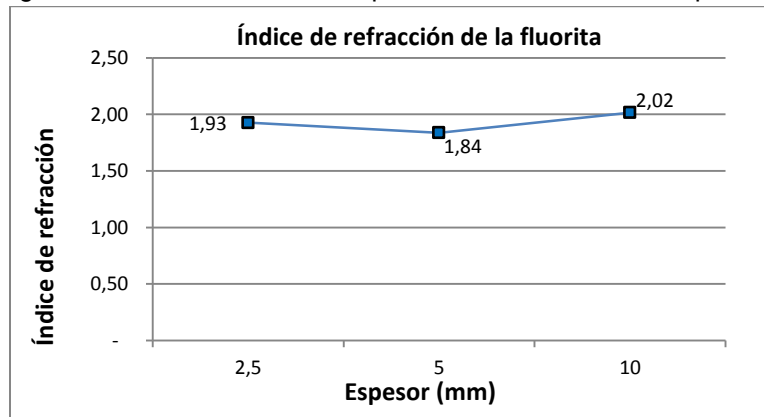
Figura 15. Porcentaje de transmitancia para la fluorita en función de la variación del espesor



* El software utilizado en el proceso fue *Minitab 16 Statistical Software*, disponible gratuitamente, en versión de demostración, en <http://www.minitab.com/es-ES/products/minitab/free-trial.aspx>.

De igual manera, a cada una de estas muestras se les midió el porcentaje de luz reflejada, Reflectancia, con el cual, utilizando la relación de Fresnel, Ecuación 4, se obtiene el índice de refracción, n . En la Figura 16 se aprecia que las tres muestras tuvieron aproximadamente la misma reflexión en la cara de incidencia del haz de luz (la desviación estándar fue de 0.09, que representa el 5% del menor índice de refracción). Ahora bien, el promedio obtenido fue de 1.93, que es el 35% mayor que el valor reportado en la literatura para fluorita pura, de 1,43⁽⁷⁾, lo que indica obviamente que la fluorita utilizada contiene impurezas. En efecto, la fluorita en mención proviene de fuentes que contienen barita y cuarzo, como se ha reportado en otras publicaciones⁽⁴²⁾. Si se hace una interpretación de la diferencia en los valores del índice de refracción teórico y calculado, se diría que en la fluorita utilizada en esta investigación, la velocidad con que viaja la luz en su interior es el 25% más lenta que en una fluorita en estado puro⁽⁸⁾.

Figura 16. Índice de refracción para fluorita a diferentes espesores



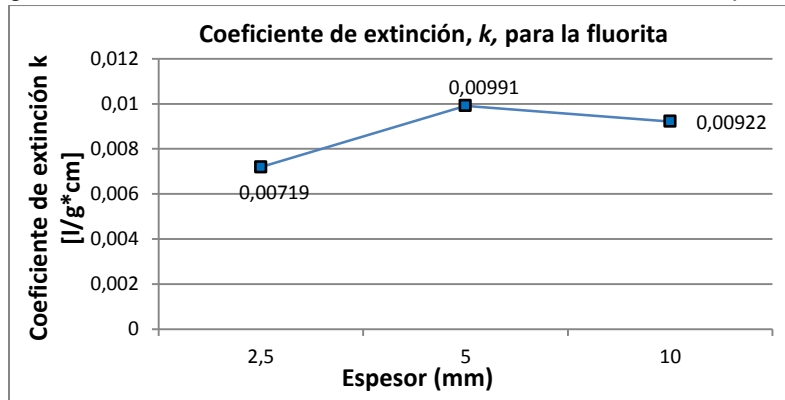
Definido el índice de refracción, n , de la fluorita, independientemente de la intensidad del haz de luz incidente sobre la muestra y del espesor, se determinó las pérdidas por reflexión. En promedio, es decir, para un n de 1.93, aplicando la relación de Fresnel, el coeficiente de reflexión, R , es de 0.10, que quiere decir que, en promedio, se presenta un 10% de pérdidas por reflexión en el haz de luz visible que incide sobre el material estudiado.

De manera similar al índice de refracción, n , el coeficiente de extinción, k , debe ser independiente del espesor de la muestra⁽³⁴⁾, como se confirma con los resultados que se presentan en la Figura 17. El coeficiente de extinción, k , se obtiene mediante la aplicación de la Ecuación 35, a partir de la medida de la concentración del absorbente, c , que, a su vez, se puede calcular si se conoce los porcentajes de cada una de las impurezas presentes en la fluorita. Si el grado de pureza de la fluorita analizada en promedio es del 70%⁽⁴³⁾ y su densidad aparente se midió en 2,63 g/cm³ la concentración del absorbente, c , sería de 789 g/l, independientemente del espesor de la muestra. Con este valor y los valores obtenidos de reflectancia, R , se obtiene el coeficiente de extinción, k , para cada muestra.

$$k = \frac{\ln\left(\frac{I_o(1-R)^2}{I_T}\right)}{bc}$$

Ecuación 35

Figura 17. Coeficiente de extinción de la fluorita a diferentes espesores



Definidos n y k para la fluorita, se utilizarán como patrones de comparación para las muestras de pastas y morteros, puesto que representan un umbral máximo para la transmitancia esperada que puede estimarse.

7.2 Evaluación de reflexión, absorción y transmitancia en pastas de cemento

En el otro extremo del espectro, las pastas de cemento, es decir, mezclas sin agregado, representan el umbral mínimo esperado de transmitancia en comparación con morteros con fluorita y vidrio.

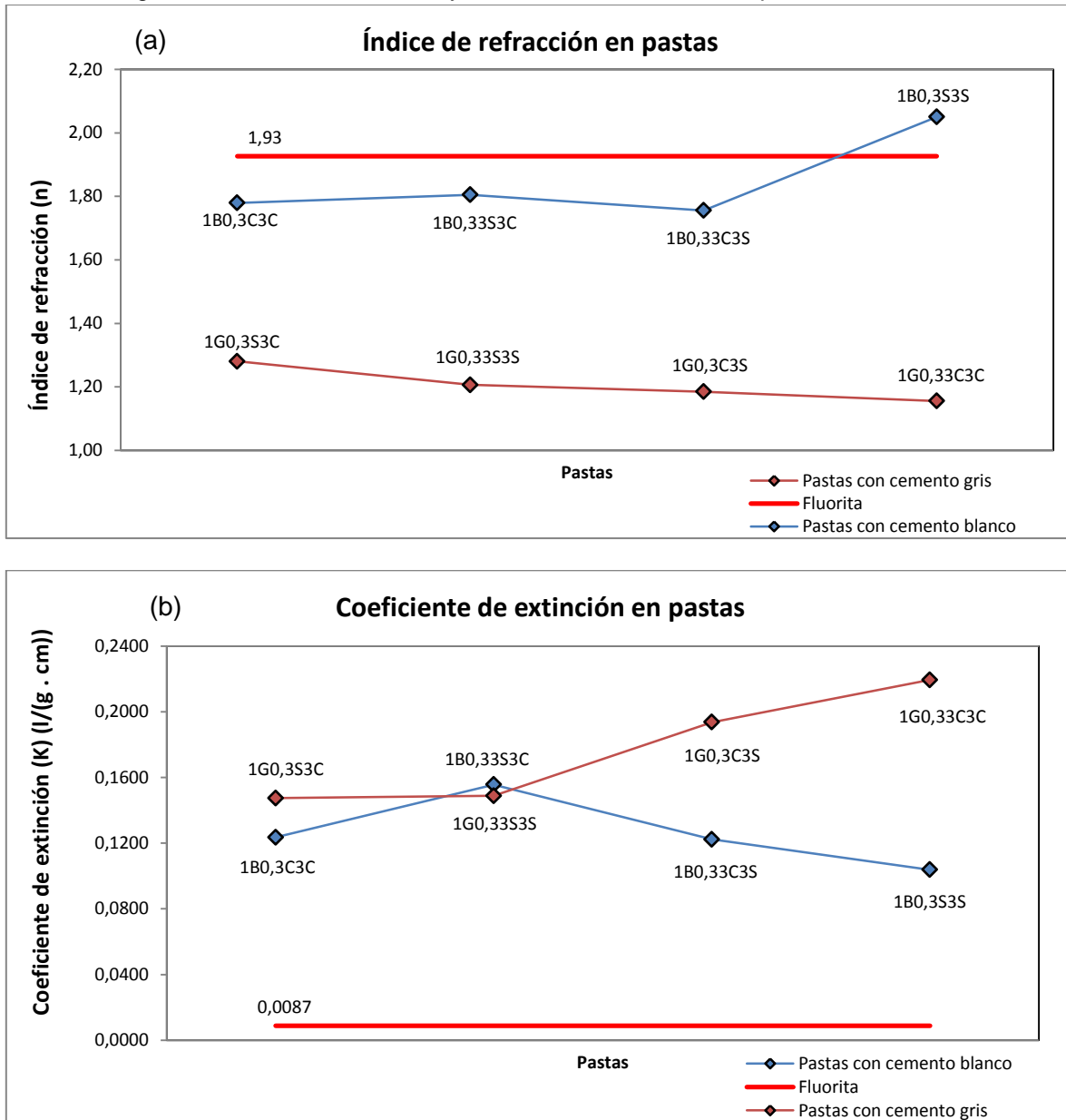
En la Tabla 8 se listan las mezclas ensayadas de pasta de cemento.

Tabla 8. Mezclas de pastas de cemento

Muestra	Identificación	Tipo de cemento	Relación a/c	Superplastificante	Incluidor de aire
1	1G0,3S3C	Gris	0,3	No	Si
2	1B0,3C3C	Blanco	0,3	Si	Si
3	1B0,33S3C	Blanco	0,33	No	Si
4	1G0,33S3S	Gris	0,33	No	No
5	1B0,33C3S	Blanco	0,33	Si	No
6	1G0,3C3S	Gris	0,3	Si	No
7	1G0,33C3C	Gris	0,33	Si	Si
8	1B0,3S3S	Blanco	0,3	No	No

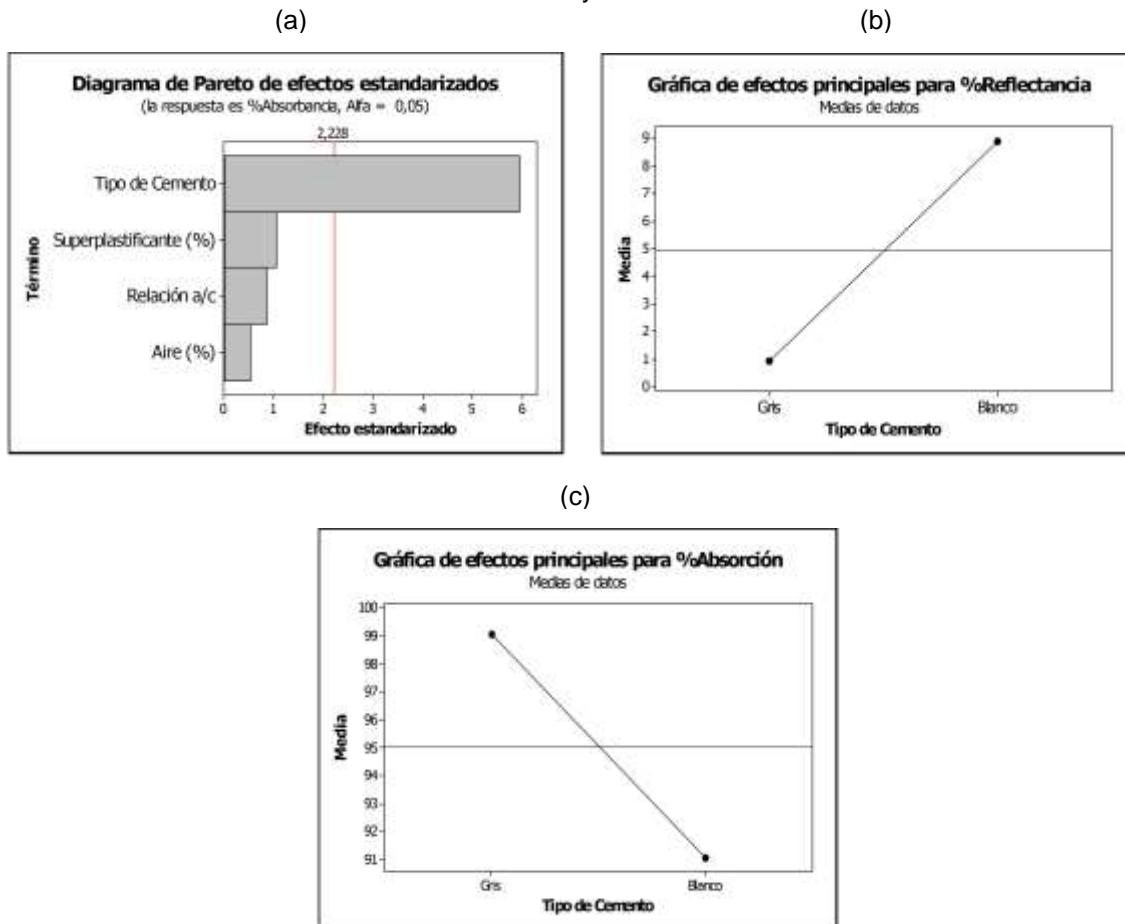
El sensor fotométrico no registró paso de luz a través de las muestras que se ensayaron con espesores de 5 mm y 2,5 mm. Como el índice de refracción sí puede medirse, los resultados indican que es mayor para las muestra con cemento blanco que para las muestras con cemento gris y que, a su vez, n para el cemento blanco es similar a n para la fluorita, como puede verse en la Figura 18 (a). Por otra parte, el coeficiente de extinción, calculado, indica que ambos tipos de cemento producen pastas que absorben cantidades similares del haz de luz y mucho más que la fluorita, como se ilustra con la Figura 18 (b).

Figura 18. Índice de refracción y coeficiente de extinción en pastas de cemento



Consecuentemente con lo anterior, en la Figura 19 se presentan el diagrama de Pareto y las gráficas de efectos principales ⁽¹²⁾. En el diagrama se ve claramente que el factor más influyente sobre las variables de respuesta es el tipo de cemento, mientras que en las gráficas se refleja que las pastas de cemento blanco resultan en altas pérdidas por reflexión y bajas por absorción y que para el cemento gris pasa lo contrario.

Figura 19. Diagrama de Pareto y gráfica de efectos principales para pastas de cemento, %reflectancia y %absorción



Fuente. Minitab 16 Statistical Software

Lo anterior significa que, entre todas las variables controlables, el tipo de cemento es el único factor que determina los valores de reflectancia y de absorción, como se ve en las gráficas de la Figura 18, independientemente del espesor de la muestra, su relación a/c o su contenido de aditivos. El promedio del índice de refracción para pastas de cemento gris y blanco es 1.21 y 1.85, respectivamente, lo que implica que los porcentajes de reflexión son 0,9% para pasta de cemento gris y 8,9% para pasta de cemento blanco. La concentración del absorbente, c , en la pasta se determina sabiendo la cantidad de cemento utilizada, que para este caso, en promedio, es de 1447 g/l, tanto para pasta de cemento gris como para pastas de cemento blanco. El coeficiente de extinción, en promedio, es de 0,126 l/(g cm) para pasta con cemento blanco y 0,177 l/(g cm) para pasta con cemento gris. Si se multiplica el coeficiente de extinción, k , y la concentración del absorbente, c , de cada una de las pastas se obtiene la *absortividad* ⁽³⁴⁾ cuyos valores son de 256,14 cm^{-1} y 182,74 cm^{-1} para pastas de cemento gris y blanco, respectivamente.

Para ilustrar cuán opaco resultan estas mezclas de pasta, basta considerar que para obtener una transmitancia del 1% de la muestra de fluorita con 5 mm de espesor, es decir, una transmitancia del 0,0327% (ver Figura 15) se necesitaría una muestra de pasta de cemento gris de

aproximadamente 0.30 mm, y de 0.40 mm para pasta de cemento blanco, espesores obtenidos despejando b de la Ecuación 5. El hecho de que para la pasta de cemento gris se requiera menos espesor que para la pasta de cemento blanco para lograr el mismo porcentaje de transmitancia, indica que la suma de las pérdidas por reflexión y absorción es mayor en el primero que en el segundo.

7.3 Evaluación de reflexión, absorción y transmitancia en morteros

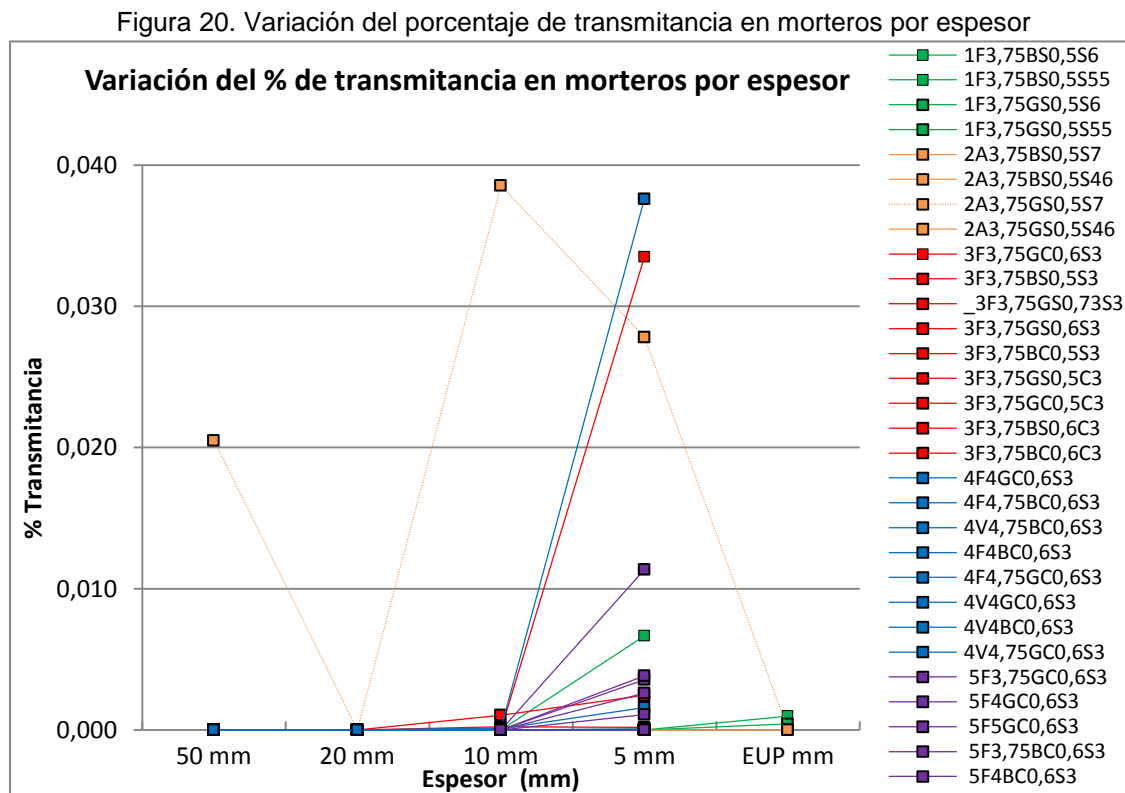
En la Tabla 9 se listan las mezclas ensayadas de morteros de cemento.

Tabla 9. Mezclas de los morteros evaluados ópticamente

Muestra	Identificación	Dosificación c:Af	Relación a/c	Tipo de cemento	Tipo y tamaño del agregado	Incluidor de aire	Fibra óptica
1	1F3,75BS0,5S6	1:2,75	0,5	BLANCO	FLUORITA +No 8 - No. 16	No	No
2	1F3,75BS0,5S55	1:2,75	0,5	BLANCO	FLUORITA +No 8 - No. 16	No	No
3	1F3,75GS0,5S6	1:2,75	0,5	GRIS	FLUORITA +No 8 - No. 16	No	No
4	1F3,75GS0,5S55	1:2,75	0,5	GRIS	FLUORITA +No 8 - No. 16	No	No
5	2A3,75BS0,5S7	1:2,75	0,5	BLANCO	ARENA OBRA +No 8 - No. 16	No	No
6	2A3,75BS0,5S46	1:2,75	0,5	BLANCO	ARENA OBRA +No 8 - No. 16	No	No
7	2A3,75GS0,5S7	1:2,75	0,5	GRIS	ARENA OBRA +No 8 - No. 16	No	No
8	2A3,75GS0,5S46	1:2,75	0,5	GRIS	ARENA OBRA +No 8 - No. 16	No	No
9	3F3,75GC0,6S3	1:2,75	0,6	GRIS	FLUORITA +No 4 - No. 8	Si	No
10	3F3,75BS0,5S3	1:2,75	0,5	BLANCO	FLUORITA +No 4 - No. 8	No	No
11	3F3,75GS0,73S3	1:2,75	0,73	GRIS	FLUORITA +No 50 - No. 100	No	No
12	3F3,75GS0,6S3	1:2,75	0,6	GRIS	FLUORITA +No 16 - No. 20	No	No
13	3F3,75BC0,5S3	1:2,75	0,5	BLANCO	FLUORITA +No 16 - No. 20	Si	No
14	3F3,75GS0,5C3	1:2,75	0,5	GRIS	FLUORITA +No 4 - No. 8	No	Si
15	3F3,75GC0,5C3	1:2,75	0,5	GRIS	FLUORITA +No 16 - No. 20	Si	Si
16	3F3,75BS0,6C3	1:2,75	0,6	BLANCO	FLUORITA +No 16 - No. 20	No	Si
17	3F3,75BC0,6C3	1:2,75	0,6	BLANCO	FLUORITA +No 4 - No. 8	Si	Si
18	4F4GC0,6S3	1:3	0,6	GRIS	FLUORITA +No 4 - No. 8	Si	No
19	4F4,75BC0,6S3	1:3,75	0,6	BLANCO	FLUORITA +No 4 - No. 8	Si	No
20	4V4,75BC0,6S3	1:3,75	0,6	BLANCO	VIDRIO +No 4 - No. 8	Si	No
21	4F4BC0,6S3	1:3	0,6	BLANCO	FLUORITA +No 4 - No. 8	Si	No
22	4F4,75GC0,6S3	1:3,75	0,6	GRIS	FLUORITA +No 4 - No. 8	Si	No
23	4V4GC0,6S3	1:3	0,6	GRIS	VIDRIO +No 4 - No. 8	Si	No
24	4V4BC0,6S3	1:3	0,6	BLANCO	VIDRIO +No 4 - No. 8	Si	No
25	4V4,75GC0,6S3	1:3,75	0,6	GRIS	VIDRIO +No 4 - No. 8	Si	No
26	5F3,75GC0,6S3	1:2,75	0,6	GRIS	FLUORITA +No 4 - No. 8	Si	No
27	5F4GC0,6S3	1:3	0,6	GRIS	FLUORITA +No 4 - No. 8	Si	No
28	5F5GC0,6S3	1:4	0,6	GRIS	FLUORITA +No 4 - No. 8	Si	No

29	5F3,75BC0,6S3	1:2,75	0,6	BLANCO	FLUORITA +No 4 - No. 8	Si	No
30	5F4BC0,6S3	1:3	0,6	BLANCO	FLUORITA +No 4 - No. 8	Si	No
31	5F5BC0,6S3	1:4	0,6	BLANCO	FLUORITA +No 4 - No. 8	Si	No

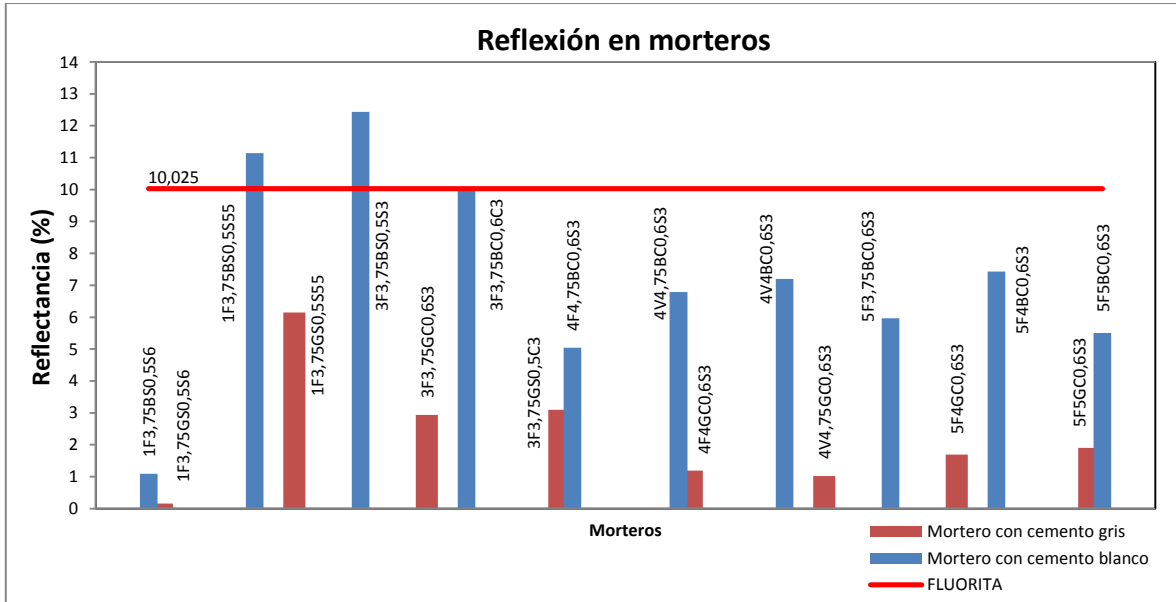
En la Figura 20 se superponen los resultados para todas las mezclas ensayadas durante la investigación.



El valor máximo de porcentaje de transmitancia alcanzado por los morteros es 0,038% cuando su espesor está alrededor de 5mm. La cantidad de energía que no se está transmitiendo se convierte en cantidad de luz reflejada y absorbida. Para poder identificar quien se está *adueñando* de la luz se debe identificar el índice de refracción, n , y el coeficiente de extinción, k , de cada mortero. Aquel que tenga mayor n será el que más porcentaje de luz visible está reflejando y el de mayor valor de k presentará el de mayor absorción.

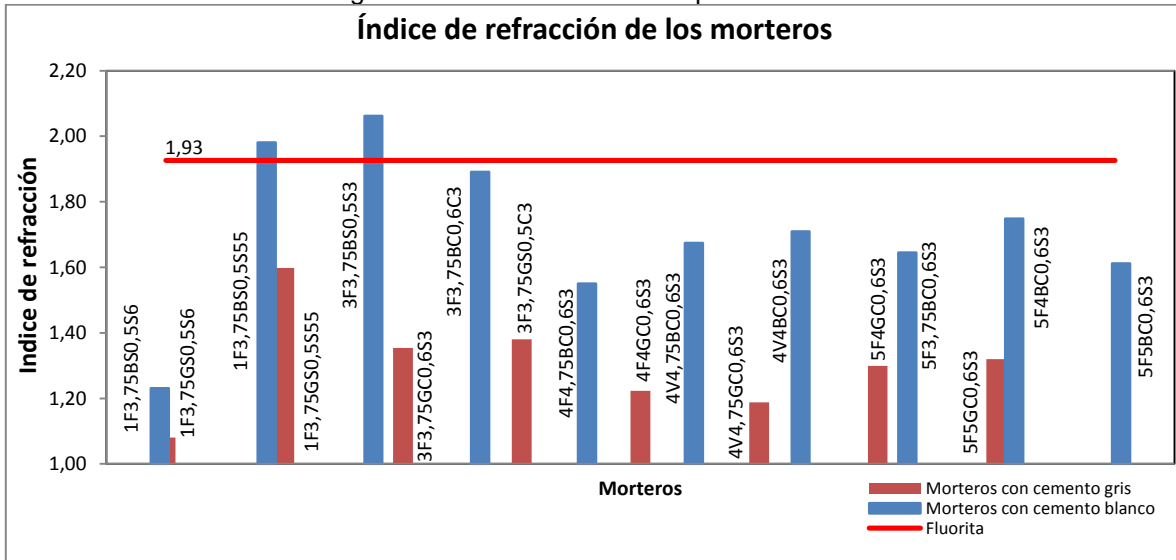
En la Figura 21 se muestra el porcentaje que presentaron los morteros por pérdidas de reflexión. Allí se observa que aquellos morteros preparados con cemento gris reflejan mucho menos que los preparados con cemento blanco, o sea que los morteros con cemento gris absorben más energía.

Figura 21. Reflexión en morteros



En la Figura 22 se presenta los índices de refracción, n , para cada uno de los morteros ensayados, valores que, debe recordarse, son valores promedio puesto que el mortero es un material anisotrópico⁽⁴⁰⁾ cuyo n , en realidad, varía en función de la dirección de incidencia del haz de luz.

Figura 22. Índice de refracción para morteros

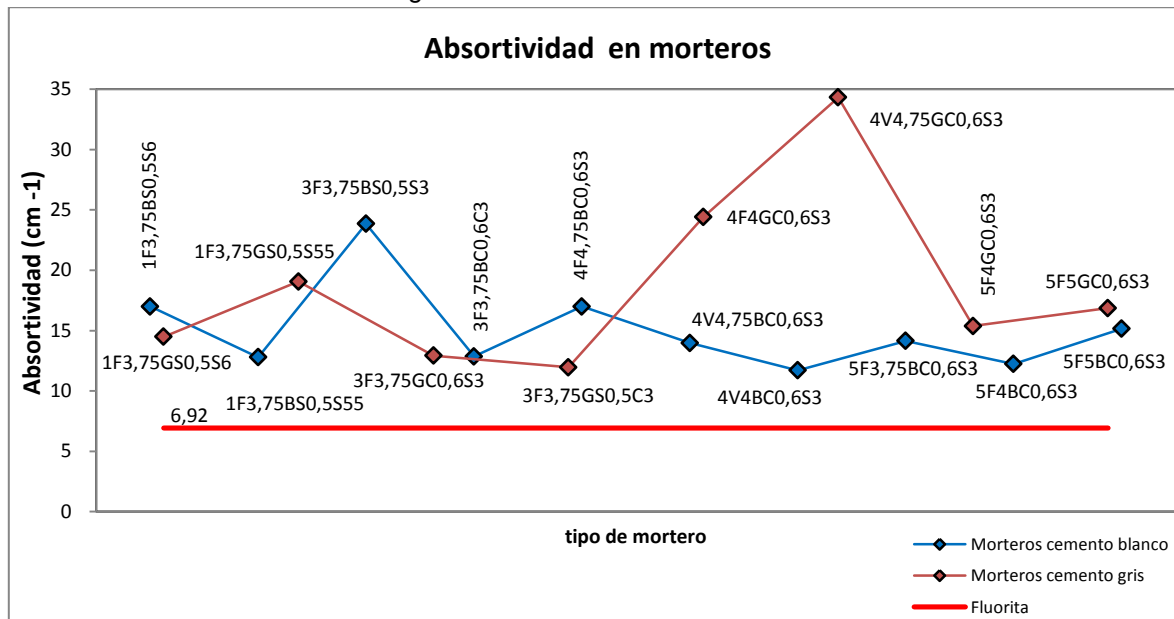


Debido a su baja pérdida en la intensidad de luz visible por reflexión, podría aventurarse a sugerir que los morteros con mayor posibilidad de transmitir luz son los preparados con cemento gris, pero, debe incluirse la medida de absorción para poder determinar con certeza la cantidad de luz realmente transmitida.

En la Figura 23 se presenta la absorptividad, es decir, **kc**, para morteros preparados con cemento blanco y con cemento gris, en comparación con el de la fluorita. Allí puede verse claramente que la fluorita tiene una absorptividad menor que la de los morteros, es decir que la cantidad de luz visible que es absorbida por la fluorita es menor que la que absorbe los morteros, lo que implica mayores valores de transmitancia.

Ahora bien, en promedio, los resultados de absorción son similares para morteros preparados con cemento gris o con cemento blanco.

Figura 23. Absortividad en morteros



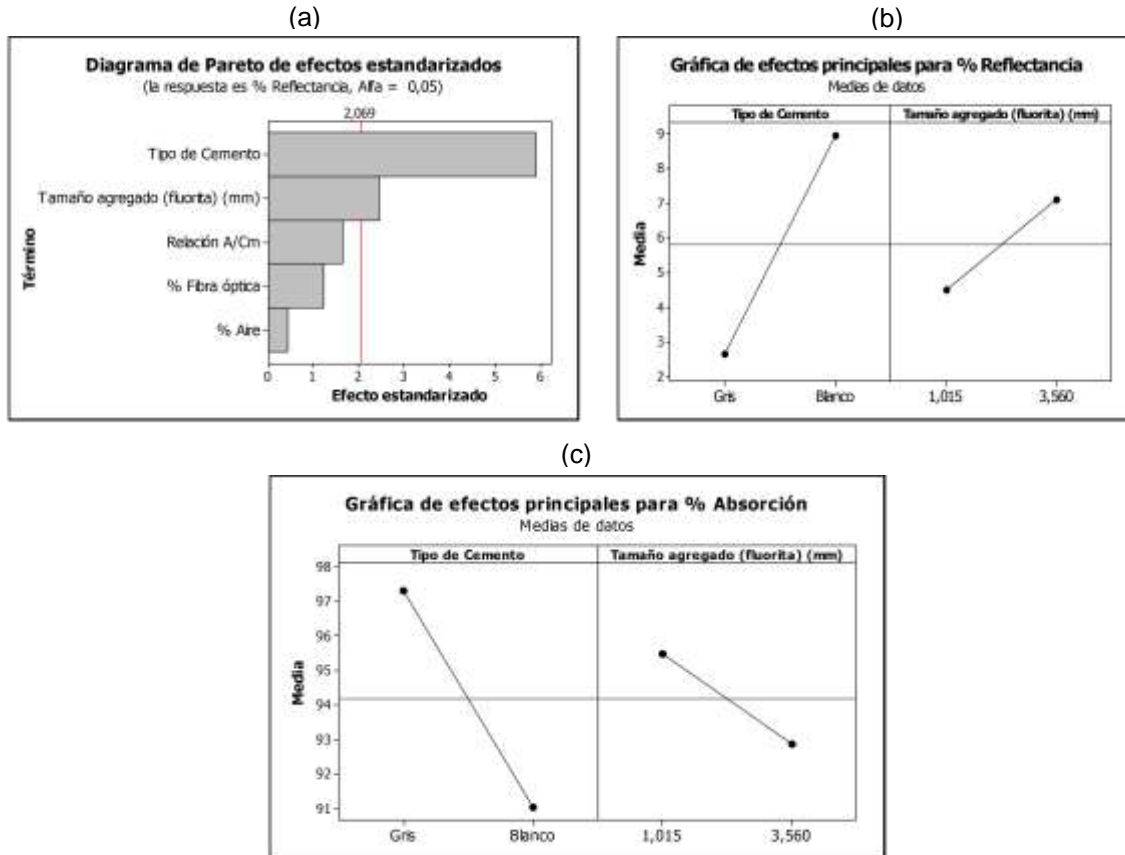
7.4 Evaluación de los factores controlables en los morteros

La primera etapa del diseño experimental para morteros incluyó cinco factores controlables: tipo de cemento (blanco y gris), tamaño del agregado (promedio 1,015 mm y 3,560 mm), relación a/c (0,5 y 0,6), porcentaje de fibra óptica (con y sin) e inductor de aire (con y sin). En la Figura 24 se presenta los efectos de los factores sobre el porcentaje de reflexión y absorción. El diagrama de Pareto ⁽¹¹⁾ indica que existen dos factores con mayor grado de incidencia sobre la variable de respuesta que son, tipo de cemento y tamaño del agregado y en las gráficas de efectos principales la pendiente de la recta indica la influencia del nivel de cada factor en la variable de respuesta ⁽¹²⁾.

De nuevo, aquí el factor más influyente es el tipo de cemento; el tamaño del agregado tiene una influencia menor y los demás una influencia no significativa. Los morteros con cemento blanco tienen un valor cercano al 9% por pérdidas de reflexión (ver Figura 24 (b)), similares a los de la fluorita, mientras que los morteros con cemento gris tienen una pérdida por reflexión cercana al 2,5%. A su vez, las mezclas con mayor tamaño de agregado tienen mayor reflectancia, pero las pendientes de las líneas, en la Figura 24 (b), indica que su influencia es menor que la del tipo de cemento.

En términos de absorción, la Figura 24 (c) arroja, con claridad meridiana, que a pesar de los valores similares medidos para todos los morteros, los morteros preparados con cemento blanco absorben alrededor del 91% mientras que los morteros con cemento gris poco más del 97%. La diferencia debe estar en el valor del coeficiente de extinción, k , y de la concentración del absorbente, c , ya que las condiciones del espesor, b , son semejantes. En otras palabras, los resultados indican que los morteros con cemento gris presentan un k mayor que los de cemento blanco.

Figura 24. Diagrama de Pareto y gráfica de efectos principales etapa I, %reflexión y %absorción



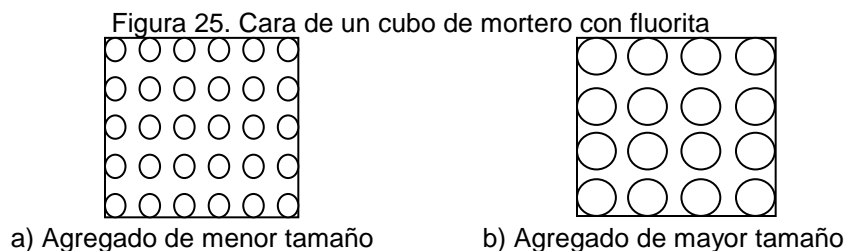
Fuente. Minitab 16 Statistical Software

Los morteros preparados con cemento blanco presenta mayor porcentaje de reflexión pero menor absorción, en otras palabras, estos morteros tiene mayor índice de refracción y menor coeficiente de extinción que los morteros preparados con cemento gris. Estas diferencias se deben al comportamiento de los átomos de cada uno de los materiales ante la presencia de los fotones del haz de luz que incide sobre ellos. Por ejemplo, un bajo índice de refracción revela que el haz de luz viaja con una mayor velocidad dentro del material respecto a un elemento con un índice de refracción mayor, lo que indica una baja modificación en la ubicación de la nube de electrones respecto al núcleo de los átomos del material ^{(10) (34)}. Así se presente una leve modificación a la nube de electrones, esto hace que se produzca una disminución en la velocidad del haz de luz con respecto al vacío ^{(9) (10) (34)}.

Del diagrama de Pareto, otro factor que afecta significativamente las variables de respuesta es el tamaño del agregado puesto que, como ya se ha señalado, mientras menor sea el tamaño del agregado, mayor número de cambios de medio sufrirá el haz de luz que atraviese el sólido.

Para ilustrar lo anterior, recuérdese que la Ecuación 34 presenta seis factores, el primero, I_o es la intensidad del haz de luz visible inicial o de incidencia; el segundo y el tercero, $(1 - R_{EE})(1 - R_{ES})$, se refieren a las pérdidas por reflexión al exterior del material, es decir, cuando el haz de luz se refleja en la superficie por donde entra al sólido y cuando el haz de luz se refleja en la cara por la cual sale del sólido; El cuarto, $(1 - R_{ij})^{N-1}$, indica las pérdidas por reflexión en las caras internas del material es decir, cuando el haz de luz viaja dentro del material y se encuentra con las fronteras pasta-fluorita; por último, el quinto y el sexto, $(e^{-(kcb)_i})^x (e^{-(kcb)_j})^y$, representan las pérdidas por absorción causadas por la pasta y por la fluorita, respectivamente.

El porcentaje de reflectancia que se observa en la gráfica de efectos principales de la Figura 24 es la causada en las caras exteriores de las muestras de mortero. Las pérdidas por reflexión producidas en la parte interior del mortero hacen parte del porcentaje de absorción. Dicho esto, lo que muestra la gráfica es que los morteros preparados con un menor tamaño de agregado presentan menores pérdidas por reflexión, en las caras exteriores, que los morteros preparados con un mayor tamaño de agregado. Ésto se explica considerando que cuando el haz de luz *choca* contra la cara de mortero preparado con agregado de menor tamaño se encuentra con una superficie conformada por mayor área de pasta, como se muestra en la Figura 25 a. A medida que el tamaño del agregado aumenta el haz de luz se encuentra con mayor área de fluorita, como se ve en la Figura 25 b, que tiene mayores pérdidas por reflexión que la pasta, resultando en un aumento en las pérdidas por reflexión⁽⁶⁾.



A pesar que cuando se usa un agregado de menor tamaño las pérdidas por reflexión son menores, la transmitancia no necesariamente aumenta puesto que, en términos de absorción, tal como se esperaba, las pérdidas son mayores a medida que el tamaño de agregado disminuye.

La gráfica de efectos principales para porcentaje de absorción, de la Figura 24, muestra como un incremento en el tamaño del agregado hace que las pérdidas por absorción disminuyan. Para los morteros ensayados, al pasar de un tamaño de agregado, de 1,0 mm a 3,6 mm se redujo la absorción de 95% a 92%. Volviendo a la Ecuación 34 el producto $(1 - R_{ij})^{N-1} (e^{-(kcb)_i})^x (e^{-(kcb)_j})^y$ representa todas las pérdidas que se llevan a cabo en el interior del mortero; para un agregado de menor tamaño se incrementa el número de fronteras entre un material y otro (pasta de cemento y fluorita) lo que hace que el factor $(1 - R_{ij})^{N-1}$ aumente y, además se aumenta el volumen de pasta que absorbe más energía que la fluorita. Similarmente, al aumentar el tamaño del agregado se disminuye el número de fronteras y, simultáneamente, aumenta el volumen de fluorita, lo que

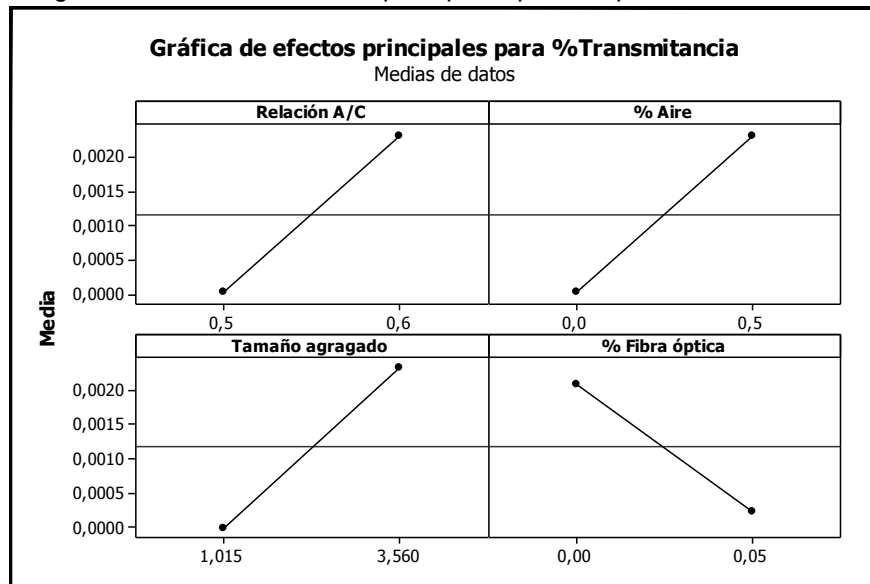
reduce la cantidad de energía absorbida, ya que la fluorita, como ya se explicó, es un material con menor coeficiente de extinción que la pasta.

La transmitancia depende pues de la reflexión y de la absorción que, a su vez, de acuerdo con lo anterior, dependen del tipo de cemento y del tamaño del agregado. Ahora bien, ya se expuso que la absorción no sólo depende del material absorbente sino de su concentración en el sólido que, en el caso de morteros, se expresa en término de la relación agua/cemento (a/c).

Además de lo anterior, en el presente estudio se incluyeron dos variables más, que son la incorporación de aire y la adición de fibra óptica. La transmitancia también se afecta con la incorporación de aire en la mezcla porque tiene el efecto de disminuir el volumen neto de pasta por unidad de volumen de mortero ⁽²⁾ reemplazándolo con aire, material de menor índice de refracción que la pasta ⁽⁸⁾; así mismo, al adicionar fibra óptica se reduce también el volumen de pasta, reemplazándolo por un material muy eficiente para transmitir la luz.

En la Figura 26 puede apreciarse que, efectivamente, a medida que aumenta la relación a/c disminuye la concentración del absorbente, aumentando la transmitancia; similarmente, que al incorporar aire se aumenta la transmitancia, en comparación con el mortero sin aire incorporado; al aumentar el tamaño del agregado aumenta la transmitancia puesto que, como ya se ilustró, disminuye la absorción; sin embargo, no se presenta el efecto esperado al adicionar fibra óptica puesto que se muestra que al adicionar la fibra disminuye la transmitancia, quizá porque no se adicionó en un porcentaje suficiente o porque no se alinearon las fibras en el sentido de la transmisión del haz de luz, o por ambas razones.

Figura 26. Gráfica de efectos principales para etapa I, %transmitancia



Fuente. Minitab 16 Statistical Software

El diagrama de Pareto de la Figura 24, había ya mostrado que las variables más significativas son el tipo de cemento y el tamaño del agregado. En la Tabla 10 se presentan los valores de p-value ⁽¹¹⁾

⁽⁶⁰⁾ para todas las variables. Los valores por encima de la significancia predefinida ($\alpha = 0,05$) representan variables poco influyentes.

Tabla 10. Valore de p-value para las variables controlables

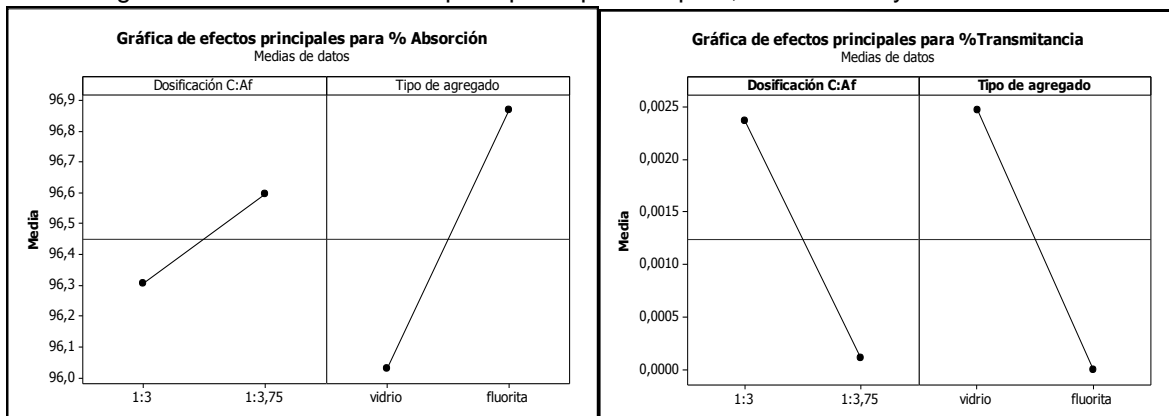
Variables controlables	p-value
Tipo de cemento	0,015
Tamaño del agregado	0,032
Relación agua/cemento	0,057
Porcentaje de fibra	0,063
Porcentaje de aire	0,069

Fuente. Minitab 16 Statistical Software

Para mejorar la transmitancia, aparte de las variables ya consideradas, podrían incluirse otras variables más; por ejemplo, podría modificarse la concentración del cemento variando la proporción cemento:agregado o podría también cambiarse la fluorita por vidrio.

En la Figura 27 se presentan los resultados al involucrar estas variables, en comparación con las obtenidas para el tipo de cemento. Puede observarse que la variación en la relación cemento:agregado y el cambio de fluorita por vidrio, en el tipo de agregado, influye en el porcentaje de absorción. Sin embargo, estos mismos factores producen un mayor efecto significativo sobre la transmitancia: si se varía la relación cemento:agregado de 1:3.75 a 1:3, la transmitancia aumenta cerca de 15 veces; al cambiar la fluorita por vidrio, la transmitancia aumenta en una cantidad similar.

Figura 27. Gráfica de efectos principales para etapa II, %absorción y %transmitancia



Fuente. Minitab 16 Statistical Software

El resultado anterior se explica por un efecto doble. Cuando se varía la proporción de cemento:agregado de 1:3.75 a 1:3, se disminuye la cantidad de cemento pero también se aumenta la proporción de fluorita, con respecto al volumen total, como se aprecia en la Tabla 11.

Tabla 11. Relaciones cemento:agregado

	Partes por peso		Total
	Cemento	Agregado	
Proporciones	1	3.75	4.75
Porcentajes del total	21%	79%	100%
Proporciones	1	3	4
Porcentajes del total	25%	75%	100%

Por una parte, la pasta de cemento tiene mayor absorción que la fluorita o el vidrio y al disminuir su cantidad disminuye su efecto negativo y, por el otro lado, al disminuir la proporción de cemento aumenta la de agregado, sea fluorita o vidrio, y aumenta la transmitancia.

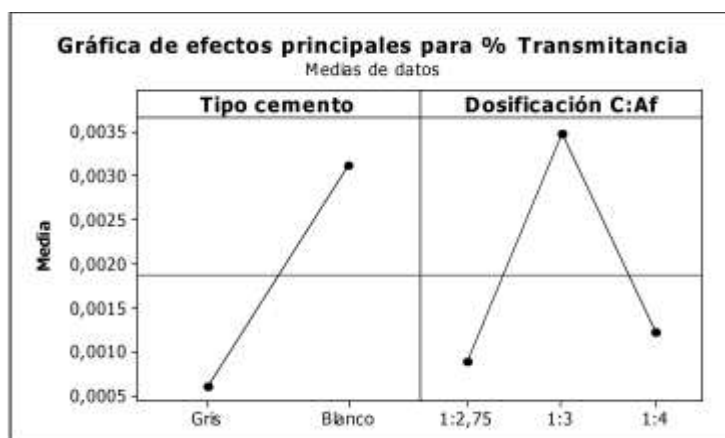
Por otra parte, la fluorita presenta mayor grado de absorción y mayor índice de refracción, y por lo tanto menor transmitancia que el vidrio ⁽⁷⁾. De hecho, mientras que el porcentaje de transmitancia para el vidrio es del 92% ⁽³⁴⁾ para la fluorita está alrededor del 7%. De tal manera, es de esperarse que las mezclas con vidrio como agregado tengan mayor transmitancia que las mezclas con fluorita.

Pese a todo lo anterior, la pérdida de energía durante el paso por el interior del mortero no obedece exclusivamente al efecto de absorción en cada uno de los materiales, pasta de cemento y agregado, sino que también hay pérdidas por reflexión en la superficie de interfaz entre la pasta y el agregado o entre el agregado y la pasta.

Así las cosas, cuando se aumenta el volumen total de agregado en un volumen determinado, reduciendo el volumen de la pasta, se aumenta la cantidad neta de partículas de agregado y, por lo tanto, se aumentan las superficies de contacto, lo que implica que aumenta la reflexión. Para verificar este efecto se incluyó en el diseño experimental dos proporciones adicionales cemento:agregado, 1:2.75 y 1:4.

Los resultados se presentan en la Figura 28. El efecto que tiene el tipo de cemento se mantiene, es decir, que las mezclas con cemento blanco tienen mejor transmitancia que las mezclas con cemento gris.

Figura 28. Gráfica de efectos principales para parte III, %transmitancia

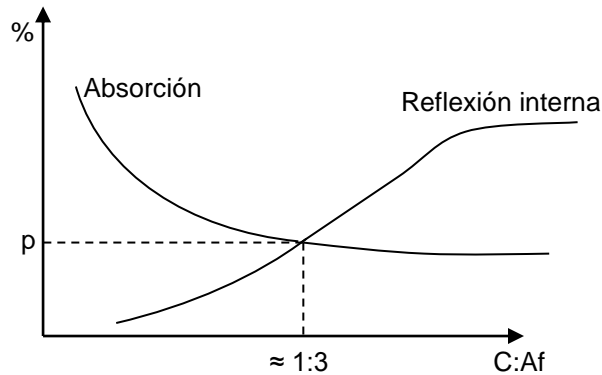


Fuente. Minitab 16 Statistical Software

La Figura 28 muestra un punto máximo para el factor dosificación cemento:agregado, lo que quiere decir que existe un punto donde los valores para las pérdidas por reflexión interna y por absorción son mínimos, o lo que es lo mismo, la cantidad de agregado se puede ir aumentando hasta encontrar que el producto de $(1 - R_{ij})^{N-1}(e^{-(kcb)_i})^x(e^{-(kcb)_j})^y$ sea mínimo. Existe un valor óptimo en la cantidad de fluorita que debe tener el mortero donde el producto de las pérdidas por reflexión interna y por absorción produzca la máxima transmitancia, un desplazamiento lateral respecto a este punto puede presentar bajas pérdidas por reflexión interna pero altas pérdidas por absorción, o lo contrario.

En la Figura 29 se presenta esquemáticamente lo observado; en el eje de las abscisas se encuentra la relación cemento:agregado y en el de ordenadas el porcentaje de pérdidas, ya sean por reflexión interna o por absorción. El punto p es donde el producto $(1 - R_{ij})^{N-1}(e^{-(kcb)_i})^x(e^{-(kcb)_j})^y$ es mínimo. El moverse hacia la derecha del eje de las abscisas con relación a un punto cercano a 1:3 indica un aumento en la cantidad de agregado dentro del mortero que conduce a una reducción en las pérdidas por absorción pero un aumento en las pérdidas por reflexión interna, su producto daría como resultado un valor mayor a p reduciendo el porcentaje de transmitancia en el mortero. Si el desplazamiento es hacia el lado izquierdo se disminuye la cantidad de fluorita en el mortero lo que implica mayores pérdidas por absorción y menores por reflexión interna, su producto debe dar mayor que p reduciendo el porcentaje de transmitancia.

Figura 29. Esquema de la variación en la reflexión y absorción



La disminución en el porcentaje de absorción al aumentar la relación cemento:agregado, se debe a una disminución en el espesor del espacio entre los agregados reduciendo el espesor de la pasta. Si aumento la relación cemento:agregado, por encima del punto óptimo, a pesar de que reduzco los espesores de la pasta, aumento la cantidad de fronteras internas pasta-agregado, lo que genera mayores pérdidas por reflexión interna.

En la Tabla 12 se resume el nivel de los factores controlables que mayor impacto tuvieron sobre la variable de respuesta: Porcentaje de transmitancia.

Tabla 12. Resumen de los niveles de mejor resultado en transmitancia para los morteros

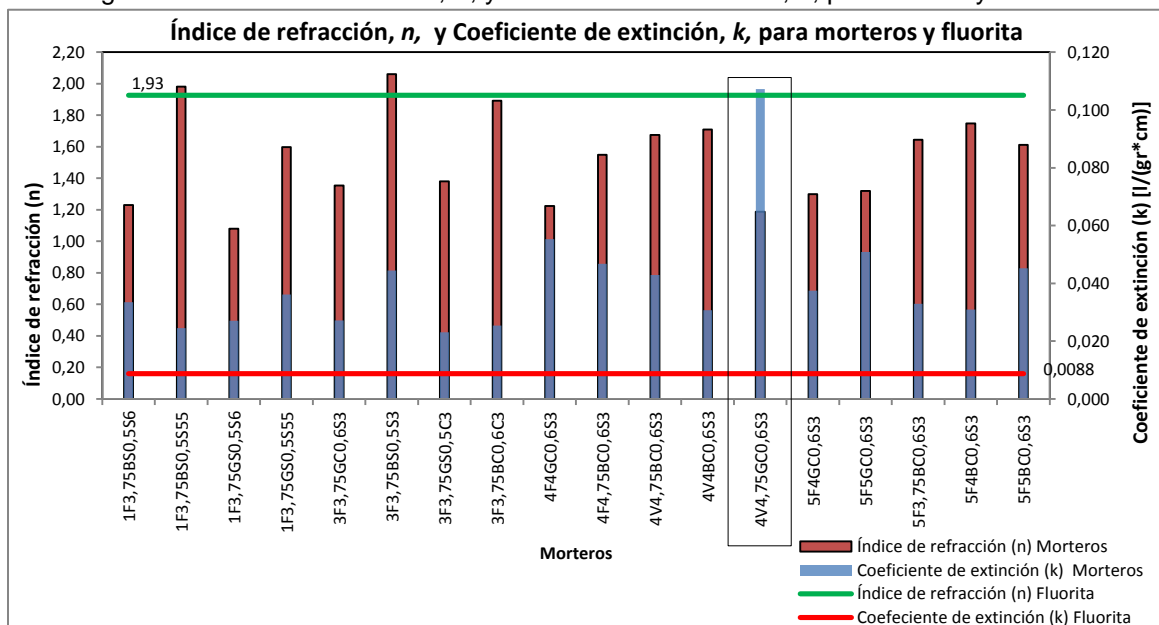
Factores controlables	Valores	
	Bajo	Alto
Tamaño del agregado (por tamiz)	-	x
Tipo de cemento	-	x
Relación a/c morteros	-	x
% aire (en peso)	-	x
% fibra óptica (en peso)	-	
Tipo de agregado	x	x
Relación Cemento:Agregado	Óptimo	
Espesor de la muestra (mm)	Menor a 10 mm	

7.5 Índice de refracción, n , y Coeficiente de extinción, k , en morteros y fluorita

De lo expuesto hasta el momento, las dos variables que verifican el comportamiento de los morteros frente a un haz de luz visible son el índice de refracción (Reflexión) y el coeficiente de extinción (Absorción). Los resultados para todos los morteros que presentaron transmitancia se presentan en la Figura 30 y en la Tabla 13. La fluorita presenta uno de los valores más elevados de índice de refracción (1,93).

El coeficiente de extinción de la fluorita con relación a los demás morteros* es mucho menor, razón por la cual su porcentaje de transmitancia es mayor que la de los morteros; por ejemplo: Uno de los morteros que presenta bajas pérdidas por reflexión es 4V4,75GC0,6S3 pero su comportamiento frente al porcentaje de absorción es el más alto, con un coeficiente de extinción de 0,11 l/(g*cm).

Figura 30. Índice de refracción, n , y coeficiente de extinción, k , para fluorita y morteros



* No es posible calcular directamente el k del mortero porque no se conoce con certeza el número de reflexiones internas, aquí se supuso que el coeficiente de extinción del mortero está controlado por el del cemento, toda vez que es cercano al 100%; de tal manera, el coeficiente de extinción del mortero está basado en el k del cemento.

Tabla 13. Índice de refracción y coeficiente de extinción en morteros

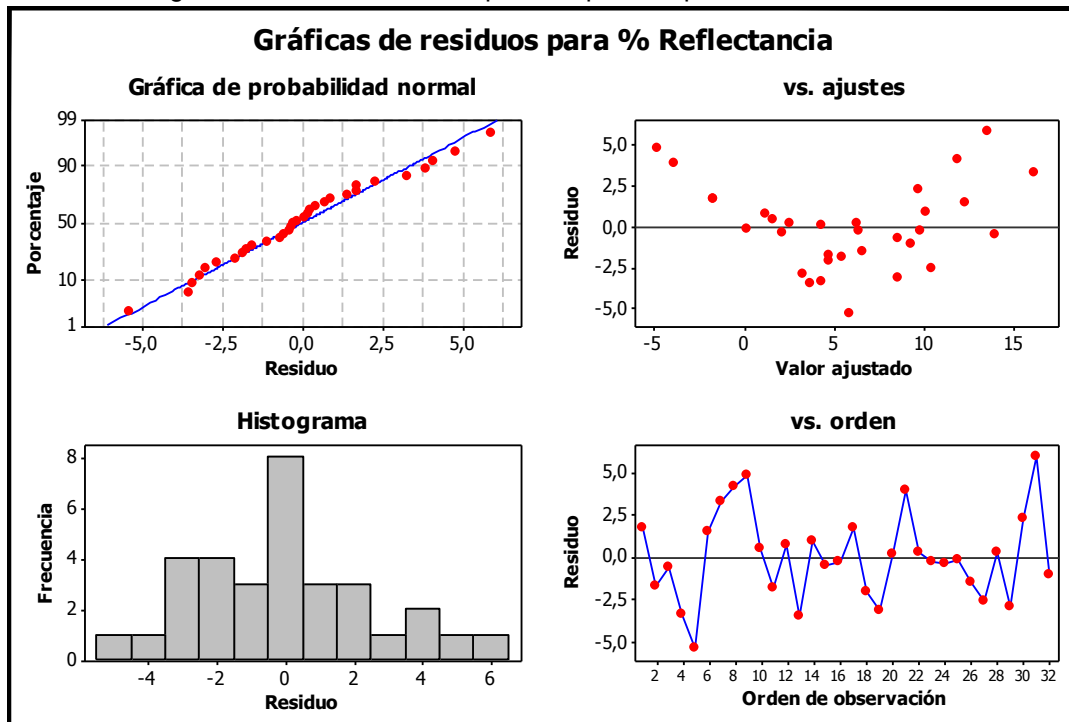
Nomenclatura del mortero	Índice de refracción	Coficiente de extinción [l/(g×cm)]
1F3,75BS0,5S6	1,23	0,033
1F3,75BS0,5S55	1,98	0,024
1F3,75GS0,5S6	1,08	0,027
1F3,75GS0,5S55	1,60	0,036
3F3,75GC0,6S3	1,35	0,027
3F3,75BS0,5S3	2,06	0,044
3F3,75GS0,5C3	1,38	0,023
3F3,75BC0,6C3	1,89	0,025
4F4GC0,6S3	1,22	0,055
4F4,75BC0,6S3	1,55	0,047
4V4,75BC0,6S3	1,67	0,043
4V4BC0,6S3	1,71	0,031
4V4,75GC0,6S3	1,19	0,107
FLUORITA	1,93	0,00878
5F4GC0,6S3	1,30	0,037
5F5GC0,6S3	1,32	0,051
5F3,75BC0,6S3	1,65	0,033
5F4BC0,6S3	1,75	0,031
5F5BC0,6S3	1,61	0,045

Los resultados muestran que la fluorita utilizada tiene un índice de refracción de 1.93 y un coeficiente de extinción de $0.01 \left[\frac{\text{litro}}{\text{g} \times \text{cm}} \right]$, lo que indica que para un espesor promedio de 3.56 mm, que corresponde al mayor tamaño de agregado utilizado, las pérdidas por reflexión en el haz de luz visible incidente son del 10% y el porcentaje de transmitancia es del 7%. La cantidad de luz visible absorbida por este material corresponde al 83%. Los morteros presentan un índice de refracción alrededor de 1.7, esto quiere decir que la luz es 1.7 veces más rápida en el vacío que en el mortero, o, mientras la velocidad de la luz en el vacío es de 1 unidad en el mortero es de 0.588 unidades. Este índice de refracción conduce a encontrar una Reflectividad, R , de 0.0465 que indica pérdidas en el haz de luz visible incidente por reflexión de 4.65%, y si el porcentaje de transmitancia puede llegar a estar cerca de 0,038% la absorción en estos materiales es alrededor de 95.31%.

7.6 Verificación de supuestos del modelo experimental

Para simplificar, se decide presentar la verificación de supuestos del modelo experimental para una sola de las variables de respuesta y un solo experimento. La razón es que los demás modelos junto con sus variables presentan un comportamiento similar, lo que quiere decir que los 3 supuestos ⁽¹²⁾: *Normalidad, varianza constante e independencia* se cumplieron para los diseños experimentales realizados. El modelo a analizar es el correspondiente a la etapa tres por presentar la mayor cantidad de factores controlables evaluados, independientemente de la variable de respuesta que se escoja los resultados son muy parecidos, para este caso se utiliza el porcentaje de Reflectancia. En la Figura 31 la gráfica de probabilidad normal muestra un patrón lineal lo que indica que los residuos están normalmente distribuidos. El histograma muestra una distribución asimétrica mostrando la no existencia de valores atípicos y altas dispersiones. Las otras dos gráficas muestran una aparente dispersión de los residuos y del orden de las observaciones alrededor de cero, lo que indica igualdad de varianzas en los tratamientos e independencia en la toma de los datos ^{(12) (61)}.

Figura 31. Verificación de supuestos para etapa tres, %reflectancia



Fuente. Minitab 16 Statistical Software

8 CONCLUSIONES

8.1 Conclusiones generales

De acuerdo con los resultados obtenidos, para un espesor determinado, la pasta de cemento es el material que presenta la mayor pérdida de energía de un haz de luz; el uso de fluorita como agregado permite mejorar las propiedades de transmitancia; si se utiliza vidrio como agregado se obtiene mayor transmitancia que con fluorita.

Pese a lo anterior, para obtener un aumento significativo en la transmitancia de morteros utilizando agregado translúcido debe utilizarse espesores pequeños de sólido, inferiores a 10 mm, lo que limita sensiblemente las aplicaciones prácticas de morteros traslúcidos con base en agregado traslúcido.

El diseño de experimentos es una herramienta muy poderosa para lograr una correcta evaluación de los factores que inciden sobre las variables de respuesta ya que permiten valorar varios factores al mismo tiempo y disminuir, cuando es posible, la cantidad de unidades experimentales.

El diseño de experimento permitió obtener resultados con residuos normalmente distribuidos, sin valores atípicos ni altas dispersiones, bajo igualdad de varianzas e independencia en la toma de los datos.

8.2 Conclusiones particulares

- a. La variación de las propiedades de reflexión, absorción y transmitancia en los morteros depende de dos factores principales: el tamaño del agregado y el tipo de cemento.
- b. Si el tamaño del agregado aumenta la reflexión aumenta y la absorción disminuye.
- c. Un mortero con cemento gris tiene menor reflexión y mayor absorción que uno con cemento blanco.
- d. Para lograr transmitir luz visible en un mortero se debe garantizar grandes tamaños de agregado de fluorita o vidrio y cemento blanco, siempre y cuando se garantice una relación cemento:agregado óptima.
- e. La concentración del absorbente depende de la relación a/c, entre mayor sea menor absorción.
- f. Los morteros que mejor comportamiento presentaron frente a la transmisión de luz visible fueron aquellos de menor absorción óptica a pesar de tener mayores pérdidas por reflexión.
- g. Existe un valor óptimo para relación cemento:agregado con el cual la transmitancia aumenta a pesar del aumento en las reflexiones internas; este valor está alrededor de 1:3, por peso.
- h. La fluorita, tiene mayor índice de refracción y menor coeficiente de extinción que los morteros; lo que resulta en un porcentaje de transmitancia mucho más alto que en éstos.
- i. El vidrio aunque tiene un coeficiente de extinción mucho menor que el de la fluorita, su aporte en términos de transmitancia dentro de un mortero se ve opacado por la pasta de cemento.
- j. La fibra de óptica no tiene un efecto significativo en la transmitancia en los porcentajes utilizados sin alinearse con el haz de luz.
- k. La inclusión de aire tiene un efecto positivo en la transmitancia, pero de menor significancia que el tipo de cemento, el tipo y tamaño del agregado.

9 RECOMENDACIONES

Las investigaciones futuras deberían concentrar su mayor esfuerzo en reducir el porcentaje de absorción que produce el cemento; la modificación de la banda prohibida de energía de este material podría llevar a una reducción del coeficiente de extinción.

Como la inclusión de aire resulta en mejoras de la transmitancia, se recomienda controlar la variable de porosidad del mortero.

10 ANEXO (REGISTRO FOTOGRÁFICO)

REGISTRO FOTOGRÁFICO	DESCRIPCIÓN	FECHA	NÚMERO
	<p>Fluoruro de calcio (fluorita) como sale de la mina, se nota la presencia de óxido de hierro, se eliminó mediante la inmersión en ácido oxálico. El tamaño de este material se encuentra entre 15 y 30 cm.</p>	<p>27 ABRIL 2011</p>	<p>Foto 3.A</p>
	<p>Fluorita lista para ser tritura, se observa una gran disminución en la presencia de óxido de hierro, es importante tener en cuenta que la presencia de este tipo de óxido es un factor influyente en la evaluación de las propiedades ópticas.</p>	<p>4 MAYO 2011</p>	<p>Foto 3.B</p>
	<p>Trituración de la fluorita en una trituradora de quijadas y de rodillos, tamaños desde tamiz número 3/8, 4, 8, 16, 20, 30, 40, 50 y 100. En promedio se trituraron 60 Kg.</p>	<p>20 MAYO 2011</p>	<p>Foto 3.C</p>

REGISTRO FOTOGRÁFICO	DESCRIPCIÓN	FECHA	NÚMERO
	<p>Construcción del modelo experimental, adecuación en las fuentes de luz visible de la fibra óptica, se utilizaron 3 fuentes, una se utilizó como prueba y las otras dos directamente en el modelo.</p>	<p>1 JULIO 2011</p>	<p>Foto 6.D</p>
	<p>Vaciado 1, morteros de prueba, los materiales usados son: Cemento blanco y fluorita, se prepararon 3 cubos de 5 cm.</p>	<p>12 JULIO 2011</p>	<p>Foto 6.E</p>
	<p>Modelo experimental, se observa las dos fuentes, la fibra óptica y la muestra. Como la fibra óptica se encuentra al lado izquierdo y la fuente prendida está al lado derecho, se está midiendo transmitancia.</p>	<p>18 JULIO 2011</p>	<p>Foto 6.F</p>

REGISTRO FOTOGRÁFICO	DESCRIPCIÓN	FECHA	NÚMERO
	<p>Aparatos utilizados para encontrar la densidad y la absorción en el agregado. Probeta de 500 ml, molde metálico en forma de tronco cono, pisón, guantes y palustre.</p>	<p>29 JULIO 2011</p>	<p>Foto 9.G</p>
	<p>Horno utilizado para eliminar la humedad del material y alcanzar peso seco.</p>	<p>29 JULIO 2011</p>	<p>Foto 9.H</p>
	<p>Proceso de amasado de una mezcla para la preparación de los morteros.</p>	<p>31 OCTUBRE 2011</p>	<p>Foto 9.I</p>

REGISTRO FOTOGRÁFICO	DESCRIPCIÓN	FECHA	NÚMERO
	<p>Vicat eléctrico utilizado para encontrar la consistencia de la pasta de cemento.</p>	<p>1 NOVIEMBRE 2011</p>	<p>Foto 12.J</p>
	<p>Proceso de corte de los cubos de mortero con el objetivo de lograr los diferentes espesores y ser sometidos al espectrofotómetro.</p>	<p>20 NOVIEMBRE 2011</p>	<p>Foto 12.K</p>
	<p>Dos tipos de morteros que permiten el paso de la luz, su espesor es aproximadamente de 8mm después de corte, los materiales usados son: Fluorita, vidrio, incorporador de aire, y cemento blanco.</p>	<p>28 NOVIEMBRE 2011</p>	<p>Foto 12.L</p>

1. **Ministerio de Minas y Energía. Unidad de Planeación Minero Energética-UPME.** *Boletín Estadístico de Minas y Energía 2003-2008.* Bogotá D.C : Ministerio de Minas y Energía, 2010. págs. Pág. 61-62. 9789588363035.
2. **Farbiarz, J.** *Hormigón el Material, principios básicos de la tecnología del hormigón.* 1° Edición. Medellín : Centro de publicaciones Universidad Nacional de Colombia, Septiembre 2001. págs. 7-20 a 7-23.
3. **Comisión Asesora Permanente para el Régimen de Construcciones Sismo Resistentes (Creada por la ley 400 de 1997).** *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10.* Bogotá D.C. : s.n., Enero 2010. Título C.
4. *Diseño de un Concreto Translucido.* **Gutierrez Sosa, Joel, Galvan Cazerres, Sergio Omar y Landa Aviles, Guillermo.** Medellín (Antioquia) : s.n., 2005. III Congreso Internacional de Materiales, Simposio Materia 2005.
5. *Properties of Translucent Concrete.* **Mohamed, N, y otros.** [ed.] CSCE 2007 Annual General Meeting & Conference - Canadian Society for Civil Engineering. Yellowknife, Northwest Territories/ Yellowknife, Territoires du nord-ouest : s.n., 2007. Vol. 2, págs. 651-660.
6. *Research and Development of Plastic Optical Fiber Based Smart Transparent Concrete.* **Zhou, Z y otros.** [ed.] Norbert G. Meyendorf et al. Proc. of SPIE. 2009, Smart Sensor Phenomena, Technology, Networks, and Systems., Vol. 7293.
7. **Hurbult, C. S. y otros.** *Manual de mineralogía de Dana.* 3ra. s.l. : Editorial Reverté S.A., 1992. págs. 279-314.
8. **Askeland, D. R.** *Ciencia e Ingeniería de los Materiales.* s.l. : International Thomson S. A., 2004. págs. 449-507.
9. **Callister, W. D. Jr.** *Introducción a la ciencia e Ingeniería de los Materiales.* s.l. : Editorial Reverté S.A., 1995. pág. Capítulos 19 a 22.
10. **Wert., C. A. y Thomson, R. M.** *“Física de los Sólidos”.* Madrid (España) : Mc Graw-Hill Book Company., 1967. pág. Pág. 206 a 213 y 301 a 321.
11. **Montgomery, Douglas C.** *Design and Analysis of experiments.* New York : John Wiley & SONS, INC., 2001. págs. 326 - 336. Fifth Edition .
12. **Pulido, Humberto Gutiérrez.** *Análisis y diseño de experimentos.* México, D.F. : McGraw-Hill/Interamericana Editores S.A. de C.V., 2008. págs. 100-285.
13. *X-ray Architecture. An idea hatched in the research department of OMA promises to transform the nature of buildings. Inventor Bill Price conjures up the ultimate material: translucent concrete.* **Shulman, Ken.** New York : Bellerophon Publications, april 2001, Metropilismag.com.

14. **Rynd, Chase W.** *National Building Museum Annual Report 2006*. Washington D.C. : National Building Museum, 2006. Pág. 6.
15. The Concrete Society, your global concrete community. *Translucent concrete*. [En línea] [Citado el: 12 de Octubre de 2010.]
http://www.concrete.org.uk/services/fingertips_nuggets.asp?cmd=display&id=758.
16. *Work-and-Play Fabric, Translucent Concrete*. **Jaeger, D.** No. 28, 13 de July de 2009, Chemical & Engineering News, Vol. 87, pág. 40.
17. *Development and Application of Translucent Concrete*. **Coelho, Francisco Carvalho de Arruda.** Bogotá D.C : CIM 2011 - VI Congreso Internacional de Materiales, Noviembre 2011, 2011.
18. *Transparent concrete is encouraging architects to rethink how they design buildings*. **The Economist**. 8240, Houston (Texas) : The Economist, 22 de Septiembre de 2001, Vol. 360, pág. 6 1/2p.
19. *La Noche de la Ciudad Translúcida*. **Florsheim, Shimrit.** No. 12, Santiago de Chile : Publicación electrónica editada por el Departamento de Urbanismo, F.A.U de la Universidad de Chile, Junio de 2005, Revista de Urbanismo. ISSN 0717-5051.
20. **Katja, Nau.** *Making Something Heavy Light*. Hattenbergstrase (Germany) : Schott AG, 2003. págs. 28-30. 104.
21. **Cruz Ruiz, Katy.** *Concretos Translúcidos*. México D. F. : Universidad Nacional Autónoma de México, programa único de especializaciones de ingeniería, proyecto terminal. Ciudad Universitaria, 2008.
22. *Concreto Translucido: Viendo a traves del Material*. **Asocreto**. 94, Bogotá D.C : Asocreto, Mayo-Junio de 2009, Noticreto, Vols. Mayo-Junio, págs. 20-24.
23. *Hard Light. Concrete has gone from boring to beautiful. A translucent variety gives it another lease on life*. **Galadza, S.** No.1, Noviembre de 2004, VNU Business Publications, Vol. Contract 46.
24. *Creative Peek-A-Boo concrete*. **Semioli, J W.** No. 7, 1 de July de 2004, Concrete International, Vol. 6, págs. 94-95.
25. *Desing drives materials innovation*. **Emerging Technology**. London, United Kingdom : Emerging Technology, March de 2010, Vol. 42, pág. 40.
26. **Losonczi, A.** European Patent Application. *Building Block Comprising Light Transmitting Fibres and a Method for Producing the Same*. [En línea] Mayo de 2009. [Citado el: 11 de Octubre de 2010.]
<http://v3.espacenet.com/publicationDetails/originalDocument?CC=EP&NR=1532325B1&KC=B1&FT=D&date=20090506&DB=&locale>.
27. —. World Intellectual Property. *Translucent Building Block and a Method for Manufacturing the same*. [En línea] 15 de January de 2009. [Citado el: 2 de Octubre de 2010.]
<http://www.wipo.int/pctdb/en/wo.jsp?WO=2009007765..>

28. **Halm, Jürgen.** *Method for producing moulded bricks with fibres.* US2009/0200703A1 United States, 15 de Febrero de 2007. Method.
29. *Using Nano-Optics to Control the Phase of Light.* **Yvonne, Carls Powell.** Massachusetts : OSA, The Optical Society, 2008, Scatterings News, Vol. 7, pág. 6.
30. **Metropolitana, Órgano Informativo de la Universidad Autónoma.** *Semanario de LA UAM.* México D.F. : Comunicación universitaria, 2006. Vol. XIII Núm 17.
31. **Gálvan Cázares, Sergio Omar y Sosa Gutiérrez, Joel.** *Formulation for Obtaining a Translucent Concrete Mixture. 06812686.1* European, 17 de Octubre de 2006.
32. **Weisskopf, Víctor F.** *Cómo interactúa la luz con la materia.* s.l. : Scientific American, Sep. 1968.
33. **Kittel., C.** *"Introducción a la Física del estado Solido".* 2º Edición. s.l. : Editorial Reverté, S.A., 1975. pág. Capítulo 18.
34. **Navarro, José María Fernandez.** *El Vidrio.* Segunda edición. Madrid : Concejo Superior de Investigaciones Científicas Fundación Centro Nacional del Vidrio, 1991. págs. 452-554.
35. **Mata-Mendez, O.** *Revista Mexicana de Física 38. Relación de Fresnel y teorema de conservación de la energía para un haz electromagnético.* [En línea] 1992. [Citado el: 9 de Septiembre de 2010.] No.5 Pág. 852-856. http://rmf.fciencias.unam.mx/pdf/rmf/38/5/38_5_850.pdf.
36. *Beer's Law and the Optimum Transmittance in Absorption Measurements.* **Hughes, Harold K.** Issue 9, s.l. : Applied Optics, 1963, Vol. Vol. 2, págs. pp. 937-945.
37. **Ocean Optics, Inc.** Operating Manual and User's Guide CHEM2000 and CHEM2000-UV-VIS Miniature Fiber Optic Spectrophotometers. 380 Main Street Dunedin : s.n.
38. **(ICONTEC), Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.** NTC 174, Concretos. Especificaciones de los Agregados para Concretos. Bogotá D.C. : Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), 2009.
39. **Fernandez, C. M.** *Hormigón.* 8º Edición. Madrid (España) : Colegio de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, 2007. págs. 107-147.
40. **Salazar, Alejandro.** *Síntesis de la tecnología del concreto. Una manera de entender a los materiales compuestos.* 4ta. Cali, Colombia : Corporación construir, Septiembre 2002.
41. **Barbour, Christine, Era, Tate y Lyons, James.** *Concept Home Principles - Alternative Basic Materials.* New York : Department of Housing and Urban Development's Office of Policy Development and Research, 2005. págs. 8-10.
42. *Análisis comparativo entre algunas materias primas minerales nacionales e importadas utilizadas en la industria del cemento.* **Tobón, Jorge y Montoya, Laura.** No. 19, Medellín : s.n., Noviembre de 2006, Boletín de ciencias de la tierra, págs. 57-72. ISSN 0120-3630.

43. *Efectos de algunas adiciones minerales Colombianas en la fabricación del clinker para cemento Portland I.* **Baena, Oscar Jaime Restrepo, Tobón, Jorge Iván y Baena, Olga Isabel Resprepo.** 152, Medellín : s.n., Julio de 2007, Dyna, págs. 263-276.
44. **International, ASTM.** ASTM C260/C260M -10. Standard Specification for Air-Entraining Admixtures for Concrete. West Conshohocken : s.n., 2010.
45. —. ASTM C494/C494M - 11. Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete. West Conshohocken : s.n., 2011.
46. **(ICONTEC), Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.** NTC 1547. Vidrio plano. Definiciones y Clasificación. Bogotá : ICONTEC, 1984.
47. **International, ASTM.** ASTM E1175 - 09. Standard Test Method for Determining Solar or Photopic Reflectance, Transmittance, and Absorptance of Materials Using a Large Diameter Integrating Sphere. West Conshohocken, Pennsylvania 19428-2959, United States : s.n., 1987 (Reapproved 2009).
48. —. ASTM E971 - 11. Standard Practice for Calculation of Photometric Transmittance and Reflectance of Materials to Solar Radiation. West Conshohocken, Pennsylvania 19428-2959, United States : s.n., 2011.
49. **(ICONTEC), Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.** NTC 2631, Energía solar. Cálculo de transmitancia y reflectancia fotométricas en materiales sometidos a radiación solar. Bogotá, D.C. : Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), 2006.
50. **International, ASTM.** ASTM C109/C109M - 08. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens). West Conshohocken, Pennsylvania 19428-2959, United States : s.n., 2008.
51. **(ICONTEC), Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.** NTC 220, Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm ó 50,8 mm de lado. Bogotá, D.C. : Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, (ICONTEC), 2004.
52. **International, ASTM.** ASTM C305 - 11. Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency. West Conshohocken, Pennsylvania 19428-2959, United States. : s.n., 2011.
53. **(ICONTEC), Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.** NTC112, Mezcla mecánica de pastas de cemento hidráulico y morteros de consistencia plástica. s.l. : Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), 2009.
54. **International, ASTM.** ASTM C128 - 07a. Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate. West Conshohocken Pennsylvania 19428-2959, United States : s.n., 2007.
55. **(ICONTEC), Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.** NTC 237, Ingeniería Civil y Arquitectura. Método para determinar la densidad y la absorción del agregado fino. Bogotá, D.C. : Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC) , 2001.

56. **International, ASTM.** ASTM C1437 - 07. Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar. West Conshohocken, Pennsylvania 19428-2959, United States : s.n., 2007.
57. **(ICONTEC), Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.** NTC 5784, Método para determinar la fluidez de morteros de cemento hidráulico. s.l. : Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), 2010.
58. **International, ASTM.** ASTM C187 - 11e1. Standard Test Method for Amount of Water Required for Normal Consistency of Hydraulic Cement Paste. West Conshohocken, Pennsylvania 19428-2959, United States : s.n., 2011.
59. **(ICONTEC), Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.** NTC 110, Método para determinar la consistencia normal del cemento hidráulico. s.l. : Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), 2008.
60. **Kuehl, Robert O.** *Diseño de Experimentos*. México D.F. : International Thomson Editores, S.A de C.V., 2001. págs. 1-36.
61. **Inc, Minitab.** Tutorial Statistical Software. *Analizar diseño factorial* . 2010.