

USO DE ESPECTROSCOPIA INFRARROJA CON TRANSFORMADA DE FOURIER Y PHENEL ESTUDIO DE CONGLOMERANTES PARA MORTEROS MIXTOS

Yurany A. Hoyos, Ligia M. Vélez

Yurany Andrea Hoyos Tejada

Orcid: 0000-0003-0949-1507

Convocatoria Joven Investigador 2019-Semillero Materiales para la construcción sana
Línea de investigación Materiales y Tecnologías de la construcción MYTEC Grupo de
investigación ALQUIMIA. Instituto Tecnológico Metropolitano ITM. Medellín, Colombia
Correo:yuranyhoyos238673@correo.itm.edu.co

Ligia María Vélez Moreno

Orcid: 0000-0002-9979-2014

Docente Facultad de Ciencias Exactas y Aplicadas, Departamento de Ciencias ambientales y de
la Construcción Semillero Materiales para la construcción sana
Línea de investigación Materiales y Tecnologías de la construcción MYTEC Grupo de
investigación ALQUIMIA. Instituto Tecnológico Metropolitano ITM. Medellín, Colombia
Correo: ligiavelez@itm.edu.co

RESUMEN

Este trabajo presenta los avances de investigación en conglomerantes para morteros mixtos, se desarrolla una importante búsqueda de materiales conglomerantes nuevos y modificados para su empleo en trabajos de restauración del Patrimonio Cultural, teniendo en cuenta una metodología experimental, con cuatro conglomerantes principales (cemento gris Portland, cal grasa, Hidroxiapatita y yeso escayola); los cuales fueron sometidos a pruebas de gravedad específica, espectroscopía infrarroja (IR) y toma de pH para evaluar la existencia de carbonatación; y luego así comparar los resultados obtenidos. Se concluye: el mortero con cemento gris, presenta una alta concentración de hidróxido de calcio, se produce considerable alcalinidad, con un pH igual a 12.5. El dióxido de carbono, responsable de la carbonatación, reduce el pH del mortero, despasivando el acero facilitando el ataque de sustancias. Contrario a lo anterior, en el Yeso Escayola el pico 455 cm^{-1} del IR, conlleva a la deformación de ferrita en austenita; lo que se refleja en la solubilidad de la mezcla, lo cual, aumenta el aislamiento térmico. Y también, el componente funcional de sulfatos amorfos logrando mayor compacidad del mortero mixto, El pH en la cal grasa de 12,74 no representa acidez y convierte el mortero en un material durable.

Palabras claves: espectroscopía infrarroja, hidratación del cemento, PH, gravedad específica

SUMMARY

This work presents the advances of research in conglomerates for mixed mortars, an important search of new and modified conglomerating materials is developed for its use in works of restoration of the Cultural Heritage, taking into account an experimental methodology, with four main conglomerates (Portland gray cement), fat lime, hydroxyapatite and gypsum plaster); which were subjected to tests of specific gravity, infrared spectroscopy (IR) and pH measurement to evaluate the existence of carbonation; and then compare the results obtained. It is concluded: the mortar with gray cement, has a high concentration of calcium hydroxide, considerable alkalinity is produced, with a pH equal to 12.5. The carbon dioxide, responsible for carbonation, reduces the pH of the mortar, depassivating the steel facilitating the attack of substances. Contrary to the foregoing, in gypsum plaster the peak 455 cm^{-1} of the IR, leads to the deformation of ferrite in austenite; what is reflected in the solubility of the mixture, which increases the thermal insulation. And also, the functional component of amorphous sulfates achieving greater compactness of the mixed mortar, the pH in the fat lime of 12.74 does not represent acidity and turns the mortar into a durable material.

Keywords: infrared spectroscopy, cement hydration, PH, specific gravity

RESUMO

Este artigo apresenta os avanços da pesquisa em ligantes para argamassas mistas, desenvolve uma importante descoberta de novos materiais conglomerado e modificados para utilização em Patrimônio Cultural trabalho de restauração, considerando uma metodologia experimental, com quatro conglomerados principais (cinza cimento Portland gordo, lima, hidroxiapatita e gesso); que foram submetidos a testes de gravidade específica, espectroscopia de infravermelho (IV) e medição de pH para avaliar a existência de carbonatação; e depois comparar os resultados obtidos. Conclui-se: a argamassa com cimento cinza, possui alta concentração de hidróxido de cálcio, produz-se alcalinidade considerável, com pH igual a 12,5. O dióxido de carbono, responsável pela carbonatação, reduz o pH da argamassa, depassivando o aço facilitando o ataque de substâncias. Ao contrário do exposto, em Gesso Gesso o pico 455 cm^{-1} da IR, leva à deformação da ferrita na austenita; o que se reflete na solubilidade da mistura, o que aumenta o isolamento térmico. E também, o componente funcional dos sulfatos amorfos que alcançam maior compactação da argamassa mista. O pH na cal gordo de 12,74 não representa a acidez e transforma a argamassa em um material durável.

Palavras chave: espectroscopia no infravermelho, hidratação do cimento, PH, gravidade específica

INTRODUCCIÓN

La Espectroscopia Infrarroja (IR) tiene su aplicación más inmediata en el análisis cualitativo y cuantitativo de los grupos funcionales presentes en el material. Las áreas de aplicación pueden ser: la determinación del progreso en la hidratación, las reacciones con distintos aditivos, la cristalinidad de los productos de hidratación y la identificación de las distintas fases¹.

Actualmente se desarrolla una importante búsqueda de materiales conglomerantes nuevos y modificados para su empleo en trabajos de restauración del Patrimonio Cultural^[2,3]. El propósito de estos materiales es buscar un sustituto adecuado a los morteros de cal que compensen su lento fraguado y su baja resistencia mecánica, aunque tampoco se trata de incorporar un mortero puro de cemento, debido a su ya comprobada mala compatibilidad con los materiales antiguos (mortero y piedra), originando, por ejemplo, alteraciones debidas a su elevado contenido en sales solubles⁴.

En palabras de Jose Alejandro RM, el cemento en varias civilizaciones anteriores como egipcios y griegos, hicieron “prácticas” sobre la creación de cemento; fueron los Romanos los que le dieron un uso masivo y crearon una fórmula básica hasta ahora conocida: el cemento puzolánico (nombre dado porque la fuente de extracción del material volcánico se encontraba cerca de la ciudad de Puzzuoli en el Golfo de Nápoles, Italia). Ellos mezclaban cal (disponible en Italia en grandes cantidades) con cenizas volcánicas (a granel por esas latitudes), obteniendo un material de condiciones superiores a los obtenidos anteriormente debido a sus condiciones de manejabilidad y resistencia; esto se debe también, valgan verdades, a las condiciones propias de los materiales del suelo Italiano: la sílice activa y la alúmina que se encuentran en las cenizas son particulares en esa zona (muy volcánica por cierto) y le otorgan al material su grado de resistencia.

En el horno, el cemento cambia de fases, en donde aparecen: óxido de calcio, Dióxido de silíceo, óxido de aluminio y óxido de hierro; paralelamente secado y deshidratación, descarbonatación y reacción entre fases solidas (aluminato, ferrita y belita,) y reacciones en fases liquida (clinkerización, alitas) y reacciones de enfriamiento para su producción en análisis químico con pérdidas de 0.2% en calcinación.

La carbonatación en el concreto es la pérdida de pH que ocurre cuando el dióxido de carbono atmosférico reacciona con la humedad dentro de los poros del concreto, y convierte el hidróxido de calcio con alto pH a carbonato de calcio, que tiene un pH más neutral. ¿Por qué es un problema la pérdida de pH en el concreto? El concreto, con su ambiente altamente alcalino (rango de pH de 12 a 13), protege al acero de refuerzo incorporado contra la corrosión. Esta protección se logra por la formación de una capa de óxido, pasivo sobre la superficie del acero que permanece estable en el ambiente altamente alcalino. Esta es la misma capa pasivadora que atacan los cloruros cuando alcanzan el acero de refuerzo expuesto a sales descongelantes y ambientes marinos.⁵

El proceso de hidratación en las tres fases anhidras del cemento se identifica claramente, las celitas (primeras en hidratarse) lo hacen a través de una aureola de reacción que implica cambios

de forma cristalina, aunque no de manera muy evidente, ya que de acuerdo a Neville (1995) “Probablemente la forma estable del aluminato cálcico hidratado que exista en la pasta de cemento hidratada sea el cristal cúbico C_3AH_6 , pero es posible que primero cristalice el C_4AH_12 hexagonal y después cambie a la forma cúbica”. La alita -C3S- el mineral con la segunda tasa de hidratación más alta presenta un cambio cristalino drástico pasando a ser un gel prácticamente amorfo.⁶

El uso de morteros mixtos, basados en mezclas de cal y cemento, puede disminuir las desventajas de cada tipo de mortero, manteniendo los aspectos favorables de cada uno de ellos (los morteros de cal presentan alta compatibilidad con los materiales antiguos, y tienen bajas cantidades de sales solubles, mientras que los morteros de cemento ofrecen altas resistencias mecánicas y cortos tiempos de fraguado).^[2,3]

PRINCIPIOS BÁSICOS DE FUNCIONAMIENTO DEL IR

La espectroscopia IR es el método por el cual se estudia la absorción o emisión de energía radiante originada por la interacción entre la radiación electromagnética y el material en estudio. La IR se basa en que las moléculas tienen la posibilidad de rotar y vibrar a distintas frecuencias (modos normales vibracionales). O sea que, una molécula puede absorber la energía de fotones en el rango energético de IR en el caso en que exista una diferencia en el momento bipolar de la molécula mientras ocurre un movimiento vibracional rotacional y cuando la frecuencia asociada con la radiación resuena con el movimiento vibracional.

Los componentes de los enlaces químicos tienen movimientos vibracionales con frecuencias naturales dentro del rango de frecuencias del infrarrojo (Tabla 1).⁷

Tabla 1. Longitud de onda para distintos rangos en el infrarrojo.

Infrarrojo	cm^{-1}
Lejano	10 a 650
Medio (IR)	650 a 4000
Próximo	4000 a 12500

Existen modos vibracionales que inducen oscilaciones que pueden entrar en resonancia con un haz de IR. Esto produce un intercambio de energía entre el haz y las moléculas constituyentes. Existe un comportamiento característico para un enlace con un tipo atómico, un entorno químico y una concentración de enlaces determinadas. Se puede decir entonces, que en un espectro infrarrojo se pueden manifestar bandas asociadas a prácticamente todos los compuestos moleculares. Cada una de estas bandas correspondería a un movimiento de vibración de uno de los enlaces dentro de la molécula. Se sostiene entonces que el conjunto constituye la huella dactilar del compuesto. Cada compuesto tendrá entonces un comportamiento particular frente a un haz de infrarrojos, en esto se basa la eficacia de la IR.

LA HIDRATACIÓN DEL CEMENTO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO

La hidratación del cemento es un proceso físico-químico bastante complejo. La hidratación

ocurre desde que el cemento entra en contacto con el agua, cambiando de un estado fluido a uno sólido. Es fundamental conocer los mecanismos de hidratación para conocer las propiedades finales del mortero.

La hidratación es un proceso que cambia a medida que pasa el tiempo. Se empieza a contar desde que el cemento entra en contacto con el agua. Las etapas de hidratación pueden dividirse en cinco. La primera etapa es la de disolución, en la que el cemento se mezcla con el agua. Dura aproximadamente una hora. Durante esta etapa se forma $\text{Ca}(\text{OH})_2$, etringita y comienza la hidratación del silicato tricálcico.

Durante la segunda etapa, después de la primera hora y hasta las tres horas y media, aproximadamente, los productos de hidratación crecen hasta estar en contacto los unos con los otros, se forma silicato de calcio hidratado, más etringita y $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

La tercera etapa se conoce también como fraguado de la pasta. Sucede entre las tres horas y media y las siete horas. Estando los productos de hidratación en contacto los unos con los otros, la pasta pierde movilidad, perdiendo también su comportamiento plástico y comenzando a comportarse como un sólido. Durante este período domina la hidratación del silicato tricálcico observándose una importante producción de silicato de calcio hidratado y $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Cuando la pasta ya fraguó, comienza en endurecimiento de la misma. Se termina de consumir el yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) Presente en el cemento y la etringita se transforma en monosulfatos, que tienen mayor densidad. Mientras tanto el silicato tricálcico continúa hidratándose aumentando el contenido de silicato de calcio hidratado en la pasta endurecida. Endurecida la pasta, comienza un proceso difusivo, por lo que el proceso desacelera. La hidratación continúa, pero de forma más lenta.⁸

GRAVEDAD ESPECÍFICA

La gravedad específica, también conocida como peso específico o densidad relativa, consiste en la relación o cociente que existe entre la densidad de una sustancia y la densidad de otra sustancia de referencia (es usual que en este caso se utilice agua).⁹

La fórmula para calcular el Peso Específico es la siguiente:

$$P.E = W / (V_f - V_i)$$

El Peso de una sustancia se define como el peso por unidad de volumen. Se calcula al dividir el peso de la sustancia entre el volumen que esta ocupa. En el sistema métrico decimal, se mide en kilogramo por metro cúbico (kg/m^3). En el Sistema Internacional de Unidades, en newton por metro cúbico (N/m^3)¹⁰.

EL pH EN LOS CONCRETOS Y MORTEROS

En el concreto que no contiene acero de refuerzo, la carbonatación generalmente es un proceso de pocas consecuencias, sin embargo, en el concreto reforzado, este proceso químico aparentemente inofensivo, avanza lenta y progresivamente desde la superficie expuesta del concreto, encontrando dentro de la masa de concreto al acero de refuerzo generando una posible corrosión del acero.

Para entender este fenómeno recorro a la definición que hace Rick Montani de este fenómeno: La carbonatación en el concreto es la pérdida de pH que ocurre cuando el dióxido de carbono

atmosférico reacciona con la humedad dentro de los poros del concreto y convierte el hidróxido de calcio (con alto pH) a carbonato de calcio, el cual tiene un pH más neutral.

¿Por qué es un problema la pérdida de pH? Porque el concreto, con su ambiente altamente alcalino (rango de pH de 12 a 13), protege al acero de refuerzo contra la corrosión. Esta protección se logra por la formación de una capa de óxido pasivo sobre la superficie del acero que permanece estable en el ambiente altamente alcalino.

Cuando la carbonatación empieza a experimentar la profundidad del refuerzo, la capa de óxido protectora y pasivadora deja de ser estable. A este nivel de pH (por debajo de 9), es posible que empiece la corrosión, dando como resultado un agrietamiento y fisuramiento del concreto.

Aunque la difusión del dióxido de carbono a través de los poros de concreto pueda requerir años antes de que ocurra el daño por corrosión, puede ser devastadora y muy costosa de reparar.⁵

FACTORES QUE AFECTAN LA CARBONATACIÓN

El proceso de carbonatación se ve afectado por variables naturales que se encuentran en el concreto. El aumento de carbonatación depende, en gran medida, del contenido de humedad y de la permeabilidad del concreto. Para que haya carbonatación, debe haber humedad.

La reacción de carbonatación avanza más rápidamente cuando la humedad relativa en el concreto se encuentra entre el 50 y el 60 por ciento. Si la humedad es baja, significa que no hay suficiente agua en los poros del concreto para que se disuelvan cantidades significativas de hidróxido de calcio.

Otro asunto fundamental es que el concreto permeable se carbonatará rápidamente: una forma de sumar años de protección contra la carbonatación es el seguimiento de prácticas estándar para producir concretos de baja permeabilidad: estas incluyen relaciones bajas de agua/cemento, compactación apropiada por vibración, uso de puzolanas como cenizas volantes o humo de sílice, y un curado del concreto apropiado.

Todas estas prácticas reducen la permeabilidad del concreto y hacen menos probable que el dióxido de carbono se difunda a través del concreto.¹¹

RESULTADOS DE pH EN CONGLOMERANTES PARA MORTEROS MIXTOS.

Tabla 2. Análisis de pH y gravedad específica en los conglomerantes.		
CEMENTANTES	pH	Ge
Cemento gris portland	12.5	2.8
Cal grasa	12.74	2.45
Yeso escayola	10.37	3.9
Hidroxiapatita	12.34	3.1

OBTENCION DE LA HIDROXIAPATITA

En los últimos años la síntesis de compuestos de fosfato de calcio ha generado un gran interés, puesto que tiene importantes aplicaciones biomédicas. Por ejemplo, la Hidroxiapatita $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$ se utiliza para reparar o reconstruir tejido óseo dañado o enfermo, ya que su

composición y estructura química se asemeja a la fase mineral contenida en el esqueleto, como cementante óseo; esta similitud favorece la formación de enlaces con el hueso, siendo por consiguiente un material biocompatible, bioactivo y bioabsorbible.¹²

Se sintetizo HAP por método hidrotermal, a partir de Nitrato de calcio/ Fosfato de amonio manteniendo la relación:



De acuerdo con el peso molecular y la pureza de los reactivos se calcularon las cantidades estequiométricas para sintetizar un total de 5 gramos de HAP pura. Para la preparación del nitrato de calcio se utilizó un beaker de 100 ml, se añadieron 11 g del reactivo en 49,8 ml de agua desionizada y se dejó agitando a 200 rpm durante 10 min.

En la preparación del fosfato de amonio se siguieron los mismos parámetros al procedimiento anterior, añadiendo 3,98 g del reactivo en 30,2 ml de agua desionizada. Posteriormente, se le adiciona la solución del fosfato de amonio a la solución de nitrato de calcio constantemente y se deja agitando a temperatura ambiente durante 30 min. Se para la agitación, inmediatamente se procede a verter el contenido en un reactor para sintetizar la HAP por ruta hidrotermal y se lleva a la estufa por 3 días a una temperatura de 120 °C. Después, se saca la muestra, se centrifuga con la ayuda de la Thermo scientific (1000 rpm – 30 min- 10°C) y se deja secando en el horno en crisol a 600 °C durante 24 horas.¹³

ANALISIS DE USO DE ESPECTROSCOPIA INFRARROJA

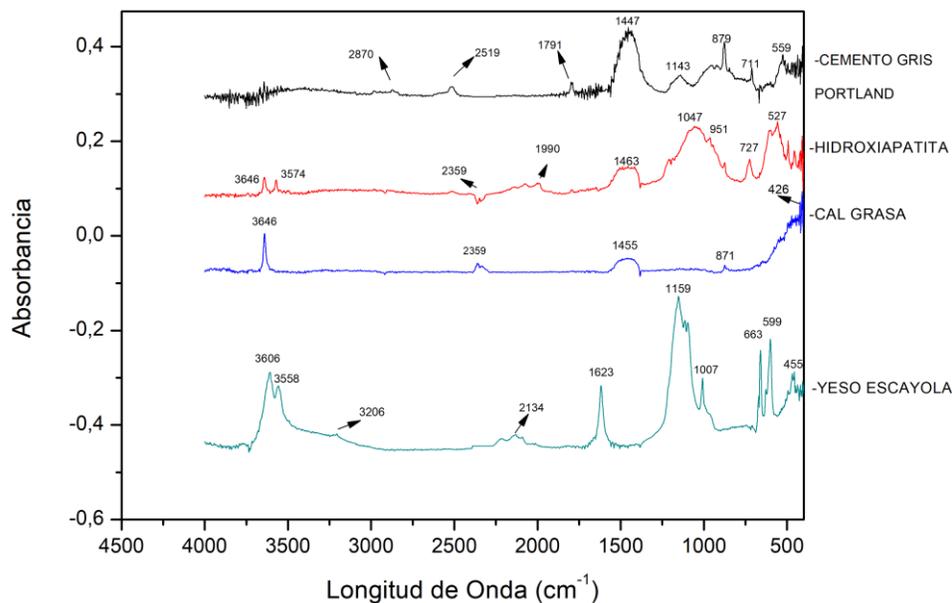


Fig.1. Absorción [% A] *versus* longitud de onda [cm⁻¹].
Grafica obtenida del ensayo de Cristalografía en Rayos X para determinar porcentajes de

composición. Fuente: Laboratorio de Química y Caracterización. Instituto para la Investigación e Innovación en Ciencia y Tecnología de Materiales, Parque I, marzo 18 de 2019.

Cuando se hace un análisis IR se mide la intensidad del haz antes (I_0) y después (I) de que interaccione con la muestra. El resultado se expresa en función de la frecuencia de la luz incidente¹⁴

Tabla 3, 4, 5, 6. Picos observados en cementantes para morteros mixtos

Longitudes de onda [cm^{-1}]	Asignación posible
CEMENTO GRIS PORTLAND	
599	Presencia de hollín
711	V_4 de CO_3
879	V_2 of CO_3 ácido carbónico
1142	vibración de SO_4
1447	CO_3 carbonatos del ácido carbónico
1791	CaCO_3 carbonato de calcio
2519	CaCO_3 carbonato de calcio
2870	CaCO_3 carbonato de calcio
3646	Ca(OH)_2 hidróxido de calcio
HIDROXIAPATITA	
527	Carbonatos y acetonas
727	V_4 de CO_3
951	Recristalización dinámica en aleaciones monofásicas
1047	sílice polimerizado
1463	CO_3
1990	Presencia de K_2SO_4
2359	Actividad catalítica multicomponente en la síntesis de HAP
3574	OH
3646	Ca(OH)_2
CAL GRASA	
426	Formación de aluminio silicatos
871	V_2 de CO_3
1455	CO_3
2359	Actividad catalítica multicomponente
3646	Ca(OH)_2

YESO ESCAYOLA	Asignación posible
455	Formación de austenita
599	Presencia de hollín
663	V ₄ de SiO ₄
1007	sílice polimerizada
1159	V ₃ ofSO ₄ sulfatos amorfos
1623	V ₂ de agua en los sulfatos
2134	Refleja la hidratación de los aluminio silicatos presentes
3206	Muestra la energía dispersiva de los rayos X en presencia de Zinc y Cobre, refiriéndose a la transmitancia espectral de los rayos UV
3558	V ₃ de agua en el yeso
3606	Sulfatos de calcio anhidro

Siendo V₁, V₂, V₃ y V₄ distintos modos vibracionales.

AGRADECIMIENTOS

Las autoras agradecen a Dios, a la Virgen y a las familias por el constante apoyo y acompañamiento incondicional para el presente trabajo. Así mismo a los laboratorios de materiales de construcción, Química y Parque i del ITM por su paciencia; a los compañeros y profesores del semillero de construcción sana de la línea de investigación, Materiales y Tecnologías de la construcción MYTEC y al CTi.

CONCLUSIONES

Respecto al Blaine, refiere a la gravedad específica del cemento de 3.0-3.1. Sin embargo, al realizar la práctica de gravedades específicas, da como resultado una gravedad de 2,8, lo que indica disminución de la calidad del material; la finura es una propiedad muy importante del cemento y por ello tiene que someterse a un control cuidadoso, especialmente de los fabricantes. Las partículas de cemento, por ser muy pequeñas, no pueden ser separadas por mallas. Por esta razón, el grado de finura del cemento se mide por otro tipo de métodos y parámetros, el parámetro de medición de la finura del cemento es el área específica, expresada como el área de la superficie total en cm² por gramo de cemento (o m² por Kg de cemento). El área especificada en cm² /g significa la cantidad de superficie que un gramo de partículas de cemento puede cubrir. Así, un cemento con área específica mayor será más fino que otro con área específica menor.

El avance de la hidratación en el mortero con cemento gris, se caracteriza por un desplazamiento de los picos asociados a los silicatos a mayores números de onda, de 926 a 970 cm⁻¹, debido a la reacción de la SiO₄²⁻ durante la formación de C-S-H. Las bandas asociadas con el mortero se pueden detectar a 1740 cm⁻¹. Éstas se presentan debido a la vibración del enlace del carbonilo

(C=O) del grupo funcional. También, el calor de hidratación liberado durante el proceso de hidratación produce microfisuras caracterizadas por formarse siguiendo el contorno del cristal que reacciona, estas fisuras generan un plano de discontinuidad que interfiere en el correcto desarrollo de la capa de gel encargada de la adherencia y por tanto, en el correcto desarrollo de las resistencias, además, estas fisuras se convierten en lugares adecuados para la formación de etringita tardía, cuyos efectos son nocivos por generar expansión y ruptura.

El componente funcional del hidróxido de carbono en el cemento gris portland, Hidroxiapatita y la cal grasa los ubica como materia prima óptica en las industrias de metalurgia, petroquímica, alimentaria, cosmética, purificadora de agua, fertilizantes, e industria de la construcción. Además, el mortero presenta una alta concentración de hidróxido de calcio, se produce considerable alcalinidad, con un $\text{pH} \geq 12.5$. El dióxido de carbono, responsable de la carbonatación, reduce el pH del mortero, despasivando el acero facilitando el ataque de sustancias.

En el Yeso Escayola el pico 455 cm^{-1} del IR, conlleva a la deformación de ferrita en austenita; lo que se refleja en la solubilidad de la mezcla. La solubilidad de la mezcla aumenta el aislamiento térmico. Y también, al componente funcional de sulfatos amorfos se logra mayor compacidad del mortero mixto y se corrobora en la saturación de las unidades de mampostería.

El pH en la cal grasa nos indica que es de 12,74 lo que no representa acidez y convierte el mortero en un material durable; y para el cemento gris es de 12,5, el carbonato del ácido carbónico presente en este no representa acidez sino la alcalinidad para potenciar en pH esperado en las mezclas de mortero mixto; lo que se refiere a la durabilidad del mortero mixto.

BIBLIOGRAFÍA

1. Piqué, T., & Vázquez, A. USO DE ESPECTROSCOPIA INFRARROJA CON TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR) EN EL ESTUDIO DE LA HIDRATACIÓN DEL CEMENTO. *CONCRETO Y CEMENTO . INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO*, VOL 3 NUM 2., 62-71. México ene. /jun. 2012.
2. J. Lanás, J.L. Pérez Bernal, M.A. Bello, J.I. Alvarez, *Mechanical properties of natural hydraulic lime-based mortars*, *Cem. Concr. Res.* 34 (2004) 2191-2201.
3. J. Lanás, J.I. Alvarez, *Masonry repair lime-based mortars: Factors affecting the mechanical behaviour*, *Cem. Concr. Res.*, 33 (2003) 1867-1876.
4. P. Degryse, J. Elsen, M. Waelkens, *Study of ancient mortars from Salassos (Turkey) in view of their conservation*, *Cem Concr. Res.* 32 (2002) 1457-1563.
5. R. Montani, *La carbonatación, el enemigo olvidado del concreto*. Instituto Mexicano del Cemento y Del concreto, A.C. *Revista Construcción y Tecnología*. Diciembre 2000.
6. Giraldo M, M., & Tobon, J. (2006). EVOLUCIÓN MINERALÓGICA DEL CEMENTO PORTLAND DURANTE EL PROCESO DE HIDRATACIÓN. *Dyna*, Año 73, Nro. 148, pp. 69-81. , 69-81.
7. D. R. C. Catalina Gómez Hoyos, "Evaluación del curado de resinas fenólicas tipo novolaca modificadas con lignina por espectroscopia infrarroja", *Universidad Pontificia Bolivariana*, 2008.
8. IR, SEM and Vicat techniques", en *Cement and Concrete Research*, vol. 39, núm. 5, pp. 433-439, May 2009.

9. Briceño, *Gravedad Específica: Fórmula y Unidades, Cómo Calcularla. Lifeder. Mayo de 2018.*
10. J. M, *Método de ensayo para determinar el peso específico del cemento hidráulico. Ingeniera civil. Octubre de 2008.*
11. J. D. Osorio, *Carbonatación del concreto: ¿Cómo detectarla? 360 en concreto. Junio 2012.*
12. J.A Rivera; G. Fetter; P. Bosch, *Efecto del pH en la síntesis de hidroxiapatita en presencia de microondas, Materia (Rio J.) vol.15 no.4 Rio de Janeiro 2010.*
13. A.U.Florez,O.Z. Giraldo, *‘Desarrollo de matrices compuestas basadas en alcohol polivinílico e hidroxiapatita para uso potencial en ingeniería de tejido óseo’ Instituto Tecnológico Metropolitano, 2018.*
14. Z. Li, *Advanced Concrete Technology, John Wiley & Sons, Inc., 2011.*