



**UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ**

**ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE EL  
CONCRETO CONVENCIONAL CON EL  
CONCRETO CON ARCILLAS EXPANSIVAS  
EN LA CONSTRUCCIÓN EN EL ESTADO  
CARABOBO**

**Autores:** Anny Milagros Pastrán  
C.I: 21.417.121  
Xavier Alberto Piera  
C.I: 25.953.287

Urb. Yuma II, calle N° 3. Municipio San Diego  
Teléfono: (0241) 8714240 (master) – Fax: (0241) 871



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA  
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ  
FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA INGENIERIA CIVIL**

**ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE EL CONCRETO CONVENCIONAL  
CON EL CONCRETO CON ARCILLAS EXPANSIVAS EN LA  
CONSTRUCCIÓN EN EL ESTADO CARABOBO**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de  
INGENIERO CIVIL**

**Autores:** Anny Milagros Pastrán  
C.I: 21.417.121  
Xavier Alberto Piera  
C.I: 25.953.287  
**Tutor:** Fernando De Macedo

San Diego, Abril del 2018



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA  
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

### ACEPTACIÓN DEL TUTOR

Quien suscribe, Ingeniero Fernando De Macedo portador de la cédula de identidad 7.114.125, en mi carácter de tutor del trabajo de grado presentado por los ciudadanos Pastrán M. Anny M. Píera C. Xavier A., portadores de la cédula de identidad 21.417.121; 25.953.287 titulado "ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE EL CONCRETO CONVENCIONAL CON EL CONCRETO CON ARCILLAS EXPANSIVAS EN LA CONSTRUCCIÓN EN EL ESTADO CARABOBO", presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Civil, considero que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del jurado examinador que se designe.

En San Diego, a los 16 de Marzo del año 2018

Ing. Fernando De Macedo  
C.I.: 7.114.125

## **DEDICATORIA**

Agradecemos a Dios por iluminar nuestro camino y guiarnos por el sendero correcto, por estar con nosotros en todo momento y darnos la confianza para siempre seguir adelante.

A nuestros profesores de la universidad, por todas las enseñanzas y buenos momentos que nos brindaron a lo largo de toda la carrera. Por eso y muchas cosas más infinitas gracias.

A nuestro tutor Ing. Fernando De Macedo, le agradecemos por su dedicación y motivación que nos brindó durante este trayecto para culminar nuestra tesis.

Al Ing. Alejandro Pocaterra por su gran ayuda y apoyo incondicional. Ha sido un privilegio contar con su guía y ayuda.

A nuestros padres, por ayudarnos y estar para nosotros a lo largo de este trabajo, por su apoyo, comprensión y paciencia, por brindarnos la mejor educación y las mejores lecciones. Gracias.

A nuestros compañeros quienes nos ayudaron he hicieron nuestros días en la universidad mucho mejores, por su compañerismo y por estar ahí en cualquier circunstancia, no hace falta nombrarlos, pero siempre estaremos agradecidos con todos ustedes.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco primeramente a Dios quien me ha guiado y me ha permitido llegar a este momento tan especial, gracias a el que me ha dotado de perseverancia y optimismo para culminar mi carrera.

A mi tutor académico por su paciencia y por brindar sus conocimientos para el desarrollo de mi tesis.

A la universidad José Antonio Páez donde me he formado y me han brindado sus conocimientos a través de mis profesores de la escuela de derecho.

A mi madre por siempre estar allí, por mostrarme su cariño y apoyo incondicional

A mi padre que desde el cielo me guío para poder lograr esta meta .

A mi hermana por creer en mí, y ser parte de este logro

A mis hermanos porque de alguna manera participaron para llegar hasta aquí.

A mi esposo por acompañarme a lo largo de mi carrera , por su motivación comprensión, por sus palabras y apoyo cuando pensé que no lo lograría, gracias por tu amor y paciencia que me ayudaron a terminar con éxito esta etapa de mi vida.

## ÍNDICE

CONTENIDO	PP.
ÍNDICE DE TABLAS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
RESUMEN.....	ix
INTRODUCCIÓN.....	1
<b>CAPÍTULO</b>	
<b>I EL PROBLEMA</b>	
1.1 Planteamiento del Problema.....	4
1.2 Formulación del Problema.....	6
1.3 Objetivos de la investigación.....	6
1.2.1 Objetivo General.....	6
1.2.2 Objetivos Específicos.....	6
1.4 Alcance y Limitaciones.....	7
1.5 Justificación de la Investigación.....	6
<b>II MARCO TEÓRICO</b>	
2.1 Antecedentes.....	8
2.2 Bases Teóricas.....	12
2.2.1 Generalidades del Concreto Convencional.....	12
2.2.1.1 Cemento Portland.....	12
2.2.1.2 Composición química del cemento.....	15
2.2.1.3 Propiedades físicas y mecánicas del cemento.....	15
2.2.1.4 Resistencia mecánica del cemento.....	17
2.2.1.5 Hidratación del cemento Portland.....	19
2.2.2 Cementos compuestos.....	21
2.2.3 Materiales de reemplazo.....	23
2.2.4 Agregados.....	28
2.2.4.1 Propiedades de los agregados.....	29
2.2.5 Propiedades del concreto.....	32
2.2.6 Arcillas expansivas.....	43
2.2.6.1 Características de las arcillas.....	43
2.2.7 Calorimetría Isotérmica.....	46
2.3 Definición de términos.....	48
<b>III MARCO METODOLÓGICO</b>	
3.1 Tipo de investigación.....	50
3.2 Diseño de la investigación.....	50
3.3 Nivel de la investigación.....	51
3.4 Población y muestra.....	51

3.5	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	52
3.6	Fases Metodológicas.....	54
<b>IV</b>	<b>RESULTADOS</b>	
4.1	Seleccionar literaturas relacionadas con el comportamiento del concreto convencional y el concreto con arcillas.....	56
4.2	Analizar detalladamente los materiales y métodos usados por los autores en las prueba de calorimetría isotérmica y ensayos a compresión en al concreto convencional y concreto con arcillas.....	56
4.3	Comparar la calorimetría del concreto convencional con la del concreto con arcillas a través de resultados obtenidos en las literatura seleccionas.....	88
4.4	Comparar resultados de ensayos a compresión realizados al concreto convencional y al concreto con arcillas basados en los estudios previamente seleccionados.....	91
	<b>CONCLUISIONES</b> .....	
	<b>RECOMENDACIONES</b> .....	
	<b>REFRENCIAS</b> .....	
	<b>ANEXOS</b> .....	



**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA  
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

**ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE EL CONCRETO CONVENCIONAL  
CON EL CONCRETO CON ARCILLAS EN LA CONSTRUCCIÓN EN EL  
ESTADO CARABOBO**

**Autor(es):** Pastrán M, Anny M

Piera C, Xavier A

**Tutor:** Fernando De Macedo

**Fecha:** Abril ,2018

**RESUMEN**

La presente investigación consistió en analizar seis bibliografías, en las cuales se determinó el efecto que de incorporar arcillas al cemento convencional como material sustituto del Clinker. Tales efectos se evaluaron mediante el monitoreo de la actividad puzolánica, específicamente calorimetría isotérmica, así como también la realización de ensayos de resistencia a la compresión. Se enfocó en un estudio de tipo documental, donde se seleccionaron una serie de bibliografías, con la finalidad de solucionar el problema en estudio, además, se ubicó en un nivel comparativo, puesto que a partir de la información recopilada, se desarrolló una metodología basada en lineamientos técnicos normativos que permitió la solución del problema planteado. En tal sentido, se analizó cada uno de los resultados obtenidos, que permitieron la realización de diagramas de bosquejo, y por último, se presentó la propuesta de la sustitución del clinker por materiales suplementarios como la arcilla, cumpliendo con las especificaciones normativas, más conveniente en cuanto a seguridad y confiabilidad, para la construcción en el estado Carabobo.

**Descriptor(es):** Comportamiento, construcción, arcillas, puzolánica

## INTRODUCCIÓN

Se conocen evidencias históricas de productos parecidos al concreto con varios milenios de antigüedad. Durante el imperio romano se desarrolló una especie de concreto utilizando el aglomerante que llamaban 'cementum'. El concreto, tal como se conoce actualmente, tuvo sus inicios en la mitad del siglo XVIII. A principios del siglo XIX se desarrolla el cemento portland y, a comienzos del siglo XX, se estudian y establecen la mayor parte de las relaciones que gobiernan el comportamiento del material. Su evolución y avance es permanente, habiendo logrado adelantos tecnológicos importantes, tales como es el concreto liviano, el uso de los aditivos químicos, los concretos ultrarresistentes, los de exigente comportamiento entre otros.

Dentro el mundo de la construcción el concreto es, en sus diversas variantes, el material de uso más extendido en zonas urbanas. Se estima, en general, que este material es el segundo en cantidad que utiliza el hombre, después del agua; donde hay actividad humana organizada, hay concreto. El cemento Portland que se usa hoy día como conglomerante es una cal hidráulica perfeccionada. Hidráulica quiere decir que tiene capacidad para endurecer tanto al aire como bajo el agua. Lo económico del material se debe a que las materias primas que emplea son relativamente abundantes en la naturaleza, y a las ventajas competitivas que ofrece frente a otros materiales de construcción. Las características del concreto que interesan son muchas; algunas de ellas se hacen críticas en determinadas circunstancias. Sin embargo, desde el punto de vista general, son dos las características o propiedades principales de mayor consideración. La primera es la relativa a la consistencia o grado de fluidez del material en estado fresco; a cual se conoce como manejabilidad y la segunda propiedad es el grado de endurecimiento o resistencia que es capaz de adquirir el concreto

El concreto es un material con una amplia gama de posibilidades, bien sea por el modo de uso de diferentes componentes o por la distinta proporción de ello. De este modo es posible obtener diversas plasticidades, resistencias y apariencias, logrando así, satisfacer los particulares requerimientos de la construcción. Esa versatilidad es una de las razones que permite explicar la creciente expansión del uso del material.

Por otra parte la gestión ambiental y el impulso al desarrollo sostenible son temas cada vez más cotidianos en los últimos años, la conciencia colectiva va en aumento con respecto a los problemas potenciales que genera el crecimiento de la industria de la construcción en el deterioro del medio ambiente. En términos generales, la construcción no es una actividad amigable con el medio ambiente, ya que provoca efectos sobre la tierra, agotamiento de recursos naturales, generación de residuos y diversas formas de contaminación como son las emisiones antropogénicas de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (Hill and Bowen, 1997, Department, 2006, Habert et al., 2012, Wadel, 2014). Cerca del 85 % de estas emisiones provienen de la fabricación del cemento (Silva, 2015). Debido a la importancia del mismo en la industria de la construcción, muchos estudios se ocupan de sus perspectivas futuras (Szabó, 2006, Taylor., 2006, Pardo , 2011): mejoras en el horno del cemento, el uso de combustibles alternativos y adiciones minerales, entre otras, que permiten a la industria del cemento reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> y los altos gastos energéticos que su producción emana. La utilización de los residuos como material puzolánico en el ciclo productivo del cemento y de sus derivados, resulta una alternativa atractiva para disminuir el CO<sub>2</sub> emitido a la atmósfera, ya que aumenta la fracción en volumen de materiales cementicios suplementarios (MCS) disponibles y se suma a aquellos, como las cenizas volantes, escorias, puzolanas volcánicas y fillers que producen concretos más sostenibles ambientalmente, y también producen mezclas con alta capacidad de trabajo (Mehta and Monteiro, 2006).

De tal manera el siguiente trabajo de investigación consistió en analizar una serie de bibliografías que se obtuvieron de la base de datos Science Direct, basadas

ensayos previos que se le realizaron al concreto convencional y al concreto con arcillas, específicamente calorimetría isotérmica y ensayos de resistencia a la compresión. Para esto, se tomó en cuenta una serie de factores y variables, lo cual permitió recopilar los resultados de cada uno de los estudios seleccionados, luego con la información suministrada se realizó una validez de contenido, haciendo uso del diagrama Causa-Efecto, o también llamado usualmente Diagrama de Ishikawa. Finalmente para llevar a cabo la comparación de los resultados de cada estudio se elaboró un diagrama de bosque, mediante el uso del software Review Manager 5.3 Meta-análisis, determinó el efecto que produce la incorporación de materiales sustitutos del clinker en materia de construcción. De tal forma, la presente investigación se encuentra estructurada de la siguiente manera:

Capítulo I: Planteamiento del problema, formulación del problema, objetivo general, objetivos específicos, justificación del problema, alcance y limitaciones.

Capítulo II: Antecedentes de la investigación, bases teóricas, bases legales y definición de términos.

Capítulo III: Tipo de Investigación, diseño de la investigación, nivel de investigación, población y muestra, técnicas e instrumentos de recolección de datos y fases metodológicas.

Capítulo IV: Resultados

# CAPÍTULO I

## EL PROBLEMA

### 1.1 Planteamiento del Problema

A nivel mundial el concreto u hormigón es un material utilizado en elementos estructurales que soportarán esfuerzos de carga a la compresión y a la flexión, en el primero de los casos elementos como las cimentaciones, pavimentos, columnas, y en el segundo caso las vigas, o que soporte una combinación de estas cargas como las losas de piso por lo que este material ha permitido construir muchos tipos de estructuras, como autopistas, calles, puentes, túneles, presas, grandes edificios, pistas de aterrizaje, sistemas de riego y canalización, rompeolas, embarcaderos y muelles, aceras y casas entre otros. Por lo tanto el concreto está constituido por agregado grueso o piedra, agregado fino o arena y agua. De allí que el cemento se obtiene de la pulverización del clínker, el cual es producido por la calcinación hasta la fusión insipiente de materiales calcáreos y arcillosos. El agregado fino o arena debe ser durable, fuerte, limpio, duro y libre de materias impuras como polvo, limo, pizarra, álcalis y materias orgánicas.

Basado en los estudios realizados por Kosmatka y Panarese, (1992) acerca del concreto, aproximadamente un 80% del peso del concreto u hormigón está compuesto por partículas de origen pétreo, de diferentes tamaños, material denominado usualmente como agregados, áridos o inertes. Por esa razón las características de esos materiales son decisivas para la calidad de la mezcla de concreto. La calidad de los agregados depende de las condiciones geológicas de la roca madre y, también, de los procesos extractivos. Es por lo tanto, a las empresas productoras (canteras, areneras, saques) a quienes corresponde el primer control en el proceso de la calidad de los

agregados. La calidad de los inertes debe ser comprobada por el fabricante concreto antes de elaborarlo a fin de garantizar una obra de calidad. Como es bien conocido por todas aquellas personas que de una manera u otra se dedican a la industria de la construcción, el propio peso muerto de las estructuras que corresponden a aquellas cargas que actúan durante toda la vida de la estructura incluyen aquellos elementos de la estructura como vigas, pisos, techos, columnas, cubiertas, además de los elementos arquitectónicos como ventanas, acabados, divisiones permanentes; el cual contribuye a encarecer su costo.

Por otra parte los materiales cementicios tienen un papel muy importante en la civilización humana, a pesar que poseen un perfil ambiental bastante bajo comparado con otros materiales, la gran cantidad de material que se produce hace que su impacto en términos de emisiones de carbono sea considerable. En los últimos años se ha trabajado mucho en mejorar el perfil ambiental de la producción, y esto se lleva a cabo con la búsqueda de materiales cementicios suplementarios que sean capaces de sustituir una parte del Clinker, que el componente más intenso en términos energéticos y el que más produce emisiones en el cemento. Desafortunadamente la mayoría de los potenciales sustitutos del Clinker que existen en la actualidad, uno de ellos son residuos de la producción industrial, como las cenizas volantes, no son disponibles en un volumen tal que sean capaces de hacer un gran aporte a nivel global en termino de sustitución; en general podrían representar aproximadamente el 15 % de la producción de cemento y eso no es suficiente para cubrir el impacto que se pide.

Sin embargo existen materiales como las arcillas que son abundantes a nivel de disponibilidad similares a los volúmenes de producción de cemento que cuando son calcinadas a través de una activación térmica se pueden convertir en puzolanas muy reactivas que podrían también sustituir al Clinker, es decir, esta podría ser una alternativa para mejorar el perfil económico de la producción de cemento.

La variedad de agregados resulta muy beneficiosos dado el aumento de rendimiento debido a la reducción de peso en el concreto, específicamente en la disminución de la carga muerta en la estructura, además de una disminución en el

transporte de materiales, mejor aislación acústica así como una mejor resistencia al fuego y al aislamiento térmico que la brindada por el concreto convencional.

## **1.2 Formulación del Problema**

Basadas en las premisas antes mencionadas surge la siguiente interrogante ¿Qué importancia tendrá analizar el comportamiento del concreto convencional y el concreto con arcillas en la construcción en el Estado Carabobo?

## **1.3 Objetivos de la Investigación**

### **1.3.1 Objetivo General**

Comparar el concreto convencional y el concreto con arcillas expansivas en la construcción del Estado Carabobo

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

1. Seleccionar literaturas relacionadas con el comportamiento del concreto convencional y el concreto con arcillas.
2. Analizar detalladamente los materiales y métodos usados por los autores en las prueba de calorimetría isotérmica y ensayos a compresión en al concreto convencional y concreto con arcillas.
3. Comparar resultados de calorimetría del concreto convencional con la del concreto con arcillas a través de estudios previos.
4. Comparar resultados de ensayos a compresión realizados al concreto convencional y al concreto con arcillas basados en los estudios previamente seleccionados.

## **1.4 Justificación**

Se consideró necesario realizar un análisis comparativo entre la reactividad puzolánica, específicamente calorimetría isométrica tanto del concreto convencional como del concreto con arcillas, ya que de esta manera se evaluó el comportamiento de cada uno a la hora de elaborar una edificación, por esto es de vital importancia conocer la confiabilidad estructural, que tenga la edificación al ser ejecutada usando concreto convencional o concreto con arcillas.

Igualmente el presente trabajo se justificó académicamente porque sigue las líneas de investigación de la Universidad José Antonio Páez en el área de Ingeniería Civil, especialmente en la rama estructural, la cual se encarga del diseño y el cálculo estructural en elementos y sistemas estructurales. Por otro lado se justificó teóricamente ya que su estudio estuvo basado por teóricos y especialistas en el tema.

Según Ferman,y Levin, (1990) La función más importante de una teoría es explicar; decir el por qué, cómo y cuándo ocurre un fenómeno. Permite sistematizar y dar un orden al conocimiento o fenómeno que se está estudiando, ya que muchas veces el mismo se encuentra disperso y desorganizado.

Igualmente se justificó metodológicamente por ser una investigación documental con un diseño bibliográfico, según Sampieri y otros(1998) señalan que: La metodología para toda investigación es de importancia fundamental. Para ello se deberá planear una metodología o procedimiento ordenado que se seguirá para establecer lo significativo de los hechos y fenómenos hacia los cuales está encaminado el significado de la investigación. Científicamente, la metodología es un procedimiento general para lograr de una manera precisa el objetivo de la investigación.

### **1.5 Alcance y Limitaciones**

El área de investigación estuvo limitada a la comparación de seis estudios previos, en los cuales se llevó a cabo un monitoreo de la reactividad puzolánica, específicamente calorimetría isométrica y ensayo de resistencia a la compresión tanto del concreto convencional como del concreto con arcillas expansivas. Una vez obtenido los resultados de la investigación se recomendó el método más conveniente en cuanto a confiabilidad estructural se refiere.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

Según Méndez (2005) define el marco teórico como: “la motivación de carácter teórico, es la inquietud que surge en el investigador por profundizar en uno o varios enfoques teóricos que tratan el problema que se explica, a partir de los cuales espera avanzar en el conocimiento planteado, o para encontrar nuevas explicaciones que modifique o complementen el conocimiento inicial” (p. 104). En este capítulo se presentara antecedentes de trabajos anteriores, las bases teóricas, aspectos legales y definición términos básicos.

#### **2.1 Antecedentes**

Los antecedentes de la investigación tienen como objetivo exponer los estudios previos realizados con el propósito de sustentar el tema de investigación. Al respecto, Arias (2006) expresa: “los antecedentes reflejan los avances y el estado actual del conocimiento en un área determinada y sirven de modelo o ejemplo para futuras investigaciones” (p. 48).

##### **Antecedentes Internacionales**

Yagual (2015), realizó un trabajo de grado titulado “Hormigón Liviano de Alto Desempeño con Arcilla Expandida” de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, Ecuador. La presente investigación tuvo como objetivo Elaborar hormigón liviano con arcilla expandida y definir sus propiedades. La problemática evidenciada fue que en Ecuador no existe un agregado que cumpla con los requisitos para un hormigón liviano de calidad, por este motivo el agregado que usaron en el hormigón liviano fue la arcilla expandida..La metodología de la investigación fue experimental y descriptivo debido a la elaboración de hormigón liviano con arcilla expandida

empleando cemento 1P y HE. Será experimental ya que se acercaran de manera más directa a los resultados, mediante los ensayos y estudio comparativo de las propiedades mecánicas de este hormigón versus el hormigón convencional. Fue descriptivo porque se puntualizará la evaluación de los resultados obtenidos de cada ensayo a realizarse, tanto a los agregados como a las probetas.

Los instrumentos utilizados fueron: Se emplearon modelos estadísticos y matemáticos para valorar el comportamiento entre el hormigón convencional y el hormigón con arcilla expandida. Uso de software MICROSOFT EXCEL y WORD para la elaboración del cronograma, presupuesto, análisis de resultados y redacción del proyecto de tesis. Uso de normas American Society for Testing Materials (ASTM), American Concrete Institute (ACI) y la Norma Técnica Ecuatoriana (NTE) para la realización de los ensayos a los agregados, hormigón fresco y probetas de hormigón.

La conclusión a la cual llegaron fue que el uso de hormigón liviano de alto desempeño con arcilla expandida, en una edificación de cuatro pisos reduce hasta un 20% los desplazamientos laterales provocado por un sismo, debido a la disminución de carga muerta producida por el peso propio de esta. Por lo tanto recomendaron utilizar mezclas no muy fluidas de hormigón liviano con arcilla expandida ya que el peso específico de la arcilla es menor que el peso específico del agua lo que provoca que la arcilla expandida flote después del vaciado y durante el fraguado teniendo como resultado superficies rugosas. Esta tesis de grado es un aporte para fabricar arcilla expandida de propiedades similares o mejores a las que actualmente se comercializan, y que posteriormente servirá como una alternativa para ser utilizada en la elaboración del hormigón liviano.

La relación del antecedente anteriormente expuesto con la investigación es el estudio de las propiedades de las arcillas expansivas y su comportamiento con el concreto, de igual manera el análisis de las propiedades del concreto convencional para establecer una comparación y determinar cual resulta menos costosa.

Aramayo (2003), en su trabajo de grado titulado “Hormigones con agregados livianos”, de la Universidad del Rosario, Argentina. Tuvo como objetivo estudiar las características físicas (densidad, resistencia, condición aislante, absorción, costos, etc.) que le transfieren al hormigón, distintos agregados livianos, como lo es: la arcilla expansiva, cascotes de ladrillos, escoria expandida, etc. Al final del mismo se realizó una comparación de dichas características, con la finalidad de seleccionar el agregado óptimo para la elaboración del hormigón liviano.

La metodología de la investigación fue trabajo documental, de los resultados obtenidos se determinó que el hormigón liviano se caracteriza principalmente, por su capacidad aislante y su baja densidad. Los agregados livianos usados en la elaboración de los hormigones, han sido adoptados en consideración a su estructura celular, la cual ofrece una de las principales ventajas, que es la baja densidad y consecuentemente el aislamiento térmico, a la par de ciertas propiedades, pues amortiguan las vibraciones. Este trabajo permitió identificar las características físicas que brinda el agregado liviano a la mezcla de concreto.

La relación del antecedente antes mencionado con la investigación es que ofreció una orientación a que posible información obtener de las arcillas expansivas y su comportamiento con el concreto.

### **Antecedentes Nacionales**

Luna (2011) elaboró un “**Estudio de la Factibilidad Técnica del Diseño de Bloques de Concreto Sustituyendo el Agregado Fino por Aliven**”, de la Universidad Nueva Esparta, Venezuela. La presente investigación tuvo como objetivo determinar la factibilidad técnica del diseño de bloques de concreto sustituyendo el agregado fino por Aliven. La problemática observada fue que en la construcción de ciertas obras civiles, como por ejemplo las losas y paredes, no se requiere esencialmente la utilización de bloques de concreto para ello existen varias alternativas por ejemplo acero corrugado, ladrillo hueco, etc. Por ser el bloque de concreto un material común en la construcción, no es el más para cuidar el ambiente ni tampoco el más económico.

Partiendo de esta realidad; la esencia de este estudio en términos concretos, está orientada a la búsqueda de alternativas ecológicas para la ejecución de obras civiles. En el caso del presente trabajo, se ha determinado que la investigación es de tipo experimental, porque ésta, se ha basado en el estudio de las características técnicas de los bloques de concreto al sustituir el agregado fino por el agregado liviano, todo esto, con la finalidad de comprobar si los bloques mantienen dichas características y no resultan con alteraciones considerables en sus propiedades físicas, y más aún, determinar si el agregado liviano cumple con las mismas funciones que el agregado fino en la elaboración de los bloques.

El instrumento aplicado fue una planilla de observación. La conclusión a la cual llegó el autor fue que los bloques de Aliven demostraron que ahorran esfuerzo y dinero, sin sacrificar la resistencia y la durabilidad. No hay que olvidar que mientras más peso no significa más resistencia. Con este tipo de bloque se obtuvieron los mismos resultados que el bloque tradicional de mampostería con un peso mucho menor. Gracias a su composición química la arcilla expansiva posee una elevada resistencia al calor, lo que permite que para construcciones de viviendas, en áreas donde exista un nivel alto de calor, esto se origina debido a que estos elementos poseen una característica adicional: son aislantes del calor y las únicas que superan las normas COVENIN 62(B) 86.

El presente antecedente se relaciona con la investigación, ya que evalúa las propiedades de arcillas expansivas y permite determinar que puede ser usado en la construcción de bloques que cumplen con los valores de esfuerzo establecidos en la norma.

Álvarez (2010) elaboró un trabajo de grado titulado “**Estudio Preliminar para la Elaboración de Concretos Ligeros utilizando Arcillas Expansivas**” de la Universidad Central de Venezuela. La presente investigación tuvo como objetivo el estudio de la obtención del agregado liviano a usar en la fabricación del concreto ligero estructural y posteriormente, someter a prueba de probetas preparadas con dicho concreto para definir las propiedades estructurales del material.

La problemática evidenciada fue que por razones de carácter geológico, los agregados pétreos no se encuentran con facilidad, por lo cual tenían que transportarlos de canteras lejanas, trayendo como consecuencia un encarecimiento en las estructuras. La metodología de la investigación indica que es un trabajo experimental, ya que se realizaron una serie de ensayos para agregado natural (piedra picada). Se realizaron ensayos de laboratorio, los cuales permitieron determinar que el concreto liviano fabricado a base de arcillas expansivas puede ser usado perfectamente como concreto estructural, esta afirmación se basa en el hecho de que se obtuvo concretos de resistencias cercanas a los  $340 \text{ kg/cm}^2$ , por lo tanto recomiendan realizar un estudio comparativo entre el concreto ligero y el concreto tradicional, en cuanto al factor económico. La relación del antecedente con la investigación

## **2.2. Bases Teóricas**

### **2.2.1. Generalidades del Concreto Convencional**

#### **2.2.1.1. Cemento Portland**

El clinker del cemento portland es fabricado mediante la calcinación y sinterización de una mezcla de materias primas que consisten principalmente de  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Otros materiales son usados durante el proceso, por ejemplo, el óxido de hierro que es adicionado para reducir la temperatura de clinkerización. El producto obtenido es llamado clinker, al cual se le añade aproximadamente un 5% de yeso para controlar el tiempo de fraguado; posteriormente es finamente molido para obtener el cemento como producto final. De acuerdo a la norma ASTM C 2196, el cemento portland es un cemento hidráulico producido por la molienda de clinker, el cual consiste de al menos dos tercios en masa de silicatos de calcio  $3(\text{CaO})$

De acuerdo a Taylor (1997) cuatro fases principales están presentes en el cemento portland ordinario: silicato tricálcico (C3S), aluminato tricálcico (C3A) y una fase ferrita (C4AF); otras fases minoritarias, como los sulfatos alcalinos y la cal libre (CaO), pueden estar también presentes.<sup>11</sup> C3S es la fase más importante de un cemento portland ordinario, constituyendo un 50 – 70%. Es un silicato tricálcico ( $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$ ) modificado en composición y estructura cristalina por sustitución iónica. Esta fase reacciona rápidamente con el agua, y es la fase principal para el desarrollo de resistencia mecánica, a edades tempranas. La segunda fase en importancia es el silicato dicálcico (C2S), que constituye un 15-30% de un cemento portland ordinario. Es un silicato dicálcico ( $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ ) modificado por sustitución iónica y normalmente se presenta en un 10-15%. Contribuye un poco al desarrollo de resistencia durante los primeros 28 días, pero incrementa sustancialmente la resistencia a edades tardías.

La fase C3A está presente en el cemento portland en un 5-10%. Es un aluminato tricálcico ( $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ ), modificado en composición y algunas veces también en estructura por sustitución iónica. Esta fase reacciona rápidamente con el agua, lo que puede provocar un fraguado falso; para evitar esta reacción rápida se agrega yeso, el cual actúa como un agente controlador de fraguado.

La fase C4AF contribuye hasta en un 5-15% del cemento portland ordinario. Es un aluminato ferrita tetracálcico ( $\text{Ca}_2\text{AlFeO}_5$ ) modificada en composición por la variación de la relación Al/Fe y por sustitución iónica. La velocidad a la cual esta fase reacciona con el agua es variable, quizás debido a las diferencias en composición y otras características, pero en general es alta al principio y baja a edades tardías. Las proporciones típicas de las fases se presentan en la Tabla 2. En resumen, los silicatos dominan el fraguado, endurecimiento y el desarrollo de las propiedades de la pasta de cemento.

Las fases intersticiales (aluminatos) juegan un rol muy importante en las propiedades tempranas de reología de la pasta y también en la estabilidad dimensional de las pastas al estar expuestas a iones sulfato o tratamientos térmicos. En diversos países los tipos de cemento son estandarizados y hechos para cubrir ciertas necesidades, en la Tabla 2 se enlistan los principales tipos de cemento portland. Las especificaciones están basadas en la composición química, propiedades físicas y ensayos de desempeño bajo condiciones estándares.

### **2.2.1.2 Composición química del cemento.**

El cemento está constituido por una serie de compuestos que contribuyen favorablemente en las misiones fundamentales que desempeñan y componentes secundarios que se deben limitar, por los efectos contraproducentes que puedan ejercer sobre la mezcla. Los componentes fundamentales se muestran en la tabla 1.

### **2.2.1.3 Propiedades físicas y mecánicas del cemento**

Las propiedades físicas y mecánicas del cemento permiten complementar las propiedades químicas y conocer otros aspectos de su bondad como material cementante. Tales propiedades dependen del estado en que se encuentre (fresco o endurecido) y son medidas a través de ensayos que se pueden clasificar como: ensayos sobre el cemento puro, sobre la pasta de cemento y sobre el mortero. Las propiedades físicas y mecánicas del cemento son: Peso específico. La densidad o peso específico del cemento es la relación existente entre la masa de una cantidad dada y el volumen absoluto de esa masa. Su valor varía muy poco y en un cemento Pórtland normal cuando no hay adiciones distintas al yeso, suele estar comprendida entre 3.10 y 3.15 gr/cm<sup>3</sup> . En el caso de cementos con adiciones, desde luego es menor ya que en el contenido de Clinker por tonelada de cemento es menor y su valor puede estar comprendido entre 3.00 y 3.10 gr/cm<sup>3</sup> dependiendo del porcentaje de adiciones que tenga el cemento.

$$\text{Densidad} = \text{peso} / \text{volumen}$$

El método más conocido para determinar la densidad del cemento es el de Le Chatelier. Este frasco permite medir el volumen correspondiente a cierta masa de cemento, por medio del desplazamiento de un líquido, que no reacciona con el cemento (generalmente kerosene), aprovechando el conocido principio de Arquímedes.

Superficie específica (finura). Como se vio anteriormente una de las últimas etapas del proceso de fabricación del cemento, es la molienda del Clinker con yeso. La finura de molido, es una de las propiedades físicas más importantes del cemento, ya que está íntimamente ligada al valor hidráulico.

Puesto que la hidratación de los granos de cemento ocurre desde la superficie hacia el interior, el área superficial total de las partículas de cemento constituye el material de hidratación. El tamaño de los granos, o sea la finura del cemento, tiene una gran influencia sobre sus propiedades, especialmente sobre la velocidad de hidratación, desarrollo de calor, retracción y aumento de resistencia con la edad. Unos de los métodos utilizados es el de la norma de ICONTEC 226, consiste en tamizar una muestra de 50 gr de cemento por un tamiz de 74 micra (No. 200), ó por un tamiz de 149 micra (No.100) y determinar el porcentaje que pasa por el tamiz.

Consistencia normal. Como es sabido, el conjunto de cemento, agua y aire se llama pasta. Los cementos Pórtland, pueden diferir entre sí en cuanto al requerimiento de agua y la diferencia es aún mayor en cementos Pórtland con adiciones, los cuales tienen requerimientos de agua más altos que los cementos normales, por su mayor superficie específica.

La cantidad de agua que se le agrega al cemento, le comunica una determinada fluidez, la cual aumenta al incrementarse el contenido de agua. Existe una determinada fluidez para la cual debe agregarse cierta cantidad de agua. Esta fluidez es lo que se llama consistencia normal. La consistencia normal del cemento<sup>3</sup> se mide por medio del aparato de Vicat. Este ensayo consiste en agregar un volumen conocido de agua a 500 gr de cemento, que se amasan y colocan en un molde troncocónico.

Enseguida, se pone la aguja de 10 mm diámetro en contacto con la superficie superior de la pasta y se suelta. Por acción de su propio peso (300gr), la aguja penetra en la pasta y la profundidad de penetración depende de la pasta. Si la penetración es de 10 mm  $\pm$  1mm, después de 30 segundos de haber soltado la aguja, se considera que la pasta tiene consistencia normal

#### **2.2.1.4 Resistencia mecánica del cemento.**

La resistencia mecánica del cemento endurecido es la propiedad del material que posiblemente resulta más obvia en cuanto a los requisitos para usos estructurales. Por lo tanto, no es sorprendente que las pruebas de resistencia están indicadas en todas las especificaciones del cemento. La manera más lógica de medir la resistencia mecánica de los cementos es, aparentemente, sobre probetas hechas con pasta ya que si se limita la dispersión que aparece en los resultados cuando se usan probetas de mortero o concreto; sin embargo se ha demostrado en múltiples investigaciones que el comportamiento mecánico de distintos cementos varia al ensayarlos en probetas con agregados (mortero o concreto) y por tanto desde el punto de vista de las aplicaciones del cemento, la determinación de resistencia mecánica sobre probetas de pasta no tiene mayor utilidad. La resistencia a la compresión se determina mediante cubos de mortero

#### **2.2.1.5. Hidratación del Cemento Portland**

En términos químicos, la hidratación es una reacción de un compuesto anhidro con agua, formando un nuevo compuesto, un hidrato. En la química del cemento la hidratación comprende la reacción del cemento no hidratado o uno de sus constituyentes con agua, asociado con los cambios físicos y químicos del sistema, en particular con el fraguado y el endurecimiento.

Para una completa hidratación del cemento, este se debe mezclar con una cantidad suficiente de agua. La relación de agua y cemento en la mezcla (a/c) afecta

la reología de la pasta producida, así como el progreso de la hidratación y las propiedades del material hidratado. La cinética de hidratación está influenciada por una variedad de factores, entre los que destacan:

- La composición de la fase del cemento y la presencia de iones de solución sólida dentro de las redes cristalinas de las fases individuales del clinker.
- La finura del cemento, en particular por la distribución de tamaño de partícula y el área superficial.
- La relación agua/cemento utilizada.
- La temperatura de curado.
- La presencia de aditivos químicos, que son sustancias químicas agregadas para modificar el grado de hidratación y las propiedades de la pasta de cemento.
- Las adiciones hidráulicas y puzolánicas, como la escoria granulada de alto horno, la ceniza volante y el humo de sílice.

#### **a) Mecanismos de hidratación**

La hidratación del cemento portland consiste de una serie de reacciones entre los minerales individuales del clinker, el sulfato de calcio y agua, las cuales suceden simultánea y satisfactoriamente con diferentes cinéticas influenciadas una con otra. Al inicio, el proceso de hidratación tiende a ser controlado principalmente por el mecanismo de disolución de las fases del clinker y el sulfato de calcio, conforme progresa la hidratación, el avance de reacción comienza a ser controlado por la nucleación y crecimiento de las fases hidratadas formadas y finalmente por la difusión del agua y los iones disueltos y por tanto la reacción en estado sólido. Para un cemento Portland, se puede explicar el mecanismo de hidratación de pastas a temperatura ambiente analizando las curvas de evolución de calor de hidratación. En la Figura 1 se muestra esquemáticamente la hidratación del cemento en función de la cantidad de liberación de calor en cinco etapas:

Etapa 1: Periodo de pre-inducción

Es una hidratación inicial rápida que ocurre en los primeros minutos, inmediatamente al contacto de las partículas de cemento con el agua, se lleva a cabo una disolución rápida de las especies iónicas en la fase líquida y comienza la formación de las fases hidratadas. Los sulfatos y álcalis presentes en el cemento se disuelven completamente en segundos, contribuyendo con un aumento en la concentración de iones  $K^+Na^+$  y  $SO_4^{-2}$  en la fase líquida.

Fuente: , Nelson E. B, 1990.

El silicato tricálcico se disuelve y conduce a la precipitación de una capa de fase CSH sobre la superficie de una partícula de cemento. Como la relación C/S del hidrato producido es menor que el silicato tricálcico, la hidratación de esta fase se le asocia con el incremento de la concentración de iones  $OH^-$  y  $Ca^{2+}$  en la fase líquida. Al mismo tiempo, los iones de silicato entran también en la fase líquida, sin embargo su concentración permanece muy baja. La fase C3A se disuelve y reacciona con los iones de  $Ca^{2+}$  y  $SO_4^{-2}$  presentes en la fase líquida, formando etringita (AFt) que también se precipita sobre la superficie de la partícula de cemento. La concentración de  $Al^{3+}$  en la fase líquida permanece muy baja.

La fase C4AF reacciona de manera similar al C3A y también da lugar a la fase  $-C_2S$  reacciona durante el periodo de pre-inducción, formando CSH y contribuyendo a la concentración de iones  $Ca^{2+}$  y  $OH^-$  en la fase líquida. La reacción de hidratación inicia rápidamente e implica una gran cantidad de calor liberado; sin embargo, parece ser disminuida debido a la formación de una capa de productos de hidratación en la superficie del grano de cemento. En base a esto, una barrera se forma entre el material no hidratado y la solución, provocando un aumento en la concentración de los iones disueltos en la fase líquida.

#### Etapa 2: Periodo de inducción

Después del corto periodo de hidratación inicial rápida, se presenta una desaceleración de las reacciones durante algunas horas. En esta etapa, la hidratación de todos los minerales del clinker progresa muy lentamente. La concentración de hidróxido de calcio en la fase líquida llega al máximo y comienza a decrecer. La concentración de  $SO_4^{-2}$  permanece constante.

#### Etapa 3: Periodo de aceleración

Durante esta etapa la hidratación se vuelve a acelerar y es controlada por la nucleación y crecimiento de los productos de hidratación. El grado de hidratación del C3S se acelera y se forma una “segunda capa” de gel CSH; al mismo tiempo se forma C2S. El hidróxido de calcio cristalino de la fase líquida se precipita y junto con esto la concentración de  $Ca^{+2}$  en la fase líquida decrece gradualmente.

El sulfato de calcio unido al cemento comienza a ser completamente disuelto y la concentración de  $SO_4^{-2}$  en la fase líquida empieza a decrecer, debido a la formación de la fase AFt así como a la adsorción del  $SO_4^{-2}$  sobre la superficie de la fase CSH formada.

#### Etapa 4: Periodo de desaceleración

En este periodo el grado de hidratación se desacelera gradualmente, mientras la cantidad de material que aún no ha reaccionado decrece y el proceso de hidratación comienza a ser gobernado por la difusión en estado sólido. La fase CSH se sigue formando.

A este proceso se incrementa con el tiempo, y como consecuencia la rapidez a la que el hidróxido de calcio se forma decrece.

Después que la disposición de sulfato de calcio ha comenzado a limitarse, la concentración de  $SO_4^{-2}$  en la fase líquida disminuye. Por lo que, la fase AFt que se

formó durante la etapa inicial de hidratación reacciona con el  $C_3A$  adicional y con el  $C_4AF$  para formar monosulfato (AFm)

#### Etapa 5: Difusión limitada

Durante esta etapa, se ha formado una capa de hidratos sobre la superficie de los granos de cemento, la cual es cada vez más gruesa, por lo que resulta difícil para las moléculas de agua incorporarse a las partículas de cemento anhidras, especialmente cuando esta capa es muy densa. La hidratación se disminuye debido a que la tasa de difusión es controlada por las moléculas de agua a través de las capas de hidratos y la pasta de cemento hidratado aparece como una pasta masiva compacta amorfa conocida como producto interno.

### 2.2.2. Cementos Compuestos

Taylor (1997) define a un cemento compuesto como un cemento hidráulico que consiste de dos o más constituyentes inorgánicos (donde al menos uno no es clinker o cemento portland) que contribuyen a la resistencia mecánica y desarrollo del resto de las propiedades del cemento.

En general, estos materiales de reemplazo son subproductos industriales como la escoria granulada de alto horno, la ceniza volante y el humo de sílice y de materiales naturales como la ceniza volcánica y las arcillas calcinadas, entre otras. Estos materiales reaccionan con los productos de hidratación del cemento portland, produciendo silicatos hidratados adicionales, los cuales pueden beneficiar al desarrollo de resistencia y durabilidad del concreto.

Los materiales de reemplazo pueden dividirse en dos categorías:

Los hidráulicos latentes, que poseen propiedades cementantes, pero necesitan de activación externa para su reacción; un ejemplo es la escoria granulada de alto horno.

Los puzolánicos, que de acuerdo a la norma ASTM C 595 son materiales naturales o subproductos industriales compuesto de materiales silíceos o silicoaluminosos, que carecen de propiedades hidráulicas y que casi no poseen valor cementoso, pero que al estar finamente molidos y en presencia de humedad, reaccionan químicamente con

hidróxido de calcio, para formar compuestos de hidratos de silicatos y aluminosilicatos de calcio que poseen propiedades similares a las del cemento hidratado. Algunos ejemplos relevantes y ampliamente usados son la ceniza volante, el metacaolín, el humo de sílice y la cascarilla de arroz. En la Figura 2 se muestra la ubicación de la composición aproximada del humo de sílice, la escoria, la ceniza volante y el cemento portland.

Durante los últimos cuarenta años se han empleado diferentes tipos de materiales de reemplazo del cemento portland de manera sistemática, sin embargo, el efecto que cada uno tiene sobre el proceso de hidratación, el desarrollo de propiedades mecánicas, físicas y microestructurales no está muy claro aún en cementos compuestos con tres y cuatro constituyente

### **2.2.3. Materiales de Reemplazo**

#### **a) Ceniza Volante**

La ceniza volante es un material puzolánico subproducto de los hornos que emplean carbón mineral como combustible para la generación de energía. Cuando el carbón se quema a una temperatura entre 1250°C y 1600°C, los materiales no combustibles colisionan para formar unas pequeñas esferas vítreas de sílice ( $\text{SiO}_2$ ), alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y otros constituyentes minoritarios.

Las propiedades físicas y químicas de la ceniza volante dependen de la composición de la fracción inorgánica del carbón, el grado de pulverización, la historia térmica y las condiciones de oxidación. La CV consiste de partículas finas de morfología esférica, que pueden ser sólidas o huecas y de naturaleza amorfa. El material carbonoso en la CV está compuesto de partículas angulares. Basado en la composición química se distinguen dos clases de ceniza volante definidas por la norma ASTM C618-8923: la de bajo contenido de calcio, llamada Clase F y la de alto contenido de calcio, llamada Clase C. La ceniza clase F se deriva del carbón tipo antracita o bituminoso, es pobre en  $\text{CaO}$  y  $\text{MgO}$  y relativamente rico en  $\text{SiO}_2$  y

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; mientras que la clase C del carbón subbituminoso o lignita, contiene menos SiO<sub>2</sub> y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> que la clase F, pero altas cantidades de CaO. La CV puede estar compuesta por fases minerales como lo son el cuarzo, ilita, siderita y mulita, además de presentar una fracción amorfa constituida por SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-(CaO)-(MgO).

El tamaño y la morfología esférica, la composición química y la fracción amorfa de la CV modifican el desarrollo de las propiedades mecánicas, químicas y microestructurales de pastas de CP, concretos y morteros. En pastas de CP, las partículas finas y esféricas de CV incrementan la RC a edades tardías, debido al efecto de empaquetamiento de la ceniza volante fina; pues las partículas pequeñas y esféricas llenan los poros e incrementan la densidad. Además la presencia de partículas muy finas y de gran área superficial favorece la reactividad puzolánica de la CV.

Los factores que influyen la reacción puzolánica de la CV en pastas de CP son su fracción amorfa, su composición, el pH del medio, el área superficial de las partículas y la disposición de CH, producto de hidratación del CP. También son importantes la temperatura de curado y el nivel de reemplazo de CV, pues tienen un efecto en el proceso de hidratación, los productos de hidratación y el desarrollo de la microestructura de las pastas de CP.

#### b) Metacaolín

Los caolines son rocas que están formadas fundamentalmente por minerales del grupo del caolín como son la caolinita, dickita, nacrita y halloysita, acompañados por impurezas de cuarzo, mica, anatasa, rutilo, ilmenita y pequeñas cantidades de turmalina, zircon y otros minerales pesados. La caolinita (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 2SiO<sub>2</sub> 2H<sub>2</sub>O) corresponde a un material silicoaluminoso formado por una capa de tetraedros de silicio combinada con otra capa de octaedros de alúmina a través de grupos hidroxilo que están compartidos entre las dos láminas. El comportamiento de las arcillas minerales bajo calentamiento depende de su estructura y grado de cristalinidad. Por encima de 100°C, las arcillas minerales pierden la mayoría del agua adsorbida..

La temperatura a la cual la caolinita pierde agua por dehidroxilización está en el rango de 500-800°C y el producto generado a partir de esta activación térmica o calcinación se le llama metacaolín. Este metacaolín puede utilizarse como material cementante suplementario y contribuye al desarrollo de resistencias mecánicas, reducción de la permeabilidad y durabilidad. Su actividad puzolánica, especialmente a edades tempranas, es comparable o superior al humo de sílice y a las cenizas volantes. El porcentaje óptimo de reemplazo de cemento con MK está asociado con los cambios en la naturaleza y proporción de los diferentes productos de reacción, temperatura y tiempo de reacción. La reacción de hidratación depende del nivel de actividad puzolánica del MK debido a su tamaño de partícula, composición química y fracción amorfa.

En el proceso de hidratación del metacaolín se forma un gel CSH adicional producido por el cemento portland, junto con productos cristalinos, que incluyen aluminatos y silicoaluminatos de calcio hidratados (C<sub>2</sub>ASH<sub>8</sub>, C<sub>4</sub>AH<sub>13</sub> y C<sub>3</sub>AH<sub>6</sub>). Los productos cristalinos dependen principalmente de la cantidad de CH disponible para la reacción y de la temperatura de curado.

### c) Humo de Sílice

Los términos de humo de sílice condensada, microsilice, humo de sílice y sílice volatilizada son usados frecuentemente para describir al sub-producto extraído de los gases de los hornos de producción del silicio, ferrosilicio y otras aleaciones de silicio. El HS se produce durante la reducción de cuarzo a alta temperatura en un horno de arco eléctrico.

El HS reacciona con el CH liberado para producir silicatos y aluminosilicatos de calcio hidratados. Estos incrementan la resistencia y reducen la permeabilidad ya que densifican la matriz del concreto, mediante la formación de una zona de transición más compacta y homogénea. El HS, tiene una gran área superficial y un alto contenido en dióxido de silicio. Se encontró que es mucho más reactiva que la ceniza volante o la escoria granulada de alto horno, esta gran reactividad incrementa el

grado de hidratación de la fracción de C3S del cemento, por lo que se creó más hidróxido de calcio, pero se estabilizó a relaciones normales después de la primera semana de curado.

El humo de sílice está disponible comercialmente en varias formas, no densificada, densificada, micro pulverizado y en pasta. Las diferencias entre estas formas están relacionadas con la forma y tamaño de las partículas y no afecta la composición química o la reacción del material. Debido a la naturaleza y tamaño de partícula del humo de sílice, una pequeña adición a una mezcla de concreto produce cambios en las propiedades físicas y químicas. Se reportó que el principal efecto fue sobre la trabajabilidad de la mezcla y que el material fino en la mezcla provocó un incremento en la cohesión del concreto y en la demanda de agua para mantener la mezcla y su trabajabilidad.

#### d) Escoria Granulada de Alto Horno

La escoria granulada de alto horno (EGAH) es un material hidráulico latente subproducto de la producción de hierro. Durante el proceso, el óxido de hierro, la caliza y el mineral de carbón son calentados hasta 1500°C hasta obtener dos productos fundidos: el arrabio y la escoria. La escoria es más ligera y flota encima del arrabio fundido. El proceso de granulación se lleva a cabo enfriando la escoria mediante inyectores de agua a alta presión. Esto enfría rápidamente la escoria y forma partículas granulares que consisten de 95% aluminosilicatos de calcio de naturaleza amorfa. El uso de la EGAH en el cemento y concreto ofrece una variedad de ventajas: mejora la compactación para el vaciado del concreto, incrementa la resistencia y durabilidad, reduce la permeabilidad, desarrolla alta resistencia a la penetración de cloruros, al ataque de iones sulfato y a la reacción alcali- sílice, posee un bajo calor de hidratación y es químicamente más estable.

Los cementos compuestos hechos de la combinación de cemento portland con EGAH pueden ser producidos por la molienda de clinker y EGAH en un molino de bolas, o por la mezcla de cemento portland y EGAH como polvos separados. Durante

la molienda se pueden generar diversos problemas debido a que la escoria es más dura que el clinker, lo que provoca que exista una molienda preferencial del clinker. Una buena distribución de partículas en ambos materiales favorece el desarrollo de mejores propiedades mecánicas. Bicini y Temiz (2007) investigaron el efecto de la finura de la EAGH en pastas de CP, indicando que a edades tempranas no se favorecieron la resistencia mecánica, sino hasta edades tardías.

La EGAH es un material que posee distinta reactividad hidráulica en presencia de los agentes activadores adecuados. Esta reactividad es directamente proporcional al contenido de fase amorfa. Sin embargo durante la obtención de la EGAH. La reactividad también depende de la composición de óxidos en la escoria. La reactividad incrementa con la alcalinidad de la escoria y en particular incrementa con el contenido de CaO. De acuerdo a Odler<sup>43</sup> uno de los parámetros para evaluar la reactividad de la escoria es determinar el módulo hidráulico con la ec.1.

$$HM = \frac{(CaO + MgO + Al_2O_3)}{SiO_2}$$

El valor mínimo de esta relación no debe ser menor a 1. Además, la reactividad depende de la finura de la EGAH, ya que existe una mayor área superficial a menor tamaño de partícula lo que favorece la hidratación. Los cementos a base de EGAH activados alcalinamente requieren de la adición de hasta 5% de Na<sub>2</sub>O o K<sub>2</sub>O comúnmente en la forma de hidróxido alcalino, carbonato alcalino o silicato alcalino.

El álcali se agrega al agua de mezclado y se unen parcialmente a los productos de hidratación durante la reacción. De acuerdo a trabajos en pastas de CP, la EGAH se activó con el CH y los álcalis de la solución de poros de la hidratación del CP.

La temperatura y el nivel de reemplazo de EGAH fueron factores que también influyeron en la reacción hidráulica latente de la EGAH y por ende en el proceso de hidratación del CP. Se reportó que ha temperaturas de 20°C el calor de hidratación de pastas de CP con 50% de reemplazo de EGAH fue menor que el desarrollado por una pasta de 100% de CP, pero al someter la pasta de CP con EGAH a una temperatura de

curado de 60°C, el calor de hidratación fue mayor que el de la pasta de CP a 20°C, evidenciando la relación directa de la activación de la EGAH con la temperatura.

#### **2.2.4. Agregados**

Los agregados son el mayor constituyente del concreto, generalmente componen más del setenta por ciento (70%) del material en un metro cubico de concreto y son los que hacen que este sea un material económico de. En combinación con esta proporcionan resistencia mecánica, al concreto en estado endurecido y controlan los cambios volumétricos que normalmente tienen lugar durante el fraguado del cemento.

Según Niño (2010), la calidad de los agregados está determinada por el origen, por su distribución granulométrica, densidad, forma y superficie. Se han clasificado en agregado grueso y agregado fino, fijando un valor en tamaño de 4,76 mm a 0,075 mm para el fino o arena y de 4,76 mm en adelante para el grueso. Frecuentemente, la fracción de agregado grueso es subdividida dentro de rangos, tales como, 4,76 mm a 19 mm para la gravilla y de 19 mm a 51 mm para la grava.

##### **a) Clasificación según su procedencia.**

Pueden ser naturales o artificiales. Los agregados naturales se obtienen de arrastres fluviales, glaciares y de canteras de diversas rocas y los agregados artificiales son los que se obtienen a partir de procesos industriales, tales como, arcillas expandidas, escorias de alto horno, Clinker, entre otros (Sánchez, 1993; Niño, 2010).

##### **Clasificación según su tamaño.**

La forma más empleada para clasificar los agregados naturales es según su tamaño (ver tabla 4.), el cual varía desde fracciones de milímetros hasta varios centímetros en sección transversal, esta distribución del tamaño de las partículas es lo que se le conoce con el nombre de granulometría.

Clasificación según su densidad. Según Sánchez (1996), esta depende de la cantidad de masa por unidad de volumen y del volumen de los poros, ya se trate de agregados naturales o artificiales. Esta distinción se hace porque afecta la densidad del concreto (ligero, normal o pesado) que se desea producir.

Tamaño de las partículas en mm (Tamiz)	Denominación corriente	Clasificación	Clasificación como agregado para concreto
<0,002	Arcilla	Fracción muy fina	No recomendable
0,002 - 0,074 (No.200)	Limo		
0,075 - 4,76 (No.200)-(No.4)	Arena	Agregado fino	Material apto para producir concreto
4,76 - 19,1 (No.4)-(3/4")	Gravilla	Agregado grueso	
19,1 - 50,8 (3/4")-(2")	Grava		
50,8 - 152,4 (2")-(6")	Piedra		
> 152,4 (6")	Rajón Piedra bola		

Tabla 4.

Fuente: . Sánchez de Guzmán Diego. 1996

#### 2.2.4.1. Propiedades de los agregados.

Estas propiedades dependen principalmente de su naturaleza y se pueden conocer por medio de ensayos en el laboratorio, pues es importante conocer sus características para la selección del material, para esto se debe tener en cuenta el carácter de trabajo o a que va ir destinado el material, condiciones climáticas, factores como dureza, forma de partículas y granulometría; y economía.

**Granulometría:** Es la distribución de los tamaños de las partículas que forman una masa de agregados y se determina mediante el análisis granulométrico. Según Niño (2010), para obtener un buen concreto, es necesario que la mezcla de arena y

grava logre una granulometría que proporcione masa unitaria máxima, puesto que con esta condición el volumen de los espacios entre partículas es mínimo y por consiguiente la cantidad de pasta necesaria para pegarlas y para llenar los espacios entre ellas será mínimo, lo cual dará lugar a una mezcla de mejores condiciones técnicas y además, económicas. El análisis granulométrico consiste en hacer pasar los agregados través de una serie de tamices, que tienen aberturas cuadradas y cuyas características se ajustan a unos parámetros establecidos normativamente.

Forma de las partículas: La forma del agregado depende mucho del tipo de roca que lo origina y del sistema de trituración. La forma juega un papel muy importante en la fabricación del concreto, debido a que la aptitud de compactación de la mezcla no solo depende de la granulometría del agregado sino también del grado de acomodamiento de las partículas, Niño (2010), afirma que la clasificación de las partículas pueden ser redondeadas, irregulares, angulares, escamosas, elongadas y escamosa-elongada.

Densidad: Esta depende directamente de la roca original de donde proviene y está definida como la relación entre la masa y el volumen de una masa determinada.

Porosidad: Se establece por medio del ensayo indirecto de la absorción de agua, entre más poroso, menos resistencia mecánica tiene.

#### **a) Propiedades mecánicas**

Las propiedades que estudian para la elección de un agregado son la dureza, resistencia, tenacidad y adherencia.

Dureza. Depende de la constitución mineralógica, la estructura y la procedencia del agregado, esta propiedad se obtiene por medio de un ensayo denominado desgaste en la máquina de los ángeles.

Resistencia. La resistencia del concreto depende en gran parte de la resistencia del agregado, es por esto que se busca un agregado que en su proceso de explotación y trituración haya sido adecuada, cumpliendo con la norma BS-812.

Tenacidad. Siendo la resistencia a la falla por impacto, esta depende netamente de la roca de origen.

Adherencia. La interacción que existe en la zona de contacto del agregado pasta, la cual es producida por fuerzas de origen físico-químico, ayuda a la resistencia del concreto, pues a mayor adherencia mayor va a hacer los esfuerzos que puede resistir el concreto. 28 7.4

#### **b) Propiedades Físicas**

**Peso Unitario:** El peso unitario, también denominado peso volumétrico, es la relación existente entre un peso de una muestra de agregado, la cual debe tener una buena distribución de partículas, y el volumen de un recipiente en donde está depositada la muestra. Al poner la muestra del agregado dentro del recipiente, las partículas deberán tener un acomodamiento mínimo de volumen de espacios entre ellas y esto se logra al colocar la mayor cantidad de partículas posibles, lo cual depende del tamaño, la granulometría, la forma y la textura del agregado. El peso unitario, en realidad, es una densidad del material en conjunto que incluye el espacio entre partículas, los poros no saturables y los poros saturables.

El volumen del recipiente incluye el volumen de las partículas, el volumen de los poros de las partículas (saturables y no saturables) y el volumen de los espacios entre partícula y partícula. El peso del material depende de que tan compactas y densas sean éstas. Por lo tanto, el peso unitario indica la calidad de un agregado y su capacidad para ser utilizado en la fabricación de concreto. Existen dos tipos de pesos unitarios que se clasifica según su grado de compactación.

**Peso Unitario Apisonado:** Es el peso unitario con un grado de acomodamiento de las partículas después de ser sometida a un apisonamiento o a vibración, ya que esto mejora el acomodamiento y aumenta el peso unitario. Lo importante del peso unitario apisonado está en que con éste valor se determinan los volúmenes de agregados en el diseño de mezcla por lo que las partículas del agregado van a quedar confinadas dentro de la masa.

**Peso Unitario Suelto:** Es el peso unitario cuando el material se encuentra en estado normal de reposo y el volumen que ocupa es mayor, por lo tanto éste peso unitario es menor que el apisonado.

El valor del peso unitario suelto es de suma importancia ya que hay que tener presente el hecho de que cuando se transportan los agregados se hace por volumen y en estado suelto. Luego, el volumen que se utiliza dentro del concreto a producir, colocar y compactar no es el mismo volumen de agregado a transportar.

### **2.2.5. Propiedades del concreto**

Para cada caso particular de empleo se requieren en el concreto determinadas propiedades. Es por ello que el conocimiento de todas y cada una de las propiedades del concreto, si como de la interrelación entre ellas, es de importancia para el ingeniero civil, el cual debe decidir, para cada caso particular de empleo del concreto, la mayor o menor importancia de cada una de ellas. Al analizar las propiedades del concreto, hay que recordar las limitaciones de las mismas en función de las múltiples variables que pueden actuar sobre el concreto modificándolo. En este análisis es importante recordar que el concreto, como cualquier otro material, puede sufrir adicionalmente modificaciones en el tiempo y que puede claudicar por fallas atribuibles a problemas de durabilidad, aun cuando su resistencia haya sido la adecuada. En el análisis de las propiedades del concreto es importante recordar que ellas están íntimamente asociadas con las características y proporciones relativas de los materiales integrantes; que la calidad, cantidad y densidad de la pasta es determinante en las propiedades del concreto; y que la relación agua-cemento lo es sobre las características de la pasta. (Rivva López, 2000, p.22)

**a) Concreto fresco:** Según Porrero (2014), se denomina concreto fresco al material mientras permanece en estado fluido, es decir desde el momento cuando todos los componentes son mezclados hasta que se inicia el atiesamiento de la masa (período plástico). En ese lapso el concreto es transportado, colocado en moldes o encofrados y luego compactado manualmente o por vibración (véase Capítulo IX). Ese estado de

plasticidad tiene una duración diferente entre unas y otras localidades, y entre una y otra época del año, ya que las condiciones del clima tienen gran influencia.

En lugares cálidos y secos el estado fresco dura menos tiempo que en localidades húmedas y frías. Son muchas las propiedades del concreto fresco que interesan y pueden llegar a ser críticas. No sólo por su relación con el manejo del concreto en ese estado, sino porque pueden servir como señal anticipada de las propiedades que pueda tener el material al endurecer posteriormente. Indicios de algún comportamiento atípico del concreto en este estado inicial avisa, en muchos casos, que en estado endurecido también puede ser impropia su calidad. En ese momento temprano, y antes de completarse los vaciados del material, es cuando se deben ejecutar las correcciones. El comportamiento del concreto fresco depende de: sus componentes, de las características del mezclado, de su diseño, del medio ambiente circundante y de las condiciones de trabajo.

**Reología:** Bajo el término reología del concreto se agrupa el conjunto de características de la mezcla fresca que posibilitan su manejo y posterior compactación. Desde el punto de vista físico, estas características dependen de las variaciones de la viscosidad y de la tixotropía de la mezcla a lo largo del tiempo. En la práctica, se define la reología del concreto con base en tres características: Fluidez, Compactibilidad y Estabilidad a la segregación.

**Fluidez:** La fluidez describe la calidad de fluido o viscosidad que indica el grado de movilidad que puede tener la mezcla. En un sentido general, la palabra trabajabilidad también se emplea con el significado de fluidez.

**Compactibilidad:** Cuando la mezcla es vibrada se hace más fluida y puede así distribuirse más uniformemente, envolviendo bien las armaduras y ocupando todas las sinuosidades del encofrado. Ésta es la propiedad que se conoce como tixotropía: Atiesamiento en reposo y fluidificación en movimiento; y es la característica que permite la compactibilidad de la mezcla y su adaptación al molde.

**Estabilidad a la Segregación:** Los componentes del concreto son físicamente heterogéneos: Líquido (agua), polvo (cemento y arena), fragmentos de piedra y una pequeña fracción de aire, cuya mezcla tiene la natural tendencia a separarse unos de otros. La separación del agua de los restantes componentes de la mezcla, cuando queda flotando sobre el material recién colocado, se conoce como `exudación o sangrado, y tiene su propio desarrollo evolutivo. Por otro lado, la tendencia a separarse los granos gruesos del mortero, lo que se conoce como segregación, depende de la viscosidad y de la tixotropía, y se relaciona con la cantidad y el tamaño de los granos.

**Trabajabilidad:** En la tecnología del concreto, la palabra `trabajabilidad se emplea con dos acepciones distintas. Una, general, con la cual se designa el conjunto de propiedades del concreto que permiten manejarlo sin que se produzca segregación, colocarlo en los moldes y compactarlo adecuadamente. La otra acepción es específica para designar el asentamiento medido por el procedimiento normalizado del Cono de Abrams.

Esta segunda acepción es discutible porque, en realidad, el ensayo solo es parcialmente representativo del conjunto de propiedades referidas. Desde hace algún tiempo, estudiosos de la materia señalan la conveniencia de diferenciar con mayor claridad los conceptos relativos a: i) la plasticidad en sí de la mezcla (docilidad, consistencia) y, ii) la facilidad de usarla (trabajabilidad, colocabilidad). Se requieren métodos de ensayo que permitan medir, respectivamente, dichas características pero, hasta el momento, no se han logrado con suficiente éxito. Tales son, por ejemplo, entre otros, el Plasticímetro LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées), y el Medidor CES (Centre d'Essais des Structures). Ante estas opciones, el método del Cono de Abrams sigue teniendo vasta aplicación pues, aún cuando no revela específicamente ciertas propiedades reológicas de la mezcla, el uso de la información que ofrece ha permitido la toma de decisiones acertadas.

**Cono de Abrams:** El asentamiento medido con el Cono de Abrams, según la Norma COVENIN 339, “Concreto. Método para la medición del asentamiento con el Cono de Abrams” y ASTM C143, cuyo equipo se describe en la Figura 3, es un índice bastante práctico; aunque no mide todas las propiedades plásticas de la mezcla, ni las valora con el mismo grado de influencia que ellas realmente tienen en el concreto, brinda una información útil sobre todo en términos comparativos. Se usan también otros métodos de ensayo que, aun adoleciendo de restricciones similares a las del Cono, valoran el grado de influencia de las propiedades reológicas de otra forma, y resultan más convenientes en algunos casos específicos. Como índice general, estos otros métodos no tienen ventajas decisivas sobre el Cono lo cual, unido a la facilidad práctica de ejecución del ensayo de Abrams, a la experiencia de su empleo y a la simplicidad de su equipo, hacen que el Cono sea el método más empleado, con gran diferencia respecto a los otros. Independientemente de estos aspectos, el Cono tiene limitaciones, ya que es útil solamente para concretos con agregados pétreos, tamaños máximos menores a 5 centímetros y con relativa plasticidad, caracterizada por asentamientos entre unos 2 y 17 centímetros. Otra limitación del Cono de Abrams es su insensibilidad para concretos ásperos o pedregosos. En los concretos normales, la masa del Cono, ya desmoldada, suele quedar de forma más o menos abombada según su asentamiento, simétrica y con la superficie superior casi plana (véase Figura II.1). Las mezclas pedregosas, al ser desmoldadas, suelen tomar forma del Cono con su base superior inclinada o totalmente caída lateralmente, o se desmoronan, según sea su contenido de agua. En cierto modo, este resultado indicaría un concreto propenso a la segregación. La propiedad del concreto fresco menos representada por el Cono es la compactibilidad. El ensayo utiliza como única energía de deformación la gravedad mientras que, en la práctica, sobre esa fuerza se sobreponen las proporcionadas por otros medios en especial por la vibración; de tal manera que el Cono no puede representar adecuadamente la mayor o menor facilidad que puede tener el material

para acomodarse en el encofrado, entre las armaduras. Para evaluar este aspecto es preciso acudir a algunos de los otros procedimientos, menos usuales.

**Retracción:** Otra característica del concreto que se debe tomar en consideración es la retracción, fenómeno de encogimiento o disminución de volumen que sufre el material con el tiempo, debido principalmente a la pérdida parcial de agua en las primeras horas y que puede llegar a producir grietas en el material. En las estructuras, la retracción se logra aminorar mediante una adecuada distribución de las armaduras de acero, que la restringen y la reparten de forma más conveniente.

La retracción depende de numerosos factores tales como la geometría de las piezas, las condiciones atmosféricas de velocidad de viento, humedad y temperatura, y la proporción de los componentes de la mezcla. Dentro de esos componentes son decisivos los ultrafinos y el agua. Los granos ultrafinos están formados por el cemento y las partículas más finas de la arena. Para mezclas que tengan arenas con cantidad de ultrafinos dentro de los límites normativos o recomendables, la retracción puede ser considerada como dependiente, fundamentalmente, de la dosis de agua y de cemento de la mezcla. Al aumentar el agua, o al aumentar conjuntamente la dosis de cemento y de agua, es decir, al aumentar la pasta, la retracción se hace mayor.

El exceso de ultrafinos aumenta el requerimiento de agua para mantener la fluidez, con lo cual hay exceso de agua y, a su vez, mayor retracción por secado. La retracción se puede producir en dos etapas diferentes de la vida del concreto: Una, en los momentos iniciales del fraguado, debida no a la pérdida del agua libre, sino a parte del agua de la mezcla; ésta es conocida como retracción de fraguado o retracción plástica. La otra, de menor escala, cuando el concreto está endurecido, generalmente al cabo de semanas o de meses y que es conocida como retracción hidráulica (aunque hidráulicas son ambas). La retracción temprana, ligada a las condiciones ambientales de viento, humedad y temperatura, es un permanente riesgo potencial en los concretos ejecutados en clima tropical. Este riesgo se combate con buenas técnicas de curado

aun cuando, en situaciones severas, es posible que deba defenderse la calidad del concreto con toldos protectores o pantallas corta-vientos.

**Segregación:** Las diferencias de densidades entre los componentes del concreto provocan una tendencia natural a que las partículas más pesadas descendan, pero en general, la densidad de la pasta con los agregados finos es solo un 20% menor que la de los gruesos (para agregados normales) lo cual sumado a su viscosidad produce que el agregado grueso quede suspendido e inmerso en la matriz. Cuando la viscosidad del mortero se reduce por insuficiente concentración de la pasta, mala distribución de las partículas o granulometría deficiente, las partículas gruesas se separan del mortero y se produce lo que se conoce como segregación. En los concretos con contenidos de piedra > del 55% en peso con respecto al peso total del agregados, es frecuente confundir la segregación con la apariencia normal de estos concretos, lo cual es muy simple de verificar obteniendo dos muestras de concreto fresco de sitios diferentes y comparar el contenido de gruesos por lavado, que no deben inferir en más del 6%.

**Exudación:** Propiedad por la cual una parte del agua de mezcla se separa de la masa y se sube hacia la superficie del concreto. Es un caso típico de sedimentación en que los sólidos se asientan dentro de la masa plástica. El fenómeno está gobernado por las leyes físicas del flujo de un líquido en un sistema capilar, antes que el efecto de la viscosidad y la diferencia de densidades. Está influenciada por la cantidad de finos en los agregados y la finura del cemento, por lo que cuanto más fina es la molienda de este y mayor es el porcentaje de material menor que la malla N°100, la exudación será menor pues se retiene el agua de la mezcla. La exudación se produce inevitablemente en el concreto, pues es una propiedad inherente a su estructura, luego lo importante es evaluarla y controlarla en cuanto a los efectos negativos que pudiera tener.

**Contracción:** Es una de las propiedades más importantes en función de los problemas de fisuración que acarrea con frecuencia. Ya hemos visto que la pasta de cemento necesariamente se contrae debido a la reducción del volumen original de

agua por combinación química, ya que esto se le llama contracción intrínseca que es un proceso irreversible. Pero además existe otro tipo de contracción inherente también a la pasta de cemento y es la llamada contracción por secado, que es la responsable de la mayor parte de los problemas de fisuración, dado que ocurre tanto en el estado plástico como en el endurecido si se permite la pérdida de agua en la mezcla. Este proceso no es irreversible, ya que si se repone el agua perdida por secado, se recupera gran parte de la contracción acaecida. Esta propiedad se tratara con mucha amplitud al tocar el tema de los cambios volumétricos en el concreto, siendo lo fundamental en este capítulo, el tener claro que el concreto de todas maneras se contrae y si no tomamos las medidas adecuadas indefectiblemente se fisura, y en muchos casos esta fisuración es inevitable por lo que solo resta preverla y orientarla.

**b) Concreto Endurecido:**

Elasticidad: En general, es la capacidad del concreto de deformarse bajo carga, sin tener deformación permanente. El concreto no es un material elástico estrictamente hablando, ya que no tiene un comportamiento lineal en ningún tramo de su diagrama carga vs deformación en compresión, sin embargo, convencionalmente se acostumbra definir un “Modulo de elasticidad estático” del concreto mediante una recta tangente a la parte inicial del diagrama, o una recta secante que une el origen del diagrama con un punto establecido que normalmente es un porcentaje de la tensión ultima.

Los módulos de elasticidad normales oscilan entre 250,000 a 350,000Kg/cm<sup>2</sup> y están en relación directa con la resistencia en compresión del concreto y en relación inversa con la relación agua/cemento. Conceptualmente, las mezclas más ricas tienen módulos de Elasticidad mayores y mayor capacidad de deformación que las mezclas pobres. La norma que establece como determinar el Modulo de elasticidad estático del concreto es la ASTM C-469.

**Resistencia:** Es la capacidad de soportar cargas y esfuerzos, siendo su mejor comportamiento en compresión en comparación con la tracción, debido a las propiedades adherentes de la pasta de cemento. Depende principalmente de la concentración de la pasta de cemento, que se acostumbra expresar en términos de la relación Agua/Cemento en peso.

La afectan además los mismos factores que influyen en las características resistentes de la pasta, como son la temperatura y el tiempo, aunados a otros elementos adicionales constituidos por el tipo y características resistentes del cemento en particular que se use y de la calidad de los agregados, que complementan la estructura del concreto. Un factor indirecto pero no por eso menos importante en la resistencia, lo constituye el curado ya que es el complemento del proceso de hidratación sin el cual no se lleguen a desarrollar completamente las características resistentes del concreto. Los concretos normales usualmente tienen resistencias en compresión del orden de 100 a 400 Kg/cm<sup>2</sup>, habiéndose logrado optimizaciones de diseños sin aditivos que han permitido obtener resistencias sobre los 700 Kg/cm<sup>2</sup>.

Tecnologías con empleo de los llamados polímeros, constituidos por aglomerantes sintéticos que se añaden a la mezcla, permiten obtener resistencias en compresión que bordean los 150 kg/cm<sup>2</sup>, y todo parece indicar que el desarrollo de estas técnicas permitirá en el futuro superar incluso estos niveles de resistencia.

La propiedad más común para medir la calidad del concreto es la Resistencia a Compresión Simple del Concreto.

Esta resistencia se determina usualmente mediante el ensayo:

- Compresión UNIAXIAL de Probetas cilíndricas.
- Probetas con relación Alto / Diámetro igual a Dos (2), de dimensiones normalizadas 15 x 30 cms.

Los factores que influyen en los resultados de la resistencia a compresión son los siguientes:

Relación Agua / Cemento: Mientras mayor es la relación agua cemento, menor es la resistencia nominal esperada del concreto.

Edad del Concreto: La resistencia del concreto aumenta conforme aumenta el tiempo, y a medida que se hidrata una mayor cantidad de cemento. Así mismo la resistencia va a depender del tipo de cemento utilizado (composición química) y de la finura del mismo.

a) Temperatura del Medio Ambiente: La resistencia del concreto aumenta conforme aumenta la temperatura, pero a medida que se hidrata una mayor cantidad de cemento, se hace necesario una menor temperatura de la pieza a los fines de evitar una evaporización brusca del agua que dañe el concreto.

b) Forma y Tamaño de las Probetas: La probeta cúbica arroja valores de resistencia superior a los obtenidos con probetas cilíndricas y esto se debe al efecto de roce desarrollado entre las caras de la probeta y los cabezales de la máquina de ensayo.

c) Influencia de la Velocidad de Aplicación de la Carga: La velocidad de aplicación de la carga en los ensayos normalizados a tracción simple es de  $3 \pm 1 \text{ Kg. / cm}^2$  por segundo. Velocidades superiores de aplicación de carga, dan resultados de resistencias superiores. De igual manera con menor velocidad de aplicación, los resultados de resistencia son menores. Mientras que la velocidad de aplicación de cargas para ensayos a flexión es de  $10 \pm 1 \text{ Kg. / cm}^2$  por minuto.

**Extensibilidad:** Es la propiedad del concreto de deformarse sin agrietarse. Se define en función de la deformación unitaria máxima que puede asumir el concreto sin que ocurran fisuraciones. Depende de la elasticidad y del denominado flujo plástico, constituido por la deformación que tiene el concreto bajo carga constante en el tiempo. El flujo plástico tiene la particularidad de ser parcialmente recuperable, estando relacionado también con la contracción, pese a ser dos fenómenos nominalmente independientes. La micro fisuración aparece normalmente alrededor del 60% del esfuerzo último, y a una deformación unitaria de 0.0012, y en condiciones normales la fisuración visible aparece para 0.003 de deformación unitaria

### **2.2.6. Arcillas Expansivas**

Se llaman arcillas expansivas aquellas que presentan cambio de volumen con los cambios de humedad, cuando la arcilla se humedece sufre fuerte expansión que produce daños considerables en paredes y pisos sobre todo en climas de largos o intermitentes períodos de humedad, debido a los cambios de volumen con los cambios de humedad. Pequeñas zapatas soportando livianas cargas son más fácilmente levantadas o movidas por la arcilla expansiva, lo mismo sucede en las vigas de cimentación. Cuando la arcilla se encuentra a considerable distancia bajo la superficie no se expande y contrae tanto, como cuando se encuentra cerca de la superficie, por lo tanto, los daños por levantamiento o movimientos de zapatas o muros pueden ser reducidos colocando éstas a suficiente distancia bajo la superficie. Las arcillas expansivas se caracterizan a menudo por su alto límite líquido (LL) y un alto índice de plasticidad (IP).

#### **2.2.6.1. Características de las Arcillas**

##### **Límite líquido**

El límite líquido (LL) del suelo se define como el contenido de humedad expresado en por ciento con respecto al peso seco de la muestra, con el cual el suelo cambia del estado líquido al plástico. Baja plasticidad  $LL < 35\%$  Plasticidad intermedia  $LL = 35- 50\%$  Alta plasticidad  $LL = 50 - 70\%$  Plasticidad muy alta  $LL = 70 - 90\%$  Plasticidad extremadamente alta  $LL > 90\%$  La plasticidad es la propiedad que presentan los suelos en poder deformarse, hasta cierto límite sin romperse. Según Atterberg, cuando un suelo tiene un índice plástico (IP) igual a cero, el suelo es no plástico, cuando el índice plástico es menor de 7, el suelo presenta baja plasticidad, cuando el índice plástico está comprendido entre 7 y 17 se dice que el suelo es medianamente plástico y cuando el suelo presenta un índice plástico mayor que 17 se dice que es altamente plástico.

Cambio de volumen en el suelo: Los suelos arcillosos, especialmente los muy plásticos, se retraen mucho cuando se secan y se expanden cuando se humedecen. Retracción de suelos altamente plásticos En regiones que tienen estaciones marcadamente secas y húmedas, el suelo próximo a la superficie del terreno se expande y contrae pudiendo producirse en un muro mayor desplazamiento en la parte exterior que en la interior, donde el suelo está protegido del sol y de la lluvia, en regiones normalmente húmedas, un período de sequía prolongado puede producir retracción en el suelo y el correspondiente asentamiento de la cimentación.

Asentamiento de fundaciones por retracción del suelo. Un secamiento acelerado y el asentamiento correspondiente, se puede producir por ciertos tipos de plantas que extraen la humedad del suelo o por calderas y hornos que calientan el suelo de manera anormal. En regiones muy secas sucede lo contrario, el aumento de la humedad del suelo debido a filtraciones de tuberías, regadíos y hasta el riego de césped, puede producir en la arcilla seca una expansión capaz de levantar una estructura. En la mayoría de los casos, el cambio de volumen se hace menor a medida que aumenta la profundidad y si es posible, las cimentaciones se deben colocar por debajo de estas zonas de cambio de volumen. Los cambios de volumen de un suelo

debido a la contracción del mismo se pueden determinar conociendo la relación de vacíos del suelo en su estado natural.

Conociendo esta relación de vacíos se puede calcular la contracción volumétrica por unidad de volumen original. Conociendo el cambio de volumen en promedio, debido a la contracción del suelo, se puede estimar el asentamiento del mismo al variar su humedad desde la humedad de saturación hasta la humedad correspondiente al límite de contracción del mismo. El hecho de que un suelo arcilloso se reconozca como potencialmente expansivo por su composición mineralógica, granulometría, límites de consistencia, etc., sólo constituye una parte del problema, pues para que se produzca ese hinchamiento o retracción del suelo, aún tienen que coincidir numerosos factores, tanto naturales como debidos a la actividad del hombre. Todos estos factores, actuando en mayor o menor proporción, controlan el equilibrio de humedad del suelo, del que en definitiva dependen sus cambios de volumen.

Determinación de ciertas propiedades básicas de los suelos a través de la medida de ciertas propiedades básicas y sencillas de los suelos se puede determinar el grado del potencial expansivo del suelo. Las propiedades a determinar son: • Límite líquido y Límite Plástico • Límite de contracción • Contenido de coloides • Expansión libre del suelo Estos métodos tienen la ventaja de su fácil realización y de equipamiento disponible en todos los laboratorios. La desventaja es que no se cuantifica la expansión, sino que cualitativamente se establecen categorías de grados del potencial expansivo.

Límite Líquido y Límite Plástico Investigadores como Seed, Woodward y Lundgren (2002) demostraron que las características plásticas de los suelos pueden ser usados como un indicador primario de la características expansivas de las arcillas. Es natural pensar en una relación como la antes mencionada ya que ambas dependen en la cantidad de agua que una arcilla absorbe. La relación entre las características plásticas y el hinchamiento de los suelos puede establecerse como: Grado de

Potencial Expansivo Índice Plástico Bajo 0 – 15 Medio 10 – 35 Alto 20 – 55 Muy Alto > 35

Si bien es cierto que todos los suelos altamente expansivos tienen plasticidades altas, no es cierto que los suelos con elevada plasticidad sean necesariamente expansivos. La falta de métodos teóricos que nos permitan obtener resultados fiables sobre la posible peligrosidad de un suelo expansivo y el hecho de que, con el estudio del terreno mediante ensayos de laboratorio —especialmente cuando éstos se hacen con muestras inalteradas— se consiguen ciertos resultados importantes pero incompletos, nos llevan a la conclusión de que el análisis de la experiencia local de edificación y de los daños y deformaciones de las obras existentes, así como o las mediciones de campo, constituyen la mejor información sobre la posibilidad y el modo de construir en este tipo de suelos.

### **2.2.7 Calorimetría Isotérmica**

De acuerdo con Taylor (200) para estudiar el mecanismo y la cinética de hidratación de las pastas de cemento se puede emplear la técnica de calorimetría isotérmica. La calorimetría isotérmica (por conducción de calor) es el método de laboratorio para medir la energía térmica (velocidad de producción de calor o velocidad de calor) en función del tiempo en pequeñas muestras a temperatura constante.

La hidratación de pastas de CP con tres tipos de adiciones minerales: 25% de CV, 25% de EGAH y 10% de HS, con relaciones de a/c de 0.35 y 0.45 han sido estudiadas mediante calorimetría isotérmica por Pane y Hansen (2005) reportando, que el calor de hidratación desarrollado por las pastas de cemento compuesto de CV y EGAH durante todo el periodo de medición fue menor que el de las pastas de CP. Sin embargo, a edades tardías el calor de hidratación de las pastas con EGAH fue mayor que para el CP.

Talero y Rahha (2005) realizaron un estudio sobre el efecto que el HS y dos MK tienen en el calor de hidratación de cementos compuestos con diferentes composiciones de  $C_2A$  y C3S. Ellos mencionaron que la actividad puzolánica de los

dos MK era dependiente de su estructura amorfa y de su contenido de  $Al_2O_3$ . La actividad del HS vario con la cantidad de fracción amorfa y de la composición química. La razón por la que las pastas de CP con HS mostraron una hidratación inicial elevada se debió a su naturaleza vítrea, por el contrario, para las pastas de CP con los dos MK, se debió al contenido de  $Al_2O_3$ .

Adicionalmente, la cantidad de calor producido por gramo de cemento fue mayor para aquellos que contenían una mayor cantidad de  $C_3A$ . Langan (2002), encontraron que durante los primeros minutos de hidratación, el calor de hidratación de pastas de CP reemplazadas con CV y HS tendía a disminuirse en comparación con la pasta de CP, esto se debió a la cantidad de CV que se utilizó como reemplazo parcial, pues de acuerdo a ellos la CV removió los iones de calcio de la solución, lo cual disminuyo su concentración en las primeras horas y se retrasó la cristalización y nucleación de CH y CSH.

Con el incremento en la relación a/c, el efecto de la presencia de CV se volvió más significativo en los periodos de inducción y aceleración. Durante el periodo de aceleración, el incremento en la disponibilidad de agua mejoro el proceso de hidratación y el calor de hidratación aumento debido a que las partículas de CV incrementaron los sitios de nucleación para el crecimiento de los hidratos de cemento.

El uso de 5-15% de MK como material de reemplazo del cemento portland ha sido estudiado mediante calorimetría isotérmica por Poon (2000) Los autores reportaron que la cinética inicial de la reacción puzolánica fue más alta para las pastas de cemento compuesto con MK y el calor total fue ligeramente mayor para las pastas con 5% y 10% de MK al compararlas con la pasta del CP.

Snelson (2008) utilizó MK y CV como materiales de reemplazo del CP para investigar el efecto en la evolución de calor y el calor total liberado. El proceso de hidratación de las pastas de CP reemplazadas con CV cambio con el nivel de reemplazo, pues un incremento en el nivel de reemplazo de CV disminuyo el calor de hidratación. Los resultados en pastas de CP con MK sugirieron que el MK disminuía

inicialmente la hidratación del CP, sin embargo la reacción puzolánica contribuyo a la liberación de calor posterior lo que provoco que la pasta excediera el calor liberado por el CP. Para ambos sistemas el factor principal de control de la cinética de hidratación del CP fue el requerimiento de agua de la puzolana. Cuando se combinó MK y CV en pastas de CP, la actividad puzolánica del MK incremento el calor total liberado.

### 2.3 Definición de Términos

A continuación se definen los términos relevantes que dan fundamentos teóricos al presente trabajo de grado.

**Asentamiento de fundaciones:** cualquier deformación o asentamiento es una función de los esfuerzos efectivos y no así de los esfuerzos totales. Este principio se aplica solamente a esfuerzos normales y no a esfuerzos cortantes.

**Estructura:** conjunto de sólidos resistentes vinculados entre sí, diseñada para resistir combinaciones de fuerzas con un fin determinado.

Plasticidad

**Hormigón:** Denominado concreto en algunos países de Iberoamérica, es el material resultante de la mezcla de cemento (u otro conglomerante) con áridos (grava, gravillay arena) y agua.

**Límite líquido:** es la humedad a partir de la cual un suelo deja de tener un comportamiento plástico y pasa a tener un comportamiento viscoso, es decir, es la humedad límite entre el estado plástico y el estado viscoso. A partir de de esta humedad el suelo fluiría.

**Límite Plástico:** es la humedad a partir de la cual un suelo deja de tener un comportamiento frágil para pasar a tenerlo plástico, es decir, la humedad límite entre el estado sólido y el plástico. A partir de esta humedad, el suelo puede sufrir cambios de forma irreversibles sin llegar a fracturar, y por debajo de esta el suelo no presenta plasticidad.

**Límite de contracción:** El Límite de Contracción es el contenido de humedad al que un suelo pasa de consistencia dura (seco) a friable (húmedo)

**Mezclas:** Una **mezcla** es un material formado por dos o más componentes unidos, pero no combinados químicamente. En una mezcla no ocurre una reacción química y cada uno de sus componentes mantiene su identidad y propiedades químicas.

**Resistencia:** es la intensidad de una acción hipotética que conduce a la estructura o alguna sección a un estado límite de falla, por ejemplo, la resistencia a flexión será el momento máximo que es capaz de resistir la sección.

Partículas no saturables.

**Compactación:** Es el conjunto de procesos mecánicos y químicos (presión-disolución) que, como consecuencia del enterramiento, provocan la disminución del espesor del primitivo sedimento y la reducción de la porosidad



## **CAPÍTULO III**

### **MARCO METODOLÓGICO**

La metodología incluye el tipo o tipos de investigación, métodos y pasos que serán utilizados para llevar a cabo la indagación, Según Galán (2011), es el "cómo se realizará el estudio para responder al problema planteado" (p. 1). En este capítulo se presenta la metodología que permitirá desarrollar el presente Trabajo Especial de Grado. Se muestran aspectos como el tipo de investigación, las técnicas y procedimientos que fueron utilizados para llevar a cabo el estudio en torno al análisis comparativo entre el concreto convencional con el concreto con arcillas expansivas en la construcción en el estado Carabobo.

#### **3.1 Tipo de Investigación**

Por la naturaleza del tema seleccionado, el tipo de investigación a emplear es documental, de acuerdo con Galán (ob. cit) "es aquella que se basa en la obtención y análisis de datos provenientes de materiales impresos u otros tipos de documentos" (p. 1). Es parte esencial de un proceso de investigación científica, constituyéndose en una estrategia donde se observa y reflexiona sistemáticamente sobre realidades teóricas usando para ello diferentes documentos.

#### **3.2 Diseño de Investigación**

Según Fideas G. Arias (1999), define el diseño de la investigación como "la estrategia que adopta el investigador para responder al problema planteado".

Así mismo Fideas G. Arias (2004); la investigación documental se ha establecido que "es un proceso basado en la búsqueda, recuperación, análisis, crítica e interpretación de datos secundarios, es decir, los obtenidos y registrados por otros investigadores en fuentes documentales: impresas, audiovisuales o electrónicas"

Es por ello que el diseño del presente trabajo es de tipo documental, puesto que se basa en la búsqueda, recuperación, análisis, crítica e interpretación de datos obtenidos y registrados por otros investigadores en fuentes documentales impresas, audiovisuales o electrónicas, con el fin de nuevos aportes en conocimientos.

### **3.3 Nivel de la investigación**

Tamayo y Tamayo (2001) señalan que “este lleva implícito una estructura a seguir en la investigación, sobre la cual se ha de ejercer los controles necesarios a fin de encontrar resultados confiables y determinar así mismo su relación con las interrogantes surgidas de los supuestos e hipótesis y del problema”.

Ahora bien, al hablar específicamente de la investigación descriptiva, el hecho de describir, en términos metodológicos consiste en indicar todas las características del fenómeno que se estudia, por cuanto implica por parte de los investigadores en este caso, la capacidad y disposición de evaluar y exponer, en forma detallada, las características del objeto de estudio, ya que evidencia el nivel cognitivo y operativo de conceptos y categorías relacionadas con el tema.

### **3.4 Población y muestra**

Según Arias (2006), la población: “es un conjunto finito o infinito de elementos con características comunes para los cuales serán extensivas las conclusiones de la investigación, quedando delimitada por el problema y objetivos del estudio” (p. 81).

En referencia a lo expuesto, en esta investigación la población corresponderá a la comparación del comportamiento del concreto convencional con el concreto con arcillas expansivas.

Por otro lado, Arias (2006), define la muestra como “un subconjunto representativo y finito que se extrae de la población accesible” (p. 46). Para la presente investigación se utilizara el muestreo seleccionado de la actividad puzolánica, específicamente calorimetría isotérmica y ensayo a compresión tanto del concreto convencional como de las arcillas.

### 3.5 Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

Las técnicas de recolección de datos, según Arias (2011), “son las distintas formas o maneras de obtener la información” (p. 45). Son ejemplos de técnicas documentales la observación documental, análisis documental, las cuales permiten indagar, interpretar, presentar datos e informaciones sobre un tema determinado de cualquier ciencia, utilizando para ello, una metódica de análisis, teniendo como finalidad obtener resultados que pudiesen ser base para el desarrollo de la creación científica. Las técnicas a utilizar son:

**Observación documental:** para Arias (ob. cit) “es una técnica que permite la recopilación de información para enunciar las teorías que sustentan el estudio de los fenómenos y procesos” (p. 46), incluye el uso de instrumentos definidos según la fuente documental a que hace referencia.

**Análisis documental:** de acuerdo con Arias (ob.cit), se basa en la “realización de una exploración de documentos para el acopio de la información necesaria y que, según el criterio establecido de indagación pudiera servir para el desarrollo de la investigación y en consecuencia para el logro de los objetivos planteados” (p. 47). Por ello se estudiaron una serie de documentos que permitieron extraer ideas y comentarios de los diferentes autores e instituciones que tratan el tema sobre el análisis del concreto convencional con el concreto con arcillas expansivas en la construcción.

**Paráfrasis:** quién según Flores (2012), “consiste en reproducir la idea de un autor expresándola con otras palabras” (p. 4). En este trabajo la paráfrasis se utilizó para contrastar y comparar las ideas del autor citado con respecto a las opiniones interpretativas de los investigadores.

**El fichaje:** según Flores (ob. cit), “es una técnica empleada por los investigadores, para recolectar y almacenar información” (p. 4), es decir, para tomar nota de libros o medios impresos y digitales sobre aspectos importantes relacionados con el análisis comparativo entre el concreto convencional con el concreto con arcillas expansivas en la construcción en el estado Carabobo.

**Subrayado:** para Arias (ob.cit), “es identificar las ideas fundamentales de un texto, es el primer paso para poder crear resúmenes y esquemas que más adelante permiten entender y memorizar el tema en cuestión” (p. 56). Para este trabajo de investigación se tomó en consideración los siguientes pasos para aplicar el subrayado: Subrayar los libros adquiridos por los investigadores, subrayar ideas, hechos y conceptos planteados por autores para tener una mayor comprensión de las ideas primarias y secundarias.

Los instrumentos de recolección de información para una investigación documental, según Arias (ob. cit) “son los medios materiales que se emplean para recoger y almacenar la información” (p. 49). Ejemplo: citas o fuentes de información, fichas, subrayado.

**Citas o fuentes de información:** para esta investigación se utilizaron diccionarios, libros de texto, artículos publicados en prensa escrita e Internet, boletines informativos publicados en revista electrónica, monografías publicadas en Internet, libros de texto. Todas estas fuentes y citas consultadas, mostraron información en torno al análisis del tema seleccionado.

**Fichas:** una parte muy importante de la investigación documental lo constituyen los diferentes tipos de fichas, las variantes están en función del tipo de material y de la fuente de la que se extrae la información. Es de ahí donde se toma su información. Entre las fichas empleadas para este trabajo se encuentran: Ficha bibliográfica (libros) sobre estudios del concreto convencional con las arcillas expansivas, ficha hemerográfica (artículo de periódico el Nacional, Últimas Noticias, Economía y Negocios), ficha de información electrónica (información extraída de los medios electrónicos).

A medida que se vayan consultando los libros o cualquier otra fuente para dar fundamento a la investigación, Arias (ob.cit), recomienda “ir haciendo el registro de los datos correspondientes de la teorías consultadas” (p. 49). La ventaja del fichaje para este trabajo, es el ordenamiento de la información recolectada, la cual ha

permitido anotar nombres de autores, temas, títulos, año, páginas, entre otros elementos de carácter bibliográfico.

**Meta-análisis:** es un método de revisión sistemática, el cual permite realizar una evaluación y combina estadísticamente los resultados de investigaciones previas sobre el mismo tema.

### **3.6 Fases metodológicas**

Para llevar a cabo la investigación, se cumplirá con tres fases metodológicas, de acuerdo con los objetivos específicos planteados:

#### **Fase I: Seleccionar literaturas relacionadas con el comportamiento del concreto convencional y el concreto con arcillas**

Mediante el uso de la base de datos bibliográficos multidisciplinarios del grupo Elsevier, llamada Science Direct se llevó a cabo la búsqueda de la literatura que fue analizada posteriormente. Para la selección de la misma se tomó en cuenta estudios en los cuales realizaron prueba de calorimetría y ensayo de resistencia a la compresión en concreto convencional y en concreto con arcillas. Tales características limitaron la cantidad de estudios, por tal motivo quedaron seleccionados seis estudios.

#### **Fase II: Analizar detalladamente los materiales y métodos usados por los autores en las prueba de calorimetría isotérmica y ensayos a compresión en al concreto convencional y concreto con arcillas.**

Obtenidos los seis estudios, se realizó un análisis que permitió conocer los materiales y métodos usados por los autores en cada uno de los ensayos. Con esta información se determinó los factores y variables que le dieron validez de contenido al trabajo de investigación, lo cual se llevó a cabo mediante la realización de un diagrama llamado Causa- Efecto del Profesor Kaoru Ishikawa.

#### **Fase III Comparar resultados de calorimetría del concreto convencional con la del concreto con arcillas a través de estudios previos.**

Se realizó un monitoreo de la reactividad puzolánica, específicamente la calorimetría isotérmica haciendo uso de un diagrama de bosque que ilustró los efectos estimados

en términos de diferencias de medias estandarizadas (SMD) de pendientes en la fase de aceleración inicial de hidratación de los seis estudios calorimétricos tanto para los sistemas ternarios con arcilla (STA) como para el cemento portland ordinario (CPO).

**Fase IV: Comparar resultados de ensayos a compresión realizados al concreto convencional y al concreto con arcillas basados en los estudios previamente seleccionados**

Se elaboró un Diagrama de bosque donde se mostró los resultados de los seis estudios que evaluaron el impacto de incorporar arcillas sobre la resistencia a la compresión del cemento convencional.

## **CAPÍTULO IV**

### **RESULTADOS**

Este capítulo se enfocó en desarrollar cada uno de los objetivos planteados dentro de la investigación dirigida al análisis comparativo del concreto convencional con el concreto con arcillas para la construcción en el Estado Carabobo. Con los resultados obtenidos, se llevó a cabo un estudio correspondiente a las actividades de reactividad puzoláica, específicamente Calorimetría Isotérmica y ensayo a compresión del concreto convencional y el concreto con arcillas expansivas, así mismo se realizaron una serie de recomendaciones que puedan ser tomadas en cuenta para posteriores investigaciones.

#### **4.1. Seleccionar literaturas relacionadas con el comportamiento del concreto convencional y el concreto con arcillas.**

Para dar una mejor comprensión al lector, a continuación se extiende la explicación de cómo se llevó a cabo la selección de las literaturas estudiadas en el siguiente trabajo de investigación. Mediante el uso de la base de datos Science Direct, se colocó en el buscador de dicha base de datos palabras como concreto y arcillas, seguidamente se redujo la búsqueda usando los términos de calorimetría isotérmica y ensayo de resistencia a la compresión. Finalmente se seleccionó aquellos que en su procedimiento usaron las actividades anteriormente nombradas.

#### **4.2. Analizar detalladamente los materiales y métodos usados por los autores en la prueba de calorimetría isotérmica y ensayos a compresión en al concreto convencional y concreto con arcillas.**

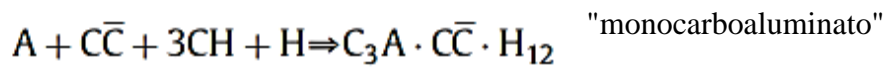
Para el desarrollo de esto objetivo se tomaron cada uno de los estudios seleccionados y se analizó detalladamente los materiales y métodos empleados para su realización.

En primer lugar se encuentra el estudio titulado “**Sustitución de cemento por una combinación de metacaolín y piedra caliza**” el cual fue realizado por M Antoni, en el Laboratorio de Materiales de Construcción, Station12, CH-1015 Lausanne, Suiza

en el año 2012.

Procedimiento experimental:

La formación estequiométrica del hidrato de monocarboaluminato (MC) se consideró: 1 mol de metacaolín reacciona con 1 mol de calcio carbonato en presencia de exceso de iones de calcio en solución acuosa para dar 1 mol de MC (ecuación (1)). Esto corresponde a una adición con una relación de peso de metacaol 2: 1: piedra caliza.



Un cemento Portland (PC) que contiene solo pequeñas cantidades de piedra caliza se utilizó. El polvo de piedra caliza (LS) era Durcal 15 de Omya, Suiza. Se usó metacaolín (MK) Optipozz de alta pureza producido por calcinación instantánea por Burgess (EE.UU.). Detalles de su producto químico composición, distribuciones de tamaño y composición de refinamiento Rietveld normalizado para el contenido cristalino total para OPC .

### **Calorimetría Isotérmica**

La Figura8 muestra los resultados de calorimetría isotérmica temprana para las mezclas, normalizadas con respecto al contenido de cemento Portland. Se usó la misma cantidad de plastificante (2% en peso de aglutinante) en todas mezclas. La pendiente del período de aceleración aumenta con el nivel Además, lo que sugiere que el metacaolín proporciona nucleación adicional sitios para C-S-H [21]. El grado de reacción del cemento Portland componente durante el pico principal también se ve reforzada por la dilución efecto.

El uso de tales arcillas calcinadas con alta área superficial modifica significativamente la reactividad de las fases de aluminatos. Cuanto mayor sea el nivel de metakaolin en la mezcla, el más fuerte y más temprano es el pico de aluminato correspondiente a la depleción de sulfato. Un pequeño y ancho pico de hombro se ve en el cemento Portland simple con baja Contenido de  $C_3A$ , correspondiente a la segunda formación de etringita, con un pico posterior aún más bajo y más amplio asociado a conversión de etringita en monosulfato. Sin embargo en presencia de Metacaolín el primer pico de aluminato aumenta en intensidad, es más estrecho y ocurre antes. El segundo pico de "conversión" ocurre mucho antes en el B45 y se fusiona con el primer pico en el caso de un mayor porcentaje de mezcla. Todavía no está claro cómo Metacaolín contribuye a este pico, se puede suponer que proporciona una cantidad considerable de nueva superficie para heterogénea nucleación de hidratos. No fue posible determinar si aluminatos procedentes de la metacaolina también participan en la reacción en esta etapa.

### **Ensayo Resistencia a la Compresión**

Los valores de resistencia a la compresión se dan en la figura 9 y resistencia relativa a la compresión en comparación con PC y referencia de cuarzo es dado en la figura 10. El 15% de la mezcla B15 tiene mayor resistencia que el 100% de referencia de PC en todas las edades. Las otras mezclas tienen menores resistencias en 1 día, pero las mezclas 30% y 45% muestran una mayor resistencia con respecto a PC a los 7 y 28 días. Incluso la mezcla al 60% tiene el 93% de Resistencia de PC a los 28 días (330% de la referencia del 60% con relleno inerte).

Las resistencias a la flexión (no se muestran) a nivel mundial siguen las mismas tendencias que fuerzas de compresión. Todas las mezclas, incluida la mezcla del 60%, muestran resistencia a la flexión más alta o similar con respecto a la PC pura en 7,28 y 90 días.

Este estudio muestra que las sustituciones acopladas de metacaolín y piedra caliza para cemento Portland pueden proporcionar un rendimiento excelente a edades

relativamente tempranas. Hasta un 45% de sustitución, una mezcla 2: 1 de metacaolín y piedra caliza produce mejores propiedades mecánicas a los 7 y 28 días que la referencia de cemento Portland al 100%. Incluso una sustitución del 60% tiene un 93% de la resistencia de referencia pura de Portland a los 28 días.

También se demostró que el nivel de adición de sulfato tiene un efecto importante sobre las resistencias tempranas de las mezclas. En sistemas que contienen grandes volúmenes de arcillas calcinadas, el contenido de sulfato debe ajustarse para evitar la formación de una capa inferior.

Por otra parte se encuentra el segundo estudio, el cual lleva por título: **“Superplástico a base de poli (éter de carboxilato) modificado para aumentar la fluidez de la arcilla calcinada -piedra caliza-yeso mezclado de cemento Portland”**, el mismo fue realizado por Omid Akhlaghi en la Facultad de Ingeniería y Ciencias Naturales, Universidad de Sabanci, Estambul 34956, Turquía y los resultados de su estudio los obtuvo del Laboratorio de materiales de construcción, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, CH-1015 Lausana, Suiza.

Informa el rendimiento de una serie de superplastificantes (PCE) basados en poli (éter de carboxilato) modificados en una mezcla terciaria OPC calcinada de arcilla y caliza. Realizó: i) un comonomero con alto carácter iónico, ácido 2-acrilamido-2metilpropano sulfónico (AMPS) para ser incorporado en la columna vertebral de ácido acrílico de PCE y ii) baja densidad de cadenas injertadas de polietilenglicol (PEG)  $<0.01$  mol / mol. El polímero optimizado no se intercala en la estructura estratificada de la arcilla calcinada y conserva su tamaño estérico en presencia de altas concentraciones de iones sulfato.

#### Materiales y dosificación:

El cemento portland ordinario (OPC-CEM 1 42.5 R) fue provisto por una compañía local de cemento (AKCANSA). El carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) se adquirió en SigmaAldrich. La arcilla se calcinó a  $800^\circ\text{C}$  en un horno rotatorio semi-

industrial con un tiempo de residencia de 15 min. El análisis de Rietveld sobre arcilla calcinada mostró que contiene un 42% de caolinita calcinada (meta caolín) y el resto es caolinita no calcificada, cuarzo (16%) y trazas de illita, anatasa y hematita (en total <2%). También observamos la estructura en capas en partículas de arcilla después de la calcinación

En la Tabla 7 se encuentran los diferentes cantidades de arcilla calcinada, piedra caliza y yeso se mezclaron primero en seco con OPC durante 5 min para formular aglutinantes de composiciones variables.

Name of binder	OPC %	Calcined clay %	Limestone %	Gypsum %	Quartz %
OPC	100	0	0	0	0
C45	55	45	0	0	0
L5	55	40	5	0	0
L10	55	35	10	0	0
L15	55	30	15	0	0
G5	50	30	15	5	0
G3	55	28	14	3	0
G1.5	55	29	14.5	1.5	0
Q45	55	0	0	0	45

Tabla 7

Fuente:

### **Calorimetría isotérmica**

Se utilizó un calorímetro isotérmico TAM Air de Thermometric. Consiste en 8 canales paralelos de medición de tipo gemelo. Una celda está dedicada a la muestra y la otra a un recipiente de referencia. La referencia buque, que contiene ~ 3 g de agua

desionizada se utilizó para reducir la relación de señal a ruido y para corregir los artefactos de medición y temperatura.

Se usaron ampollas de vidrio de 20 ml tanto para la muestra como para el contenedor de referencia. Cada canal es independiente del otro canal y fue calibrado antes de comenzar los experimentos. La línea de base se registró durante aproximadamente 30 minutos antes de la colocación de las ampollas dentro del calorímetro y 30 minutos después de retirar las ampollas. Los El procedimiento para mezclar fue de 2 minutos de mezclado mecánico seguido de colocación inmediata de las ampollas dentro del calorímetro, para controlar la hidratación desde el primer momento posible. Todos los sistemas eran mezclado en una proporción de agua a cemento ( $w / c$ ) de 0.4 con agua desionizada. Los la masa de pasta fue  $\sim 10$  gy los valores de calor se normalizaron a la carpeta masa.

La adición de yeso cambió el comportamiento de retención de asentamiento de las pastas (G1.5 y G3): un mayor porcentaje de yeso conduce a una mayor pérdida de asentamiento con el tiempo. Para comprender el efecto del yeso en cinética de reacción, la calorimetría isotérmica se realizó en OPC, G1.5, y G5 Ver figura 11

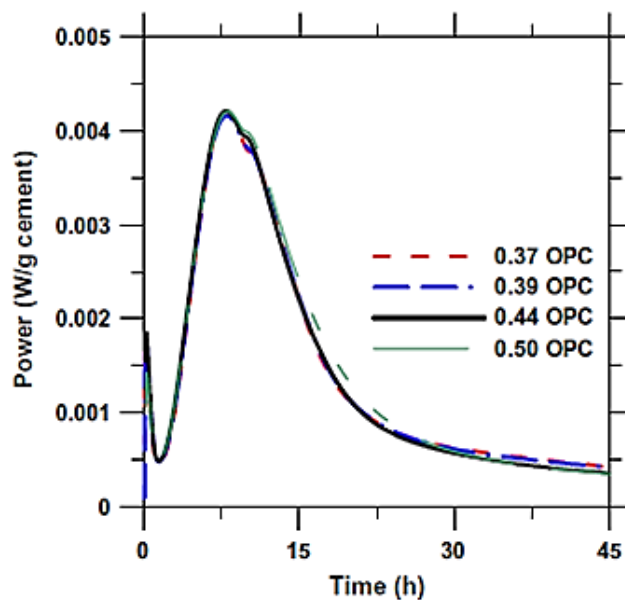


Figura 11

Fuente:

. En general, la evolución del calor en OPC hidratante comprende 4 etapas; i) disolución, ii) inducción, iii) aceleración, y iv) período de desaceleración. Como se ve en la figura, la adición de 1% en peso de AMPS-PCE2 se prolongó el período de inducción para todas las mezclas estudiadas. Esta prolongada inducción período puede atribuirse al efecto obstaculizador de los copolímeros adsorbidos en la disolución de fases de silicato (es decir, efecto de retardo)

Sin embargo, este efecto se puede minimizar en el caso de mezclas con calcinado arcilla-piedra caliza-yeso porque la reacción tiene lugar antes. La reacción en los aluminatos parece estar poco influenciada por adición de polímeros pero principalmente controlada por la presencia de yeso.

### Fuerza compresiva

Moldes de plástico con un diámetro de  $26.2 \pm 0.3$  mm y una altura de  $53 \pm 1$  mm se utilizaron para obtener muestras cilíndricas para compresión pruebas. Después de colar las pastas, todos los contenedores se sellaron durante 24 h seguidos Desmoldeando y colocando en agua a  $22 \pm 2$  ° C hasta 28 días. Se examinó la resistencia a la compresión de especímenes a diferentes edades por la máquina de prueba Zwick / Roell Z100 según EN-196 estándar. Ver Figura 12

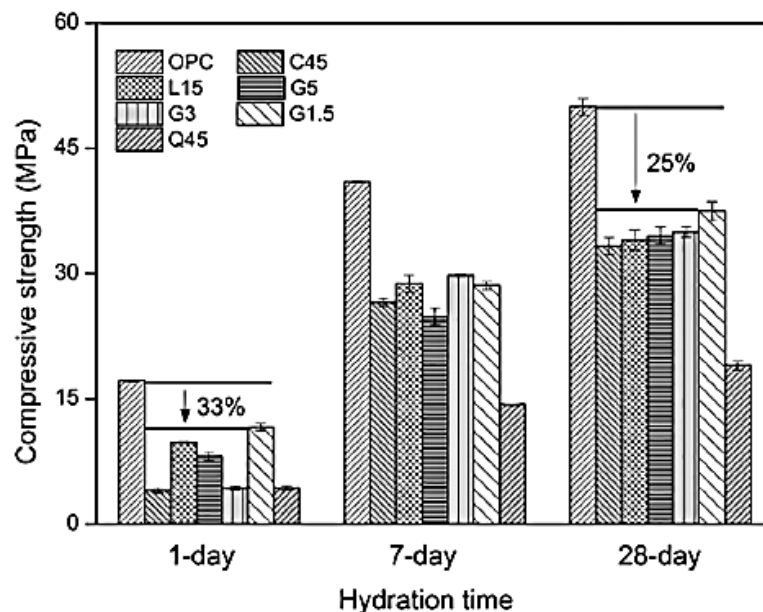


Figura12

Fuente:

La figura 12 muestra la resistencia a la compresión de las mezclas hidratadas en diferentes edades. Todas las mezclas muestran una resistencia menor en comparación con la referencia Muestra OPC. La muestra G1.5 exhibió la mayor fortaleza entre las mezclas en 1 día y 28 días que son 67% y 75% de la Resistencia de OPC, respectivamente. Vale la pena mencionar que no hay yeso real el ajuste se aplicó de acuerdo con la composición del cemento.

La muestra con 45% de sustitución de cuarzo (Q45) mostró una mayor contenido de CH en comparación con OPC en todas las edades. Este comportamiento puede ser atribuido al espacio extra y / o sitios de nucleación disponibles para el hidratos (efecto de relleno). Por otro lado, C45 (45% de sustitución de arcilla) muestra un bajo contenido de CH en comparación con OPC que indica el significativo actividad puzolánica de arcilla calcinada en la mezcla. En acuerdo con informes previos sobre mezclas de arcilla OPC altamente sustituidas, este nivel de hidróxido de calcio limita el desarrollo de la fuerza a largo plazo de la mezcla. Por lo tanto, las mezclas OPC altamente sustituidas requieren extra CH para reacción puzolánica para formar hidrato de silicato de calcio (C-S-H) y la adición de cal externa puede compensar la falta de CH.

Después de la sustitución parcial de arcilla con piedra caliza y yeso (L15, G1.5, y G3) el contenido de CH a 1 día se volvió más alto que el de C45. Este aumento demuestra que la cinética de hidratación está dominada por la efecto de relleno ya que no se espera actividad puzolánica de la piedra caliza. En edades posteriores, estas muestras mostraron considerables reacciones puzolánicas, como lo indica el agotamiento del contenido de CH hacia 28 días de hidratación. Según Antoni (2012)

La alta tasa de ganancia de fuerza en mezclas ternarias se debe a una fuerte reacción sinérgica entre calcinado arcilla y piedra caliza para formar fases de mono / hemi carboaluminato. Notablemente, la mayor tasa de ganancia de fuerza en todas las muestras se observó en G1.5

Una vez realizado el estudio se sintetizó una serie de copolímeros , y se probó su capacidad para dispersar las partículas de aglutinante (OPC, arcilla calcinada y piedra caliza) y para proporcionar retención de fluidez en la pasta de cemento mezclado. Se encontró que los PCE modificados dispersan las mezclas incluso a un alto contenido de arcilla y una alta concentración de iones sulfato.

Seguidamente se encuentra el tercer estudio que lleva por título: **“Influencia de las condiciones de envejecimiento sobre las propiedades de la arcilla calcinada y su rendimiento como material cementante suplementario”**, realizado por Ricarda Gmür, en el Instituto de Materiales de Construcción de la Universidad de las Fuerzas Armadas Federales de Munich, 85577 Neubiberg, Alemania.

La investigación tuvo como objetivo determinar un posible impacto de diversas condiciones de envejecimiento en las arcillas calcinadas y su rendimiento como material cementoso suplementario (SCM). Dos arcillas calcinadas fueron expuestas a seis condiciones de envejecimiento diferentes. Se midieron parámetros químico-mineralógicos y físicos para revelar posibles cambios. El envejecimiento de las arcillas calcinadas a una humedad relativa alta o en una atmósfera con un 3% de CO<sub>2</sub> dio como resultado una mayor área superficial específica y una mayor demanda de agua. Esto se debió en parte a la formación de calcita y yeso. Este último promovió el desarrollo de calor de hidratación. El envejecimiento de las arcillas calcinadas tuvo una influencia insignificante sobre las propiedades del mortero fresco y no tuvo un efecto claro sobre la resistencia del mortero fabricado con estos SCM. No obstante, la mayoría de los valores de resistencia a la flexión y la compresión de las mezclas que contenían un 20% de arcilla calcinada envejecida fueron mayores que las mezclas de referencia fabricadas solo con cemento.

## **Materiales y Métodos**

La arcilla cruda se origina geológicamente a partir de una capa del delta del Lias (Jurásico Inferior Pliensbachiano). Fue extraído de un pozo de arcilla en Unterstürmig, Franconia, Alemania. Arcilla de capa mixta con bajo el contenido de caolinita, ver tabla había sido aplastado groseramente a tamaño de partícula máximo de aproximadamente 100 mm justo después de su entrega y posteriormente alimentado en un horno rotatorio tripartito normalmente utilizado para la producción de arcilla expandida. La arcilla fue calcinada en dos lotes a temperaturas máximas de 850 ° C (designación: CT1) y 750° C (CT5). Durante este proceso, ambas arcillas calcinadas fueron expuesto a un impacto combinado de gradientes de temperatura y humedad. Por lo tanto, los siguientes métodos de prueba no solo respetan el impacto de diferentes condiciones de envejecimiento pero también diferentes calcinaciones temperaturas sobre los posibles efectos del envejecimiento. El combinado impacto higrotérmico junto con la acción mecánica mientras pasar por el horno rotatorio redujo el tamaño de las partículas.

Por lo tanto, las partículas de arcilla calcinadas resultantes tenían un máximo más pequeño tamaño de hasta 40 mm. El tipo de equipo de molienda utilizado para ambos arcillas calcinadas era la segunda diferencia entre ellos además las temperaturas de calcinación. Mientras que CT1 se molió en una industria molino de bolas, CT5 se molió en una fábrica de rodillos industriales. Esta prueba a escala industrial no tuvo impacto en los resultados presentados aquí.

Un cemento CEM ordinario I 32.5 R, que cumple con La norma europea EN 197-1 se usó para pruebas de mortero. El análisis químico de la arcilla cruda se llevó a cabo mediante rayos X. fluorescencia (XRF) usando un Bruker S2 Ranger. El productor de cemento proporcionó el análisis químico del cemento y su potencial composición compuesta. La Tabla 1 contiene la composición química datos para los materiales usados.

La densidad de partículas se determinó mediante un picnómetro de gas (Helio Pycnomatic ATC, ThermoFisher Scientific). Áreas de superficie específicas de las materias primas se midieron según DIN ISO 9277 (método BET) mediante un analizador SA-9601 MP (Horiba Instruments) C<sup>a</sup>). Las muestras fueron pretratadas a 200 ° C bajo nitrógeno flujo antes de que comenzaran las mediciones. Agua la demanda de las arcillas calcinadas se determinó de acuerdo con Puntk. El método determina el paquete de partículas más denso por el mínima demanda de agua necesaria para saturar un polvo como caliza pulverizada o arcilla calcinada. Siempre y cuando el polvo está humedecido pero no saturado, el ajuste de las partículas se previene debido a la tensión capilar.

Al agregar agua gota a gota a la muestra, se encuentra el punto de saturación exacto, para qué tensión capilar se pierde y el volumen vacío se reduce al mínimo. Estas pruebas siempre se triplicaron y de acuerdo con Puntke, la menor demanda de agua es relevante. El potencial de reacción era evaluado en una prueba de elución de 20 h. En cada caso, 1 g de arcilla calcinada se dispensó en 400 ml de hidróxido de sodio al diez por ciento. Los concentraciones resultantes de silicio soluble y iones de aluminio se determinaron posteriormente con la ayuda de inductivamente plasma acoplado - espectroscopia de emisión óptica (ICP-OES). Ver Tabla 8

Oxides	Portland cement <sup>a</sup>	Raw clay
SiO <sub>2</sub>	19.3	52 ± 2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.6	21 ± 1
CaO	57.5	3 ± 1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.9	8 ± 1
MgO	0.8	2 ± 0.5
K <sub>2</sub> O	0.7	3 ± 1
Na <sub>2</sub> O	0.1	0.4 ± 0.1
SO <sub>3</sub>	2.6	1 ± 0.5
TiO <sub>2</sub>	0.2	1 ± 0.5
Na <sub>2</sub> O equivalent	0.6	
Bogue potential compound <sup>a</sup>		
C <sub>3</sub> S		52
C <sub>2</sub> S		18
C <sub>3</sub> A		7
C <sub>4</sub> AF		9

Tabla 8

Fuente: R. Gmür (2016)

### **Calorimetría Isotérmica**

La figura 12, muestra las curvas de flujo de calor del cemento puro y composiciones aglutinantes que contienen un 20% de arcilla calcinada como SCM. Las curvas están normalizadas con respecto a la carpeta total contenido. Durante el período de aceleración, todas las pastas que contienen la arcilla calcinada exhibe un flujo de calor máximo más bajo en comparación con la pasta de cemento puro debido al efecto de dilución.

Algunos SCM como el humo de sílice y el metacaolín altamente reactivo acelerar el calor de hidratación debido a la actividad puzolánica temprana, mientras otros como, por ejemplo, la ceniza volante ralentiza la reacción. Este último sostiene para las arcillas calcinadas también, que retrasan el tiempo  $t_{Q_{max}}$  hasta el el flujo de calor máximo  $Q_{max}$  se alcanza en 1 h en promedio.

De nuevo, la muestra hecha con CT5 20 / CO<sub>2</sub> se comporta de manera algo especial, con un retraso inicial durante la fase de inicio y un pico bastante amplio son las razones por las cuales  $Q_{max}$  se logra con dos horas y media de retraso. CT5 20/90 y CT5 al aire libre, por otro lado parecen acelerar la hidratación ya que su  $Q_{max}$  ocurre aproximadamente media hora antes que para la pasta de cemento puro. En promedio, las arcillas calcinadas envejecidas causan menos retraso que la arcilla calcinada almacenada de referencia en  $Q_{max}$ .

Se produce un pico inferior secundario para la pasta de cemento puro en 13 h. Indica la formación retardada de etringita y AFfases. Está bien establecido para pastas hechas con arcillas calcinadas envejecidas, que ya promovieron la hidratación de

antemano (CT5 20/90 y CT5 al aire libre). En el caso de pasta que contiene moderadamente arcilla calcinada almacenada este pico disminuye casi por completo. De hecho, también aparece antes en comparación con las pastas que contienen arcillas almacenadas bajo condiciones de referencia y, por lo tanto, el segundo pico es cubierto por el primer pico aplanado. El impacto diferente observado de las arcillas calcinadas se puede atribuir a la formación de yeso y calcita. Más allá del segundo pico, el flujo de calor del cemento puro disminuye más rápido y después de 15e23 h cae por debajo de las curvas para pastas que contienen arcilla calcinada

### **Resistencia a la Compresión**

Morteros hechos con 20% de arcilla calcinada como SCM logrado en partes valores de resistencia a la compresión significativamente más altos a los 28 días en comparación con el mortero de cemento puro. En el caso de CT1, las condiciones moderadas de envejecimiento en 20/65 y 40/65 arrojaron resultados como la referencia almacenada arcilla calcinada. Exposiciones a 20 / CO2 y 20/90 redujo la ganancia en resistencia a la compresión para CT1. Solamente la resistencia a la compresión de los prismas hechos con la arcilla calcinada almacenados al aire libre no podría alcanzar el nivel de resistencia de la referencia mortero de cemento. La resistencia a la compresión de los morteros con CT5 es menor en promedio que la fuerza del CT1, pero además de los prismas hechos con la arcilla calcinada almacenada a 20/90, todos están en el mismo nivel de fuerza.

La reactividad de las arcillas calcinadas envejecidas es bastante alta, ver en figura 14, el índice de reactividad es el cociente de las resistencias a la compresión obtenido para mortero con SCM y el obtenido con la referencia mortero hecho con cemento 100% como aglutinante. Es 0.86 solo para dos muestras que contienen CT1 20/90 y CT5 al aire libre, pero varía para las otras muestras envejecidas de 1.02 a 1.15 para CT1 y 1.02 a 1.06 para CT5 respectivamente. Esto corresponde a valores normalmente obtenidos para morteros hechos con arcillas altamente caolínicas incluso con metacaolín puro, como SCM. Tanto calcinación las temperaturas exhiben una cierta ventaja. Es interesante notar para el uso práctico futuro de arcilla calcinada, CT1 rinde más valores máximos pero parece ser algo más sensible en comparación

con CT5. Por lo tanto, la temperatura de calcinación más baja es de 750 ° C es más recomendable para futuras aplicaciones.

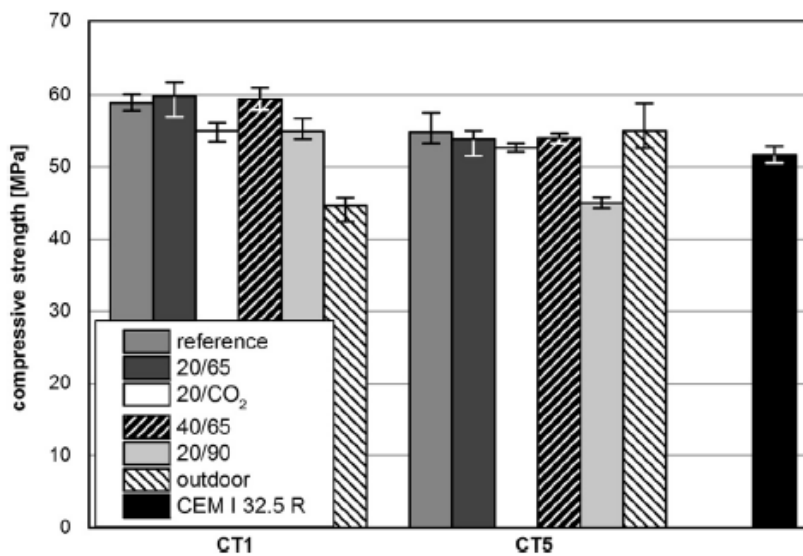


Figura 14

Fuente:

R. Gmür (2016)

Debido a su composición mineralógica, las arcillas de capa mixta calcinadas representan una opción no solo atractiva como el SCM futuro, sino que también presentan una robustez extraordinaria frente a diversas condiciones ambientales. Se pueden almacenar durante un período más prolongado sin medidas de protección especiales, incluso en ambientes cálidos y húmedos.

Por su parte se tiene el cuarto estudio analizado, el cual lleva por nombre **“Efecto del reemplazo del humo de sílice con arcilla calcinada sobre la hidratación y el desarrollo microestructural de Hormigones Reforzados con**

**Fibra de Ultra Alto Rendimiento (UHPFRC)**”, realizado por Wei Huang en la Escuela de Ciencia e Ingeniería de Materiales, Southeast University, Nanjing 211189, China. Los ensayos se llevaron a cabo en el Laboratorio de Materiales de Construcción, Instituto Federal Suizo de Tecnología (EPFL), Ecublens, 1015 Lausana, Suiza.

#### Materiales y métodos

La mezcla de referencia en esta investigación se basa en nuestra anterior estudio que mostró un buen rendimiento mecánico para un sistema que contiene 54% de piedra caliza (por volumen) en el aglutinante. Las materias primas selected were CEMI 52.5 N tipo de cemento, humo no densificado Grado de sílice 971-U de Elkem y Betocarb HP-OG piedra caliza de Omya. En esta investigación, se usaron dos grados de arcilla calcinada para reemplazar el humo de sílice por volumen: un metacaolín comercial con 95% caolinita producida por calcinación instantánea de Burgess y arcilla calcinada con 79% de caolinita de India obtenida por calcinación a 800 ° C para 60 min.

Además del reemplazo del humo de sílice por arcilla calcinada, las diferencias menores entre las formulaciones investigadas y la referencia mezcla son la modificación de la distribución del tamaño de la piedra caliza y el ligero aumento en el contenido de agua. Esta modificación fue hecha porque el reemplazo de humo de sílice por arcilla calcinada sin ningún otro cambio en la receta de referencia condujo a una mala reología, debido a la pobre partícula

Todos los experimentos se llevaron a cabo a 20 ° C. Los polvos secos eran mezclado durante 3 minutos usando un mezclador de paletas a 61.5 rpm. Agua y superplastificante se agregaron entonces; tan pronto como los polvos cambian en un estado casi líquido, la pasta se mezcló durante 2 minutos a 123 rpm, seguido por 1 minuto a 61.5 rpm. Las muestras de mortero (pegar con arena) se moldearon en moldes de prisma de 40 × 40 × 160 mm<sup>3</sup> y luego se sellaron curado a 20 ° C. Las muestras de pasta (sin arena) se moldearon en forma cilíndrica moldes de poliestireno

(34 mm Ø × 50 mm h), y luego sellados curado a 20 ° C. En las muestras de pasta en cada edad, la hidratación era detenido al sumergir rodajas de 3 mm de espesor cortadas de los cilindros en isopropanol durante 7 días; luego las rebanadas fueron almacenadas en un desecador al vacío durante al menos 3 días para eliminar el alcohol antes de más preparación.

La prueba de resistencia a la compresión se llevó a cabo en 1, 3, 7, 14, 28 y 56 días con una tasa de carga de 1,5 kN / s; los valores promedio son calculados basados en seis muestras de cubo con dimensiones de 40 mm, cortadas de Prisma de mortero 40 × 40 × 160 mm<sup>3</sup>. Los cubos se usaron en lugar del método normal de probar primero los prismas en flexión y luego hacer prueba de compresiones en los extremos rotos, ya que la naturaleza frágil del UHPC sin fibras provoca múltiples fracturas en la flexión.

La calorimetría de conducción isotérmica (TAM Air de TA Instruments) se utilizó para seguir la evolución de la liberación de calor hasta 28 días. Se insertaron alrededor de 10 g de pasta mezclada a 20 ° C lo más rápido posible en la ampolla que luego se selló con una tapa y se colocó en el calorímetro.

#### Calorimetría Isotérmica:

El efecto del cambio en los tamaños de partícula de los polvos de piedra caliza sobre la evolución del calor de los sistemas UHPC se muestra en la Figura 15. Se puede ver que los cambios en los polvos de piedra caliza y también la proporción de agua a cemento de 0,35 a 0.36 resulto en poco efecto en la evolución del calor de hidratación, a pesar de que hay un cambio hacia la izquierda en la cinética.

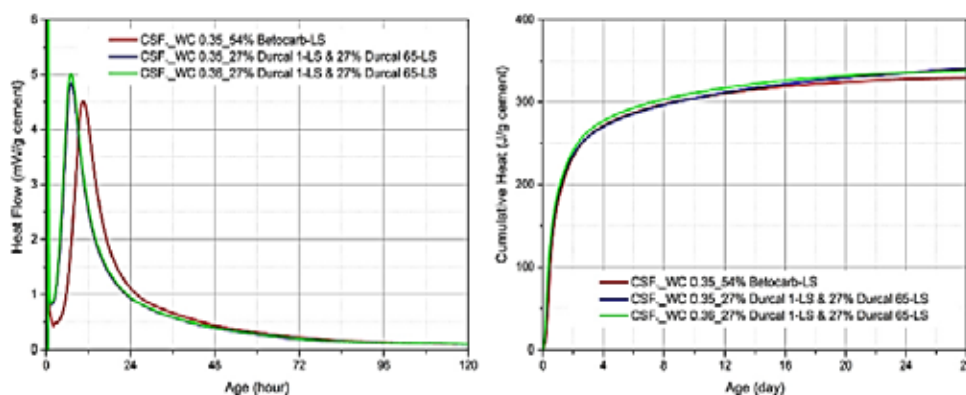


Figura 15

Fuente: , W. Huang y col. / (2017)

Sin embargo, tenga en cuenta que los calores acumulados generales son muy similares, por lo que se decidió utilizar los resultados experimentales de la mezcla de UHPC con 54% de caliza de Betocarb y  $W / C = 0,35$  previamente presentado como referencia para comparar con las mezclas de arcilla calcinada con dos diferente tamaños de calizas

La Figura 16 muestra el flujo de calor (izquierda) y el calor acumulado (derecha) de la mezcla de referencia, y el UHPC se mezcla con las arcillas calcinadas. En comparación con la mezcla de referencia, la mezcla UHPC\_CC\_I muestra una evolución de calor similar hasta 3 días de hidratación. Sin embargo, se observó un mayor calor acumulado después.

En el caso de la mezcla UHPC\_CC\_B donde se usó metacaolín, el período de latencia se extendió debido al efecto de retardo de una mayor cantidad de superfluidificante, seguido por un pico de calor inferior y posterior. Sin embargo, después de 7 días, el calor acumulado siguió la misma tendencia a partir de la mezcla UHPC\_CC\_I que era más alta que la mezcla de referencia.

#### **Ensayo Resistencia a la Compresión:**

El desarrollo de la resistencia a la compresión de las mezclas UHPC se muestra en la Figura 17, el menor valor de resistencia de la mezcla UHPC\_CC\_B en un día de edad se debió a la gran cantidad de superplastificante utilizado en la mezcla; el efecto de retardo del superfluidificador desapareció a la edad de 7 días. Se puede observar que el UHPC\_CC\_I tuvo un desarrollo de resistencia muy similar en comparación

con la formulación de humo de sílice de 1 a 14 días. Después de 14 días, la mezcla de control ganó más fuerza que la de la arcilla calcinada. Sin embargo, es interesante observar que a los 28 días y 56 días la fuerza de la mezcla UHPB\_CC\_I era más alta que la de la mezcla UHPC\_CC\_B a pesar de tener caolinita más baja.

En este trabajo, se investigó la influencia del reemplazo del humo de sílice por la arcilla calcinada en volumen sobre la hidratación y el desarrollo microestructura de UHPC donde la piedra caliza ya reemplazó el 54% del cemento por volumen. De acuerdo con los resultados experimentales, se pueden establecer las siguientes conclusiones.

El uso de arcilla calcinada para reemplazar el humo de sílice en una mezcla de UHPC da fuerzas de compresión comparables. La resistencia a la compresión de la mezcla con arcilla calcinada con 79% de caolinita es mayor que la de la mezcla de metacaolín con 95% de caolinita; ambas mezclas tenían valores de resistencia comparables pero un poco más bajos en comparación con la mezcla de humo de sílice; a los 28 días los valores de resistencia fueron 10.4% y 2.3% menores que la mezcla de humo de sílice en las mezclas con metacaolín (UHPC\_CC\_B) y arcilla calcinada con menor cantidad de caolinita (UHPC\_CC\_I), respectivamente.

La sustitución del humo de sílice por arcilla calcinada refinó el radio de poro crítico en UHPC, sin embargo, este refinamiento de la estructura del poro no mejoró la resistencia a la compresión. Una mezcla de UHPC donde la arcilla calcinada con una cantidad relativamente modesta de caolinita reemplaza el humo de sílice y la piedra caliza con PSD similar a la del cemento reemplaza al cemento, no solo tiene una huella de carbono mucho menor en comparación con un UHPC clásico, sino también su precio un tercio.

Así mismo se presenta el quinto estudio titulado “**Cinética de hidratación y mecanismos de carbonatos de desechos pétreos en mezclas ternarias con arcilla calcinada**”, realizado por Sreejith Krishnan, en el Departamento de Ingeniería Civil,

Instituto Indio de Tecnología Delhi, Nueva Delhi 110016, India. Cemento Pórtland ordinario de grado 43 (OPC) conforme a BIS 8112 - 2013 disponible en el mercado se utilizó para este estudio.

El cemento utilizado no contenía piedra caliza como relleno. Esto aseguró que el polvo de piedra contribuye únicamente a la fuente de carbonato en las mezclas estudiadas. El análisis cuantitativo de la fase XRD de Rietveld del cemento se realizó usando el paquete de software Rietveld disponible comercialmente (TOPAS v5 de Bruker AXS). La arcilla caolinítica cruda se recogió de una mina de arcilla en Bhuj, Gujarat y se calcinó en un horno rotatorio. La caolinita en las arcillas al calentarse se transforma en metacaolín amorfo, que luego puede usarse como material puzolánico. La calcinación o la deshidroxilación de la caolinita ocurren dentro del rango de temperatura de 600°C-900°C. Se aseguró que la temperatura dentro del horno rotatorio no excediera los 900 ° C para prevenir la formación de mullita cristalina no reactiva.

Los polvos de piedra se secaron a 105 ° C durante 24 h en un horno para eliminar cualquier humedad residual presente y se trituraron con un molino de bolas de laboratorio para aumentar la finura. El polvo de mármol, KG contiene calcita y dolomita como fases principales, siendo el cuarzo y otros minerales de arcilla las fases menores, mientras que el polvo de mármol BA tiene dolomita como fase principal. El cuarzo y la calcita fueron las principales fases presentes en el polvo de piedra Kota.

### **Calorimetría Isotérmica**

Se realizaron estudios calorimétricos para comprender el efecto del polvo de piedra (principalmente la composición) sobre la tasa de hidratación y la energía total liberada. Las pruebas se realizaron en muestras de pasta (w / c 0.45) hasta 24 h (usando Calmetrix I-Cal 8000). La calorimetría isotérmica ayuda a medir la velocidad de evolución del calor en muestras de pasta hidratante, mortero u hormigón, lo que es

útil para comprender la cinética de la reacción. El calor producido se transfiere a un disipador de calor, midiéndose la tasa de calor usando un sensor.

La tasa de evolución del calor para las mezclas de polvo de piedra se muestra en la Figura 17. La composición química de los polvos de piedra no parece tener un efecto significativo en la velocidad de evolución del calor, la energía idéntica liberada por todos los LC3 mezclas durante las primeras 24 h de hidratación ver Figura 18. En OPC y O45Q, el pico de hidratación principal ocurre alrededor de las 8 h. En las mezclas LC3, esto fue alrededor de 4.5-5 h. Esto se puede atribuir a la presencia de arcilla calcinada, ya que el desplazamiento del pico ocurre en LC3-Q, que contiene tanto arcilla calcinada como cuarzo, mientras que tal cambio no se produce. en la mezcla O45Q, que contiene solo cuarzo y la misma proporción de OPC (55%). La velocidad de aceleración para LC3 fue alrededor de 3 veces la de OPC debido a la mayor reactividad del clinker y la reacción puzolánica de la arcilla calcinada.

### **Resistencia a la Compresión**

La resistencia a la compresión de las mezclas se midió en cubos de mortero de 70,6 mm / 70,6 mm / 70,6 mm con una relación agua / aglutinante fija de 0,45. Se usó arena estándar conforme a IS 650 [36] para preparar el mortero. La relación de cemento a arena se mantuvo 1: 3 en peso. Además de las mezclas de control, los resultados de resistencia de las mezclas de polvo de piedra también se compararon con los de OPC. Los cubos se desmoldaron después de un día y se almacenaron bajo el agua hasta el momento de la prueba.

La resistencia a la compresión de las mezclas LC3 fue equivalente o mejor que las mezclas OPC a los 28 días. Como se esperaba, la resistencia de 90 días de OPC fue mayor debido a la mayor cantidad de contenido de clinker en OPC (100%) en comparación con LC3 (55%). El aumento significativo en la fuerza observado en LC3 Q de 7 días a 28 días parece deberse a la formación de estratlingita que ocupa más volumen. A los 3 y 7 días, la resistencia a la compresión de las mezclas BA, KG y KS es similar a la mezcla de control LS y superior a la mezcla de control Q.

Dado que la única diferencia entre mezclas de polvo de piedra y control Q es la presencia de carbonatos, puede deducirse que la formación de carboaluminatos y la estabilización de etringita contribuyen significativamente al desarrollo de la fuerza de la edad temprana.

Por último se encuentra el estudio titulado “**Desarrollo de la hidratación y la resistencia en las mezclas de cemento portland ternarios que contienen piedra caliza y cenizas volantes o metacaolín**”, elaborado por Kirk Vance en la Escuela de Ingeniería Sustentable y Ambiente Construido, Arizona State University, Tempe, AZ 85287, Estados Unidos, y los ensayos se realizaron en el Laboratorio de Química de Materiales de Construcción, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de California, Los Ángeles, CA 90095, Estados Unidos.

Este estudio informó la influencia del tamaño de partícula de piedra caliza y el tipo de material (parcial) de reemplazo de cemento sobre la hidratación y las propiedades mecánicas de las pastas de cemento. Polvos de piedra caliza que tienen tamaños medios de partículas de 0,7, 3 y 15  $\mu\text{m}$ , a niveles de reemplazo de OPC entre 0% y 20% (base de volumen) y otros dos materiales de reemplazo de diferente reactividad (es decir, flólata de clase F o metacaolín) a niveles de reemplazo entre 0% y 10% (en base al volumen), se usan para proporcionar formulaciones de aglutinantes ternarios. La piedra caliza fina acelera la deshidratación temprana, lo que resulta en resistencias a la compresión incomparable o mejor a 1 día, y un mayor contenido de hidróxido de calcio (CH) en comparación con las pastas de cemento puro.

La incorporación de metacaolín junto con polvo de piedra caliza altera la respuesta de liberación de calor (es decir, cinética) de forma significativa. Una mezcla ternaria de esta naturaleza, con un 20% de reemplazo total de cemento, demuestra la mayor resistencia a 1 día y el contenido de CH más bajo. El análisis térmico revela picos distintivos correspondientes a la formación de las fases de carboaluminato después de 28 días en las pastas modificadas de caliza-metacaolín, mientras que la incorporación de niveles similares de ceniza de fl o no cambia

notablemente la respuesta. Se muestra que los efectos sinérgicos de la incorporación de caliza y metacaolín dan como resultado propiedades mejoradas a edades tempranas, mientras se mantienen propiedades de envejecimiento posteriores similares a las de los sistemas OPC tradicionales.

### **Materiales y proporciones de mezcla**

Los materiales utilizados en este estudio incluyen: cemento portland ordinario Tipo I / II (OPC) disponible comercialmente conforme a ASTM C 150, una ceniza volante Clase F y metacaolín conforme a ASTM C 618 y polvo de piedra caliza conforme a ASTM C 568. Caliza se usaron polvos con tres tamaños diferentes de partículas medias nominales - 0,7  $\mu\text{m}$ , 3  $\mu\text{m}$  y 15  $\mu\text{m}$ . Las distribuciones de tamaño de partícula del cemento, la piedra caliza, la ceniza volante y el metacaolín se muestran en la Fig. 1 y su composición química en la Tabla 10. El cemento fue reemplazado por porcentajes de volumen de polvo de piedra caliza que varía entre 0% y 40% en incrementos de 10% (incrementos de 5%, hasta un reemplazo total de 10% para la piedra caliza de 0.7  $\mu\text{m}$ ), y metacaolín y cenizas volantes entre 0% y 10% en incrementos de 5%. En el resto de este documento, los porcentajes de caliza u otros materiales de reemplazo de cemento informados son todos de forma volumétrica, a menos que se indique lo contrario. La relación volumétrica de agua a sólidos ( $p / s$ )  $V$  utilizada para las mezclas es 1.10; sin embargo, dado que el reemplazo se realizó por volumen y todos los materiales de reemplazo son menos densos que el cemento portland, la proporción eficaz de agua a polvo basada en la masa de las mezclas mezcladas varían entre 0.35 y 0.38.

Las mezclas ternarias que comprenden combinaciones de piedra caliza y metacaolín o cenizas volantes también se proporcionaron. La ceniza volante y el metacaolín se utilizan como materiales de reemplazo de OPC porque la naturaleza aluminosa de estos materiales favorece la formación de las fases de carboaluminato. Se intentaron niveles de reemplazo de OPC de hasta 20% en piedra caliza y hasta 10% mediante ceniza volante o metacaolín. Estas selecciones se realizaron para

alcanzar una resistencia a la compresión de 28 días dentro del 10% del sistema de referencia (es decir, cemento simple). En general, 42 diferentes mezclas de pasta fueron proporcionadas y evaluadas como parte de este estudio.

Tabla 10

Component (%)	Cement	Fly ash	Metakaolin
SiO <sub>2</sub>	21.0	58.4	51.7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.61	23.8	43.2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.47	4.19	0.5
CaO	63.0	7.32	-
MgO	3.26	1.11	-
SO <sub>3</sub>	3.04	0.44	-
Na <sub>2</sub> O	0.16	1.43	-
K <sub>2</sub> O	0.36	1.02	-
LOI	2.13	0.50	0.16

Limestone powder contains 95–97% CaCO<sub>3</sub> as per the manufacturer.

Fuente:

K. Vance (2013)

### **Calorimetría Isotérmica**

La calorimetría isotérmica se llevó a cabo en pasta de mezclas que contienen varias dosis de polvo de piedra caliza de diferentes tamaños de partículas. El tiempo de los picos de hidratación primarios y secundarios, sus amplitudes y las pendientes de los regímenes de aceleración y desaceleración se usan para describir la influencia de la composición de la mezcla en la respuesta calorimétrica. Dado que se evalúa un gran conjunto de mezclas, se desarrolló un programa informático para extraer estos parámetros de las curvas calorimétricas para agilizar el análisis. Para mantener las discusiones breves, los datos informados se limitan a los niveles de reemplazos de OPC de 10% y 20% de caliza y 10% de cenizas volantes o metacaolín.

### **Resistencia a la Compresión**

Las resistencias a la compresión para las pastas de polvo de piedra caliza OPC se muestran en la Figura 20. La pasta que contiene 10% de polvo de piedra caliza de 0,7  $\mu$ m muestra las resistencias más altas hasta los 14 días de edad, después de lo cual muestra resistencias similares a las de la pasta simple. La mejora en la hidratación del cemento facilitada por las partículas finas de polvo de piedra caliza es responsable de este efecto. Con el aumento del contenido de piedra caliza y el tamaño medio de

partícula, las resistencias a la compresión en todas las edades se reducen, como se esperaba. La reducción no es muy prominente a edades tempranas, excepto por los niveles de reemplazo más altos con el polvo de piedra caliza más grueso, debido en parte a los efectos de aceleración mineral que pueden compensar parcialmente los efectos del reemplazo de OPC. Sin embargo, para la pasta modificada en polvo de piedra caliza de 15  $\mu\text{m}$ , un reemplazo del 20% de cemento por polvo de piedra caliza da como resultado una pérdida de 21% de resistencia a los 28 días, lo que confirma los efectos de OPC por polvo de piedra caliza sobre propiedades mecánicas.

El desarrollo de la resistencia a la compresión de mezclas ternarias que contienen ceniza volante o metacaolín junto con polvo de piedra caliza se proporciona en la figura 21 y 22 respectivamente. El uso de metacaolín con un 10% del polvo de caliza más fino proporciona resistencias a la compresión similares o superiores a las pastas de cemento modificadas con metacaol al 10% a las edades consideradas.

Se logran resistencias similares o más altas en este caso, incluso cuando el nivel de reemplazo de cemento en la mezcla ternaria es el doble que el de la mezcla binaria. Sin embargo, para una pasta similar en la que se utiliza ceniza volante, las resistencias a la compresión generalmente son sustancialmente más bajas que el 10% de pasta metacaolín modificada: que demuestra los efectos sinérgicos de uso de polvo de piedra caliza fina con metacaolín.

Una comparación de la Figura con la Figura 19, muestra que para el mismo nivel de reemplazo de cemento con polvo de piedra caliza de un tamaño de partícula dado, las mezclas que contienen metacaolín tienen resistencias marginalmente más altas (del orden del 5%) a todas las edades que la pasta simple.

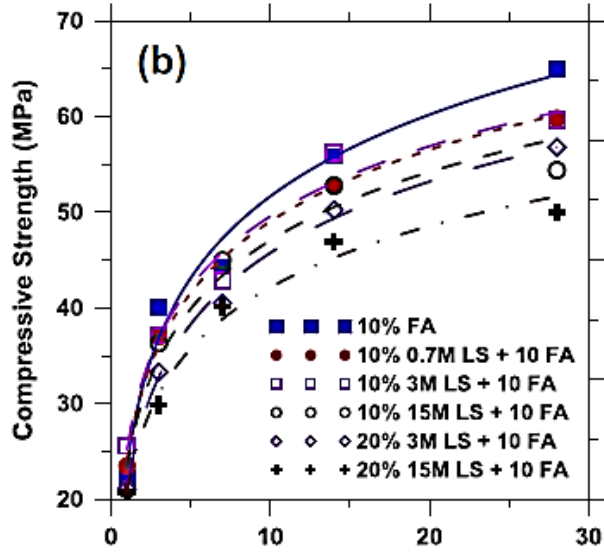


Figura 21

Fuente: K. Vance (2013)

Para un nivel total dado de reemplazo de cemento, las mezclas ternarias (que contienen ceniza volante / metacaolín con polvo de piedra caliza) demuestran mayores resistencias de 28 días que las correspondientes OPC-mezclas de piedra caliza. Esto se puede atribuir a efectos combinados de: (1) formación de carboaluminato y estabilización de etringita y (2) las reacciones puzolánicas, que aumentarían el volumen sólido de los hidratos y reducirían la porosidad en el sistema. Ver Figura 20

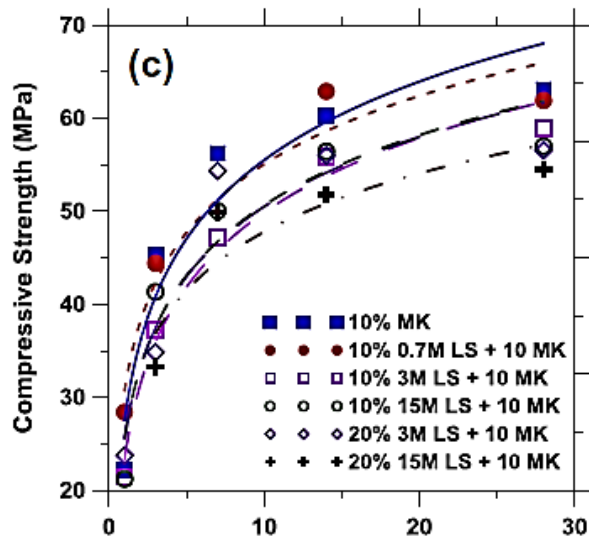


Figura 22

Fuente: K. Vance (2013)

En este estudio se evaluó la influencia de la finura de la caliza y la reactividad de la fuente de alúmina en la respuesta de liberación de calor en edades tempranas, la resistencia a la compresión y los productos de hidratación formados para pastas de cemento que contienen polvo de piedra caliza de tres tamaños de partícula mediana diferentes o una combinación de polvo de piedra caliza y pequeñas cantidades (10%) de cenizas volantes o metacaolín. Se encontró que los polvos finos de caliza (0.7 y 3µm) aceleran la hidratación del cemento a edades tempranas en todas las dosis estudiadas. La pasta con 10% de 0.7 µm se encontró que el polvo de piedra caliza tenía una resistencia de 1 día mejor y un agua normal no evaporable (wn) aumentada y un contenido de CH de la pasta de COP. La disminución de la cresta gruesa y la dosificación redujeron la resistencia a la compresión como se esperaba. La sustitución del cemento por metacaolín en mezclas binarias dio como resultado una tasa de liberación de calor más alta, mientras que la sustitución por ceniza fluida no produjo grandes cambios en la respuesta calorimétrica.

La respuesta calorimétrica de las pastas que contienen piedra caliza no se modificó considerablemente por la presencia de cenizas volantes, mientras que se observaron cambios significativos en la respuesta calorimétrica cuando se utilizó metacaolín junto con polvo de caliza fina (0,7 y 3 µm).

La cinética de reacción mejorada en mezclas ternarias que contenía 10% de polvo de piedra caliza 0,7 y 10% de metacaolín dio como resultado la mayor resistencia a la compresión de 1 día y el contenido de CH 1 día normalizado se encontraba entre las pastas más bajas evaluadas. Si bien la reducción de CH también podría atribuirse parcialmente a la formación de carboaluminato, no se detectó en las firmas de descomposición térmica de estas pastas. También podría ser que la reacción de fase de aluminato potenciada contribuyó a una mayor incorporación de  $Al_3^+$  en el C-S-H a edades tempranas en lugar de formar carboaluminatos.

Las pastas modificadas con polvo de caliza fina (0,7 y 3  $\mu m$ ) al 10% de nivel de reemplazo de cemento mostraron resistencias a la compresión comparables a las de las pastas OPC hasta 28 días. La mezcla ternaria de metacaolín con 10% de polvo de piedra caliza de 0,7  $\mu m$  resultó en resistencias a la compresión que fueron más altas que cualquiera de las mezclas binarias correspondientes, incluso a un nivel general más alto de reemplazo de cemento. Con este trabajo se avanzó en los enfoques para utilizar soluciones de materiales múltiples basadas en piedra caliza y metacaolín para proporcionar ligantes ternarios, dedicados a reducir el uso de OPC en el concreto.

Una vez analizado cada uno de los estudios se procedió a realizar una validez de contenido, que consistió en la elaboración de un diagrama de Causa- Efecto, en el cual se determinaron los factores y las distintas variables presentes en el trabajo de investigación.

#### **4.3. Comparar la calorimetría del concreto convencional con la del concreto con arcillas a través de resultados obtenidos en las literatura seleccionas.**

Evaluar y predecir el impacto de las arcillas calcinadas sobre las propiedades mecánicas del cemento cobra cada día mayor importancia dada la popularidad que estos materiales han venido ganando dentro de la industria cementera (Nehdi 2014).

Típicamente, las pruebas basadas en resistencia dominaban la mayoría de los estándares de evaluación (ASTM International 2016; EN196-1 2005), sin embargo, la complejidad asociada a la preparación de las muestras; prolongados tiempos de curado y requerimientos de laboratorios con ambientes controlados han permitido

ganar terreno a las pruebas rápidas basadas en el calor de hidratación medidos mediante calorimetría isotérmica (Wadso 2005; Scrivener et al. 2016). En este sentido, el uso de pruebas simplificadas basadas en el flujo de calor durante la hidratación del cemento lucen promisorias para predecir la actividad puzolánica de las arcillas calcinadas dentro de los sistemas ternarios de cemento.

Una vez analizados los resultados del objetivo anterior se elaboró un diagrama de bosque, ver Figura 24, que ilustra los efectos estimados en términos de diferencias de medias estandarizadas (SMD) de pendientes en la fase de aceleración inicial de hidratación de 6 estudios calorimétricos tanto para los sistemas ternarios con arcilla (STA) como para el cemento portland ordinario (CPO).

Estos resultados indican que la composición química de las arcillas utilizadas parece no haber afectado negativamente la tasa de evolución de calor durante las primeras 24 horas de hidratación. Resulta interesante destacar, dentro del diagrama de bosque Figura 24, los trabajos de Gmür et al. (2016) y Huang et al. (2017) por su posicionamiento al lado izquierdo de la “línea de no efecto”. Dentro de este par de experiencias, la inclusión de arcillas en el sistema, aunque de manera insignificante, parecen haber tendido a mermar la tasa de producción de calor en las reacciones de hidratación de esas muestras.

En cuanto a la experiencia de Gmür et al. (2016), quienes fundamentalmente centraron sus esfuerzos en demostrar el impacto del tipo de almacenamiento bajo condiciones ambientales variadas, reportan que el menor flujo de calor exhibido por las muestras con arcillas lo explica el efecto de dilución que estas ejercieron sobre las sistema (Cyr et al. 2006), en particular aquellas almacenadas a la intemperie en condiciones alta humedad relativa. Adicionalmente, dentro de las arcillas utilizadas se encontraban las Iilitas que, junto a las mortmorillonitas, son ampliamente conocidas por su baja reactividad puzolánica (Sabir et al. 2001; Fernandez et al. 2011; Souza & Dal Molin 2005).

Por su parte, Huang et al. (2017) investigaron la sustitución de los humos de sílice de alto costo por arcilla calcinada en mezclas de hormigones reforzados con fibra de ultra alto rendimiento (UHPRFC). Ellos encontraron que incorporar las arcillas tuvo poco efecto en la evolución del calor de hidratación, particularmente cuando se usó metacaolín, donde el período de latencia se extendió probablemente debido al efecto de retardador o de una mayor cantidad de superplastificante.

En síntesis, la complejidad de las respuestas encontradas en este trabajo radica en que al reemplazar el humo de sílice por arcilla calcinada en sistemas UHPC aumenta caóticamente el número de reacciones y estas reacciones se retroalimentan entre sí afectando –no siempre para bien- la hidratación del cemento, la reacción puzolánica de caolinita con portlandita y la reacción sinérgica entre caolinita y piedra caliza.

Hacia el lado derecho de la línea de no efecto, es decir, donde la evolución del calor de hidratación se vio favorecida (aunque no estadísticamente) con la adición de arcillas; destacan los trabajos de Akhlaghi et al. (2017); Antoni et al. (2012); Krishnan et al. (2018) y Vance et al. (2013).

En las observaciones de Akhlaghi et al. (2017) se notó que aparecen de nuevo en escena los superplastificadores, pero en este caso los del tipo éter-caboxilatos (PCEs) y polietilenglicol (PEG). Al incorporar tales aditivos, estos investigadores encontraron que hubo un prolongado período de inducción para todas las mezclas estudiadas. En buena medida, esta prolongada inducción se la atribuyeron al efecto obstaculizador de los copolímeros adsorbidos en la disolución de fases de silicato (Yoshioka et al. 2002; Marchon et al. 2017). No obstante, este efecto se vio minimizado en presencia de arcillas porque la reacción tiene lugar antes.

Al mismo tiempo, los trabajos de Krishnan et al. (2018) y Vance et al. (2013) centraron su atención en evaluar nuevas fuentes de carbonatos y los probaron en mezclas ternarias de cemento con arcillas. En ambos estudios la incorporación de las

fuentes alternativas de carbonatos junto con las arcillas alteró la cinética de liberación de calor significativamente. En el análisis térmico del proceso de hidratación, este fenómeno se puso de manifiesto con los picos que corresponden a la formación de las fases de carboaluminato después de 28 días en las muestras modificadas de caliza-metacaolín.

Entre tanto el trabajo de Antoni et al. (2012), que se limitó a probar solo el efecto de las arcillas encontró una respuesta bastante similar, el carbonato de calcio reacciona con la alúmina aportada por la arcilla, formando fases AFm suplementarias y estabilizando la etringita.

Partiendo de lo anteriormente expuesto, se logró los resultados del presente objetivo, y en consecuencia, se puede observar, que el valor de estimación del efecto global medido entre los 6 estudios (representado por el diamante negro) cruza la línea de efecto cero, es decir, las diferencias calculadas entre los grupos tratados con arcillas y las muestras control –a base de cemento Portland- puede considerarse estadísticamente no significativa (SMD: 0.74) y el ancho del diamante representa el intervalo de confianza general (95% CI: -0.96–2.44).

#### **4.4. Comparar resultados de ensayos a compresión realizados al concreto convencional y al concreto con arcillas basados en los estudios previamente seleccionados.**

Desde la perspectiva de la reactividad, para muchos practicantes y profesionales de la industria del cemento, se piensa que los ensayos más confiables residen en las pruebas mecánicas (resistencia a la compresión y flexión entre otras) (Juenger & Siddique 2015). En consecuencia, si bien la práctica de incluir arcillas en el cemento es favorable para la industria, ya que resulta en concreto con menor costo y menor impacto ambiental (Nehdi 2014); esta no deja de generar suspicacias en torno a la resistencia y durabilidad del producto final a largo plazo debido a lo, aparentemente, conflictivo de algunos datos disponibles en la literatura especializada. En tal sentido, en esta sección buscamos documentar el hecho de que

la presencia de arcillas en el cemento no afecta, significativamente, la resistencia a la compresión de las muestras.

Luego de analizar los resultados obtenidos en el objetivo anterior se realizó un diagrama de bosque Figura 25, en el que se esquematizó el impacto de la presencia de arcillas sobre la diferencia de medias estandarizadas para fuerza de compresión del cemento en 6 estudios diferentes. Como se pudo observar, la prueba para el efecto general resultó no significativa ( $Z = 0,18$ ;  $p > 0.05$ ) indicando que la diferencia de medias para fuerza de compresión en muestras provenientes de sistemas ternarios con arcillas no resultó lo suficientemente grande ( $M = 0.10$ , 95% CI = -1.15, 0.33), desde el punto de vista estadístico, como para inferir algún efecto de importancia al compararla con las muestras del cemento de referencia.

Fuente:

Se observó en los estudios de Akhlaghi et al. (2017); Huang et al. (2017); Krishnan et al. (2018) y Vance et al. (2013) tienen en común que los centroides, representando las diferencias medias estandarizadas, yacen en la región del gráfico donde las muestras control tendieron a mostrar mayor resistencia a la compresión cuando se compararon con aquellas que contenían arcillas, por supuesto, al remeterse a los intervalos de confianza resultó fácil percatarse que estas diferencias pueden llegar a cero.

En el trabajo de Akhlaghi et al. (2017), fue precursor incorporando arcillas calcinadas en concretos de alto desempeño, allí los autores encontraron que al reemplazar el humo de sílice por arcilla uno de los primeros efectos observados es que el radio de los poros se vio reducido (Brühwiler & Denarié 2013); sin embargo, tal refinamiento no redundó en una mejora estadística de la fuerza de compresión. Otro trabajo de este tipo es el de Huang et al. (2017), que incorporó progresivamente niveles crecientes de arcilla a expensas del humo de sílice, también, en concretos de alto desempeño. Aquí, aunque las fuerzas de compresión resultaron comparables estadísticamente, las muestras con arcillas tendieron a exhibir valores inferiores. En este caso, los autores aludieron que la hidratación del cemento se vio obstaculizada en

las mezclas de arcilla calcinada debido al alto consumo de agua por la reacción de la caolinita.

Por su parte, en el estudio de Krishnan et al. (2018) tuvo como finalidad evaluar la viabilidad de utilizar polvo de piedra de mármol y polvo de piedra Kota como fuente alternativa de carbonato en sistemas ternarios con arcillas. Es decir, la variable principal aquí no fue la arcilla sino la fuente de carbonato. En consecuencia, las piedras dolomíticas y calcínicas interaccionaron de manera variable con las arcillas. Por ejemplo, se observó un acortamiento del período de inducción en presencia de arcilla calcinada, esto explicó los tiempos de fraguado temprano en las mezclas de STA. No obstante, debido a la mayor cantidad de clinker en CPO (100%) en comparación con STA (55%) la resistencia de 90 días de CPO fue mayor, aunque no reportan diferencias estadísticas (Bishnoi et al. 2014; Emmanuel et al. 2015). Otro trabajo, donde los tratamientos con presencia de arcillas aparecieron confundidos dentro de las opciones donde la resistencia a la compresión del CPO tendió a comportarse mejor fue el caso de Vance et al. (2013). Ello se debe a que, las arcillas representaron una constante, y el propósito principal fue evaluar distintas granulometrías y niveles de piedra caliza para reemplazar el cemento. Esto señaló, en principio, que el efecto de las arcillas pudo haberse visto limitado y diluido frente al conjunto de reacciones inducidas por los valores crecientes de piedra caliza y su granulometría. Es decir, los efectos sinérgicos entre piedra caliza y metacaolín resultaron en propiedades mejoradas a edades tempranas, mientras que en las etapas tardías los resultados tendieron a parecerse a los sistemas Portland tradicionales (CPO).

En otro extremo del espectro de resultados yacen los hallazgos de Antoni et al. (2012) y Gmür et al. (2016). Aquí, el rasgo distintivo fue que, en ambos, la topología de la nube de resultados ubicaron sus centroides al lado derecho de la línea de no efecto. Es decir, en la región donde las muestras que contenían arcillas tendieron a mostrar mayor fuerza de compresión. A diferencia de los casos anteriores, en estos trabajos la presencia de arcillas sí constituyó una variable. Es decir, el diseño

experimental garantizó aislar los efectos aleatorios vinculados a la presencia de arcilla en las muestras. Por ejemplo, en el estudio de Antoni et al. (2012) los resultados mostraron que el carbonato de calcio reacciona con los aluminatos en el metacaolín, formando cantidades significativas de hemicarbaluminato y, en menor medida, monocarboaluminato desde tan solo el primer día, sugiriendo que el metacaolín probablemente proporcionó sitios de nucleación adicionales para las reacciones y posterior formación de las fases C-S-H (Lothenbach et al. 2011) siendo el efecto neto de todo esto una mayor resistencia a la compresión. Igualmente, el estudio de Gmür et al. (2016), también giró enteramente alrededor de las arcillas, de hecho evaluaron dos tipos de estas expuestas a seis condiciones ambientales diferentes. Aquí, resultó relativamente sencillo aislar los efectos debidos a la presencia de arcillas de aquellos inducidos solo por el sistema CPO. Los valores de resistencia a la compresión de las mezclas que contienen un 20% de arcilla calcinada envejecida fueron más altos que las mezclas de referencia hechas solo con cemento.

Si bien es cierto que existieron algunas propiedades, como el tamaño del efecto combinado, que sugirieron la inocuidad del uso de arcillas como sustitutos del Clinker en los sistemas ternarios de cemento, resultó también importante notar que la evaluación de los observables estadísticos mostrados en la Fig. 25 ( $\beta = 4.00$ ;  $\sigma = 61.42$ ,  $n = 5$  ( $p < 0.00001$ );  $\rho = 92\%$ ) y Fig.2 ( $\beta = 1.59$ ;  $\sigma = 29.22$ ,  $n = 5$  ( $p < 0.0001$ );  $\rho = 83\%$ ) llevó pensar que estos resultados en sí mismos resultarían mucho más persuasivos si mostraran un mayor grado de homogeneidad. Dicho de otra forma, el dominio que se analizó en este trabajo de investigación puede considerarse como "segmentado" donde cada parte o estudio individual representó un subdominio, cada uno exhibió un tamaño de efecto "verdadero" diferente. Por lo tanto, se hizo necesario evaluar estadísticamente la fuente de heterogeneidad entre los estudios, para identificar posibles variables o características que moderan los resultados obtenidos.

Se centró el análisis en la dispersión de los tamaños del efecto verdadero contra sus posibles determinantes (moderadores) y ajustarlo a un modelo matemático mediante la técnica de regresión lineal. Se utilizó como moderadores aquellos rasgos

típicos dentro de los estudios (año de publicación, tamaño de muestra y tratamiento) para tratar de explicar cierta proporción de la varianza entre estudios. En la Figura 26 se mostró la dispersión de datos del efecto observado donde la variable año se usó como predictor. Como se puede observar, esta dimensión no tiene un efecto moderador ( $QM [df = 1] = 0.0143, p\text{-val} = 0.9048$ ). En otras palabras la etiqueta año no permite explicar la heterogeneidad observada ( $I^2: 97.97\%$ ) en la magnitud de los efectos.

De acuerdo a una inspección visual de la dispersión de los datos, se encontró que la pendiente de la línea estimada de regresión no es ni completamente horizontal ni inclinada sugiriendo una débil asociación entre el diseño del estudio y los efectos asociados. Adicionalmente, cerca del 15 % de los estudios se ubicaron fuera del intervalo de confianza implicando que debió haber uno o más factores de mucha importancia que pudieran explicar mejor la heterogeneidad ( $QE = 80.5549, df = 10, p\text{-val} < .0001$ ) en la magnitud de los efectos.

En la Figura 27 se mostró la diferencia de medias estandarizadas frente al tamaño de muestra utilizado en cada estudio. Aquí podemos apreciar que la dispersión de los datos no muestra un patrón que hizo suponer algún grado de asociación de importancia. Cuando se consultó el estadístico Q para el tamaño de la muestra ( $QM = 1.1420, df = 1, p\text{-val} = 0.2852$ ), se verificó que no es significativo ( $p > 0.05$ ) lo que indicó que la cantidad estimada de heterogeneidad residual ( $\tau^2: 393.8968$ ) no pudo ser explicada por la inclusión de este moderador. Esto lo confirma la prueba de heterogeneidad residual QE ( $QE = 87.3906, df = 10, p\text{-val} < .0001$ ), que resultó significativa ( $p < 0.05$ ), señaló que, posiblemente, otros moderadores no considerados están influenciando la heterogeneidad observada.

El primer moderador que demostró tener un impacto sobre la heterogeneidad entre estudios fue tratamiento (variable dicotómica: “Arcilla” o “Portland”) y sus detalles se incluyen en la Figura. 28. Aquí se apreció, que la pendiente de la línea de

regresión es bastante inclinada y la inspección visual de esta dispersión de datos informó que el factor “Arcilla” se halla negativamente correlacionado con las diferencias de medias estandarizadas. Es decir, las diferencias parecieron hacerse más pequeñas cuando hay presencia de arcillas. En conjunto, los resultados de la prueba para el moderador tratamiento ( $QM = 5.8035$ ,  $df = 1$ ,  $p\text{-val} = 0.0160$ ) así como el coeficiente significativo de la pendiente (24,3383) conformaron con la interpretación visual la asociación entre el tratamiento y la magnitud del efecto observado

Con los resultados previamente mostrados, se pudo determinar el efecto que causa la inclusión de arcilla como sustituto del Clinker, con lo cual se determinó que aumenta la resistencia a la compresión del concreto a largo plazo a través de la reacción puzolánica y disminuyen la fuerza de la edad temprana debido a la dilución del cemento.

Los resultados obtenidos en el desarrollo de los objetivos planteados fueron analizados para obtener las conclusiones y recomendaciones pertinentes, las cuales se presentaran en la parte final del presente trabajo de investigación.

## CONCLUSIONES

A continuación se presentan las conclusiones de la investigación basadas en los resultados obtenidos de los objetivos anteriormente desarrollados en el capítulo cuatro del presente trabajo:

El cemento Portland ordinario es el material más fabricado por el hombre y su producción es responsable de aproximadamente el 8% de las emisiones totales de CO<sub>2</sub>; la sociedad se ve obligada a buscar una solución sustentable para reducir estas altas emisiones de CO<sub>2</sub>, implementando nuevas técnicas como es la del cemento con arcilla calcinada, siendo un nuevo tipo de cemento que puede reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> hasta en un 30%, sus componentes como lo son la piedra caliza y la arcilla están disponibles en cantidades abundantes, es rentable y no requiere grandes modificaciones de capital a las plantas de cemento existentes. Desde el punto de vista de solución energética / costo-efectiva es totalmente eficaz sustituir hasta un 50% de la combinación del cemento portland por arcilla calcinada y piedra caliza. A su vez, el cemento con arcilla puede convertirse en un material de construcción esencial, especialmente en las economías emergentes de rápido crecimiento donde la minimización del impacto ambiental y el agotamiento de los recursos son una prioridad.

1. En cuanto a la selección de literaturas relacionadas con el comportamiento del concreto convencional y el concreto con arcillas, se pudo concluir que existen muchos autores interesados en la nueva implementación de materiales cementicios suplementarios en distintos tipos de concreto debido a la alta demanda de fabricación del material primario llamado cemento, ya que es el componente activo del concreto e influye en todas las características de este material. No todas las literaturas fueron de interés, ya que, en sus estudios no abarcaban los concretos estudiados, como lo son el concreto convencional y el concreto con arcillas.

Al no implementar arcillas en sus estudios respecto al concreto, nos vimos obligados a realizar una búsqueda más detallada y aplicar el descarte de algunas literaturas. Una vez reducido el historial de búsqueda se obtuvo que además de la implementación de los cementos Portland, en algunos países es frecuente el uso de cementos basados en clinker y una proporción de otro material que aun no teniendo propiedades aglomerantes por sí mismo las desarrolla cuando se mezcla con el Portland. Estos cementos resultan en cuanto a calidad, similares al Portland hasta ciertos límites del material añadido. Una opción muy atractiva y factible para satisfacer los objetivos ambientales y de desarrollo fue el cemento con arcilla calcinada. Este nuevo tipo de cemento era tema de estudio a nivel mundial, por ello nos basamos en la comparación del cemento portland con el cemento con arcilla. Por lo tanto, la comparación se redujo al componente primario del concreto de manera de que existieran métodos comparables entre ellos. Una vez obtenida la selección de literaturas basadas en cemento portland y cemento con arcillas, se buscaron variables de estudio en común entre los autores para así generar dicha comparación entre ambos. Los factores de calidad que obtuvieran el mayor porcentaje de aceptación entre las literaturas finales, se convirtieron en nuestras variables estudiadas la cuales fueron la calorimetría isotérmica y la resistencia a compresión tanto para cemento portland como para cemento con arcillas.

2. Analizando detalladamente los materiales y métodos aplicados por cada uno de los autores en sus estudios, se obtuvo como conclusión que nuestros factores (calorimetría isotérmica y resistencia a la compresión) fueron ensayados en las distintas literaturas como métodos de comparación entre el cemento portland y cemento con arcillas. Como consecuencia de la revisión literaria no todos se refirieron exactamente al cemento con arcillas, sino que evaluaron cemento con distintos porcentajes de arcilla calcinada, piedra caliza, sílice, cuarzo y algunos aditivos, pero todos siendo comparables en los distintos métodos aplicados con el

cemento Portland. Al obtener un 100% de aceptación en el contenido literario en base a calorimetría y resistencia a compresión se llevó a cabo el análisis comparativo.

3. Debido a los resultados obtenidos en la comparación de cada una de las literaturas en base a calorimetría isotérmica en función de cemento Portland y cemento con arcilla, surge una aparente ambigüedad relativa a la presencia de arcillas en sistemas ternarios de cemento que se genera con esta pequeña muestra de la literatura, la cual se debe tanto a la presencia de aditivos que reducen o retardan la reactividad durante el proceso de hidratación como al uso de arcillas que, entre los diferentes tipos, muestran el menor potencial puzolánico (ilitas y mortmorillonitas). En consecuencia determinar la proporción de caolinita en los depósitos de arcilla resulta de vital importancia. Desde esta perspectiva, las pruebas simplificadas que se basan en la calorimetría isotérmica, han resultado bastante robustas como indicadores de las reacciones de hidratación en las diferentes mezclas cementosas y de las posibles interacciones entre los aditivos utilizados dentro de estas. Por lo tanto, constituyen dispositivos valiosos para proceder a la evaluación primaria en yacimientos de arcilla.

4. En el caso de los resultados obtenidos por la comparación de resistencia de compresión en cemento portland y cemento con arcillas se pudo concluir que la presencia de arcillas en el cemento no afecta significativamente. El principal efecto de las arcillas es que aumentan la resistencia a la compresión del concreto a largo plazo a través de la reacción puzolánica, es decir, el impacto de la presencia de arcillas sobre la diferencia de medias estandarizadas para la resistencia a compresión del cemento en los 6 estudios, dio como resultado que la prueba para el efecto general no es significativa desde el punto de vista estadístico. Siendo una alternativa para las investigaciones futuras, enfatizar en una mejor comprensión de la relación entre la hidratación del cemento, la reacción de las arcillas calcinadas con diferentes

contenidos de caolinita y la piedra caliza en el desarrollo micro estructural del concreto sobre las propiedades mecánicas.

5. En este contexto, una conclusión adicional es, que al sustituir parte de la combinación del cemento portland por arcillas calcinadas y piedra caliza ofrece propiedades mecánicas comparables con respecto al cemento simple. Así como también, que al evaluar la reactividad de las arcillas comunes calcinadas con la del Clinker se ve la superioridad, debido a los tipos de minerales arcillosos, el contenido de caolinita y los minerales asociados que influyen directamente en la reactividad y la temperatura de calcinación. Dichos cementos con ciertos porcentajes de arcilla calcinada reaccionan más rápido que el cemento Portland a pesar de ser la resistencia a compresión el indicador por excelencia que indica la reactividad de un material. Es posible fabricar y comercializar cemento en el cual cierto porcentaje de clinker puede ser sustituido por piedra caliza y las arcillas calcinadas cumpliendo los criterios de rendimiento específicos, los cuales fueron estudiados y definidos por un panel de expertos para desarrollar un cemento que cumpla con los requisitos de seguridad y calidad.

## **RECOMENDACIONES**

Partiendo de las conclusiones anteriormente expuestas, se pudo establecer un conjunto de recomendaciones:

A medida que los países se desarrollan, aumenta la demanda de vivienda e infraestructura por consiguiente, es necesario evaluar la escasez de materia prima en el concreto y buscar alternativas de reemplazo.

Estudiar los nuevos materiales cementicos suplementarios que surgen al mercado ya que desde el punto de vista ambiental, son bastante factibles debido a su reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmosfera.

Implementar fuentes alternas para la producir concreto con menores emisiones de CO<sub>2</sub> y que mantenga sus propiedades físicas, químicas y mecánicas.

Utilizar las arcillas ya que abundan en la corteza terrestre, siendo materia prima alternativa para el concreto debido a que mantiene su producción de calor y además su resistencia en comparación al convencional.

Tener en cuenta que la parte fina de la arena fina puede ser sustituida hasta un 80% por las arcillas calcinadas.

Emplear materiales como la escoria de los altos hornos y la ceniza volante como sustitutos del Clinker, ya que en otros países emplean esta técnica.

Considerar el LC3 como una solución sostenible a largo plazo ya que puede utilizar las arcillas de caolín inadecuadas para la mayoría de las industrias y ampliamente disponibles en muchas partes del mundo.

Adoptar nuevas tecnologías suplementarias en el cemento garantizando menores costos de producción.

Aplicar la calorimetría isotérmica para evaluar las arcillas debido a que son complejas y altamente reactivas. Dicho a prueba es la más sensible para evaluarlas.

Definir con qué tipo de arcilla se va a trabajar en el concreto debido, en tal sentido que la mejor en sus propiedades es la caolinita.

Verificar mediante otros métodos la resistencia a compresión ya que se ve influenciada con la porosidad entre las partículas.

Estudiar la gráfica acumulada de flujo de calor debido a que nos garantiza datos más precisos respecto a las propiedades de los componentes del cemento.

## REFERENCIAS

- Akhlaghi, O. et al., 2017. Modified poly(carboxylate ether)-based superplasticizer for enhanced flowability of calcined clay-limestone-gypsum blended Portland cement. *Cement and Concrete Composites*, 101, pp.114–122.
- Antoni, M. et al., 2012. Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone. *Cement and Concrete Composites*, 42(12), pp.1579–1589.
- ASTM International, 2016.
- Avet, F. et al., 2016. Development of a new rapid, relevant and reliable (R3) test method to evaluate the pozzolanic reactivity of calcined kaolinitic clays. *Cement and Concrete Composites*, 85, pp.1–11.
- Bishnoi  
The Indian experience. *Cement and Concrete Composites*, 88(7), pp.22–28.
- Brühwiler, E. & Denarié, E., 2013. Rehabilitation and Strengthening of Concrete Structures Using Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete. *Cement and Concrete Composites*, 23(4), pp.450–457. Available at: <http://openurl.ingenta.com/content/xref?genre=article&issn=1016-8664&volume=23&issue=4&spage=450>.
- Chen, C.Y., Lan, G.S. & Tuan, W.H., 2000. Microstructural evolution of mullite during the sintering of kaolin powder compacts. *Cement and Concrete Composites*, 26(7), pp.715–720.

Cyr, M., Lawrence, P. & Ringot, E., 2006. Efficiency of mineral admixtures in mortars: Quantification of the physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength. *Cement and Concrete Research*, 36(2), pp.264–277.

Emmanuel, A.C., Parashar, A. & Bishnoi, S., 2015.

EN196-1, 2005. Methods of testing cement - Part 1: Determination of strength. *ASTM International*, pp.1–33.

Fernandez, R., Martirena, F. & Scrivener, K.L., 2011. The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite. *Cement and Concrete Research*, 41(1), pp.113–122.

Frølich, L., Wadsö, L. & Sandberg, P., 2016. Using isothermal calorimetry to predict one day mortar strengths. *Cement and Concrete Research*, 88, pp.108–113.

Gmür, R., Thienel, K.C. & Beuntner, N., 2016. Influence of aging conditions upon the properties of calcined clay and its performance as supplementary cementitious material. *Cement and Concrete Research*, 72, pp.114–124.

Higgins, J.P.T. & Green, S., 2014.

Huang, W. et al., 2017. Effect of replacement of silica fume with calcined clay on the hydration and microstructural development of eco-UHPFRC. *Cement and Concrete Research*, 121, pp.36–46.

Juenger, M.C.G. & Siddique, R., 2015. Recent advances in understanding the role of

supplementary cementitious materials in concrete.

, 78, pp.71–80. Available at:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.03.018>.

Krishnan, S. et al., 2018. Hydration kinetics and mechanisms of carbonates from stone wastes in ternary blends with calcined clay.

, 164, pp.265–274.

Lothenbach, B., Scrivener, K. & Hooton, R.D., 2011. Supplementary cementitious materials.

, 41(12), pp.1244–1256.

Marchon, D. et al., 2017. Molecular and submolecular scale effects of comb-copolymers on tri-calcium silicate reactivity: Toward molecular design.

, 100(3), pp.817–841.

Nehdi, M.L., 2014. Clay in cement-based materials: Critical overview of state-of-the-art.

, 51, pp.372–382.

Sabir, B., Wild, S. & Bai, J., 2001. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: A review.

, 23(6), pp.441–454.

Scrivener, K., Snellings, R. & Lothenbach, B., 2016.

,

Snellings, R. & Scrivener, K.L., 2016. Rapid screening tests for supplementary cementitious materials: past and future.

, 49(8),

pp.3265–3279. Available at: <http://link.springer.com/10.1617/s11527-015-0718-z>.

Souza, P.S.L. & Dal Molin, D.C.C., 2005. Viability of using calcined clays, from industrial by-products, as pozzolans of high reactivity.

, 35(10), pp.1993–1998.

The Nordic Cochrane Centre, 2014. Review Manager. ,  
pp.1–43. Available at: [http://community.cochrane.org/tools/review-production-  
tools/revman-5/about-revman-5](http://community.cochrane.org/tools/review-production-tools/revman-5/about-revman-5).

Vance, K. et al., 2013. Hydration and strength development in ternary portland  
cement blends containing limestone and fly ash or metakaolin.  
, 39, pp.93–103.

Wadso, L., 2005. Applications of an eight-channel isothermal conduction calorimeter  
for cement hydration studies. , 5(0), pp.94–101.

Yoshioka, K. et al., 2002. Adsorption characteristics of superplasticizers on cement  
component minerals. , 32(10), pp.1507–1513.