

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA
*INCIDENCIA DE LOS MICROMATERIALES INERTES EN LOS CONCRETOS
HIDRAÚLICOS.*

NOTA DE ACEPTACION



Firma del director
RAMÓN TORRES ORTEGA



Firma del jurado
WALBERTO RIVERA MARTINEZ



Firma del jurado
MANUEL SABA



**INCIDENCIA DE LOS MICROMATERIALES INERTES EN LOS
CONCRETOS HIDRÁULICOS**



**INCIDENCIA DE LOS MICROMATERIALES INERTES EN LOS CONCRETOS
HIDRÁULICOS**



AUTORES:

**VIVIANA PAOLA MEZA MERCADO
ROGELIO ANDRÉS MÉNDEZ PONCE**

**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
CARTAGENA- BOLIVAR**

2022



**INCIDENCIA DE LOS MICROMATERIALES INERTES EN LOS
CONCRETOS HIDRÁULICOS**



**INCIDENCIA DE LOS MICROMATERIALES INERTES EN LOS CONCRETOS
HIDRÁULICOS**



Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil

AUTORES:

VIVIANA PAOLA MEZA MERCADO

ROGELIO ANDRÉS MÉNDEZ PONCE

DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO:

RAMON DE JESUS TORRES ORTEGA

GRUPO DE INVESTIGACION

GEOMAVIT (Geotecnia, materiales, vías y transito)

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

CARTAGENA- BOLIVAR

2022



Tabla de contenido

Lista de tablas	6
Lista de figuras	7
Resumen	8
Introducción.....	9
1. Marco metodológico	11
1.1. Diseño metodológico	11
1.2. Métodos de recopilación de información.....	12
2. Marco teórico	13
2.1. Generalidades sobre el concreto	13
2.2. Componentes del concreto.....	13
2.2.1. Cemento.....	14
2.2.2. Agua	14
2.2.3. Agregados.....	15
2.3. Propiedades del concreto	17
2.3.1. Propiedades en estado fresco.....	17
2.3.2. Propiedades en estado endurecido.....	18
2.4. Micromateriales inertes.....	19
2.4.1. Antecedentes	19
3. Casos de estudio: Usos de micromateriales según su origen o modo de formación.....	24
3.1. Rocas origen metamórfico en el concreto hidráulico	24
3.1.1. Estudios sobre la influencia del Mármol.....	24
3.2. Origen ígneo	28
3.2.1. Estudio sobre la influencia del Granito	29
3.2.2. Estudio sobre la influencia de la piedra pómez	30
3.2.3. Estudio sobre la influencia de la arena cuarzo feldespática	33
3.2.4. Estudio sobre la influencia del polvo de sílice	36
3.3. Origen sedimentario.....	38
3.3.1. Estudio sobre la influencia del carbón mineral	39
3.3.2. Estudio sobre la influencia del yeso	40
3.3.3. Estudio sobre la influencia de la roca caliza	41
3.4. Otros orígenes	43



INCIDENCIA DE LOS MICROMATERIALES INERTES EN LOS CONCRETOS HIDRÁULICOS



3.4.1. Estudios sobre la influencia de residuos cerámicos	43
3.4.2. Estudio sobre la influencia del vidrio molido.....	47
3.5. Análisis de casos de estudio.....	49
4. Análisis de precios unitarios (APU).....	51
5. Conclusiones	52
6. Recomendaciones.....	54
7. Anexos.....	55
8. Referencias	57



Lista de tablas

Tabla 1. Clasificación de agregados según su tamaño	16
Tabla 2. Ensayos de calidad de agregados	17
Tabla 3. Agregados pétreos en el concreto.....	23
Tabla 4. Resistencia a la compresión a los 7 y 28 días del concreto premezclado con diferentes trazas y niveles de adición de residuos de mármol.....	26
Tabla 5. Absorción de agua por capilaridad media a las 72 horas.	26
Tabla 6. Revenimiento de los diseños mezclados.	29
Tabla 7. Resistencia a la compresión de los diseños mezclados con RGC.	30
Tabla 8. Densidades de concreto con reemplazo de pumita.....	31
Tabla 9. Densidades de concreto con reemplazo de pumita.....	32
Tabla 10. Caracterización de arena cuarzo-feldespática 1	33
Tabla 11. Caracterización de arena cuarzo-feldespática 2	34
Tabla 12. Resultado de estudio de reemplazo de arena feldespática 1	35
Tabla 13. Resultado de estudio de reemplazo de arena feldespática 2.....	35
Tabla 14. Diseño de muestras para la evaluación de polvo de sílice en el concreto	36
Tabla 15. Resultados de ensayos de consistencia para concretos con agregado de carbón mineral.....	39
Tabla 16. Módulo de rotura de concreto con adición de polvo de caliza.....	42
Tabla 17. Evaluación de la adición de residuos mecánicos en el concreto	43
Tabla 18. Asentamiento según el porcentaje de remplazo de porcelanato molido.....	44
Tabla 19. Resistencia promedio de concretos con agregados de porcelanato molido (28 días).....	45
Tabla 20. Resistencia promedio de concretos con agregados de porcelanato molido (56 días).....	46
Tabla 21. Resistencia promedio de concretos con agregados de porcelanato molido (56 días).....	47
Tabla 22. Resumen de estudios analizados críticamente del estado del arte.....	49
Tabla 23. Materiales (Patrón).....	55
Tabla 24. Materiales (20% de residuo de mármol)	55
Tabla 25. Materiales (40% residuo cerámico).....	56



Lista de figuras

Figura 1. Diseño metodológico de la investigación	11
Figura 2. Materiales constituyentes del concreto	14
Figura 3. Comparación de la resistencia a la compresión del concreto (patrón, 5%, 10%, 15%) a los 28 días	27
Figura 4. Comparación de la resistencia a la compresión del concreto (patrón, 5%, 10%, 15%) a los 28 días	28
Figura 5. Evaluación de la resistencia a la compresión con la adición de pumita.....	31
Figura 6. Evaluación de la resistencia a la compresión con la adición de pumita.....	31
Figura 7. Evaluación de asentamiento para mezclas con sustitución de arena por polvo de sílice	37
Figura 8. Evaluación de resistencia a la compresión para mezclas con sustitución de arena por polvo de sílice	37
Figura 9. Evaluación de la porosidad aparente para mezclas con sustitución de arena por polvo de sílice.....	37
Figura 10. Evaluación de la porosidad efectiva para mezclas con sustitución de arena por polvo de sílice.....	38
Figura 11. Comparación de la resistencia a la compresión del concreto.....	39
Figura 12. Comportamiento mecánico del concreto vs porcentaje de yeso.	41
Figura 13. Comportamiento mecánico del concreto vs porcentaje de yeso	42
Figura 14. Consistencia de concretos con reemplazos de residuos de porcelanato.....	45
Figura 15. Comportamiento mecánico del concreto con residuos de porcelanato como sustitución parcial de arena.	46
Figura 16. Evolución de la resistencia a la compresión de concretos con uso de vidrio molido.....	48
Figura 17. Comparación de precios con respecto a la adición de porcelanato molido.....	56



Resumen

El estudio de los micromateriales inertes en la construcción está siendo tratado en los últimos años, porque a que además de ser materiales aprovechables y sustentables con el medio ambiente, pueden mejorar algunas de las características del concreto. Por tal razón, la presente monografía tiene como objetivo profundizar en el estudio de los Micro materiales inertes y analizar su incidencia en los concretos hidráulicos. Lo anterior, pudo lograrse por medio de una revisión bibliográfica y búsqueda de literatura en bases de datos de la universidad de Cartagena, repositorios de universidades a nivel nacional e internacional, portales de revistas científicas, y libros y enciclopedias. El análisis realizado se fundamentó en dos variables de carácter netamente cualitativo: en primera medida se determinó si los materiales eran usados como suplemento del cemento o reemplazo de la arena o grava; por otra parte, se indagó la influencia de este tipo de materiales según el origen de formación del material: metamórfico, sedimentario e ígneo.

Se obtuvo como resultado que los micromateriales con mejor comportamiento en el hormigón son el mármol y los residuos de cerámica (porcelanato) mejorando las características (estado fresco) y (estado endurecido). También se realizó un estudio de viabilidad económica, por el que se constató que los materiales mencionados anteriormente no representan grandes beneficios a nivel de precios, debido a que, según el análisis de precios unitarios realizado, el concreto con adición de micromateriales disminuye su valor alrededor de un 5%. Además, se recomienda tener en cuenta otro tipo de variables como el transporte y geografía que permitan tener acceso fácil a los micromateriales, con el fin de optimizar los costos.

Por último, se espera obtener un estudio que aporte para la investigación de materiales alternativos para el concreto en la comunidad académica, además de motivar a implantar una norma que establezca el control de calidad en estos materiales para que se optimicen la implementación y el control para su uso en la construcción. También se insta al estudio de residuos de origen metamórfico e ígneo, como el basalto, gabro y el polvo de sílice, que son muy pocos los estudios a cerca de ellos, pero se ha demostrado su factibilidad para el concreto.



Introducción

A lo largo de la historia los seres humanos han propendido por transformar las materias primas que les oferta el entorno haciendo uso de ellas y optimizando el proceso de construcción desde mucho tiempo atrás. No obstante, es innegable que desde finales del pasado siglo se ha incursionado en otra fase o etapa desde la cual se ha incursionado en aditivos al concreto hidráulico con lo que se ha potenciado el proceso de construcción y mejorando rendimientos a corto, mediano y largo plazo (Antón, 2018). Lo anterior parte de las innovaciones que se han venido realizando sustancias, elementos y recursos disponibles en la naturaleza que gracias a su tamaño y propiedades confieren a las estructuras mejores condiciones a nivel de cohesión durabilidad, y resistencia y que hoy por hoy son parte de un proceso de transformación y evolución de la construcción (García, 2020).

Ahora bien, en la actualidad los profesionales de la construcción requieren de procesos de gestión desde los que necesitan acciones para la concepción y contextualización de los procesos para la adecuación de materiales. Para la construcción desde un análisis en el que se optimicen recursos para un mejor desempeño y rentabilidad visualizando desde los patrones de calidad y durabilidad de los productos a entregar (García, 2017). En el escenario que se expone, no se puede desconocer que en la industria de la construcción se requieren de procesos evolutivos y transformacionales de la forma como se efectúa a fin de que se optimicen los resultados, se mejoren las acciones y se cumplan las metas propias del ejercicio. Lo anterior indica que se requieren de parámetros de referencia desde los cuales se brinden opciones a los ingenieros civiles y profesionales de la construcción de como optimizar los logros.

En este sentido es claro que la evolución de los procesos parte de una integración de elementos conscientes e inconscientes de adición y modificación de las configuraciones iniciales del concreto. En este sentido, se ha ido consolidando poco a poco un estándar de aditivos acorde a los requerimientos de durabilidad, permeabilidad, resistencia, compactación, ente otros exigiendo cada vez un mayor compromiso estructural.

Teniendo en cuenta lo descrito es claro que en un mundo tan globalizado y avanzado en tecnología impacta positivamente el apartado de la construcción entendiendo que hay un mayor flujo de la información permitiendo la optimización continua de procesos y adaptaciones. Se busca entonces un mejor rendimiento costo beneficio logrando que los



profesionales de construcción cuentan no solo con maquinaria de punta sino con asistencia e información en tiempo real (Silva, 2020). Lo analizado en este documento pone de manifiesto la necesidad de un proceso de análisis desde los que se puedan gestionar información consecuente para la configuración y estructuración de un apartado académico en el que se brinde a los profesionales de la construcción herramientas y directrices. Lo expuesto permite que se tenga mejor referencia para tomar decisiones en cuanto a la adición de micro materiales inertes con los cuales se pueden mejorar la calidad del concreto hidráulico acorde a los requerimientos y necesidades de un contexto específico.

Teniendo en cuenta lo descrito este estudio se fundamenta en la línea de investigación de materiales de construcción en obras civiles, a partir de la cual se direccionaron acciones puntuales y delimitadas en el marco de los micromateriales inertes y sus aportes al concreto hidráulico. Es claro que se adicionan para potenciar su rendimiento, ofertando un documento en el que se pueden proponer directrices específicas de aplicabilidad.

Por otro lado, es claro que recientemente se vienen abanderando estudios desde los que se efectúa un análisis de los micromateriales inertes de modo que se afronte el mercado evolutivo y competitivo de la construcción en los que se ha venido evaluándola compactación, rendimiento, calidad, costes y durabilidad. Con ello se pretende brindar argumentos para la toma de decisiones en cuanto al uso de cada una de ellas acopladas al escenario y contexto, dado que cada aditivo tiene y confiere propiedades específicas al concreto hidráulico. Teniendo en cuenta que es un estudio de revisión documental no se enfoca en un sector geográfico específico sino en un segmento laboral, es decir se pretende brindar una herramienta a los profesionales de la construcción y sus afines con la configuración de un recurso teórico y reflexivo.

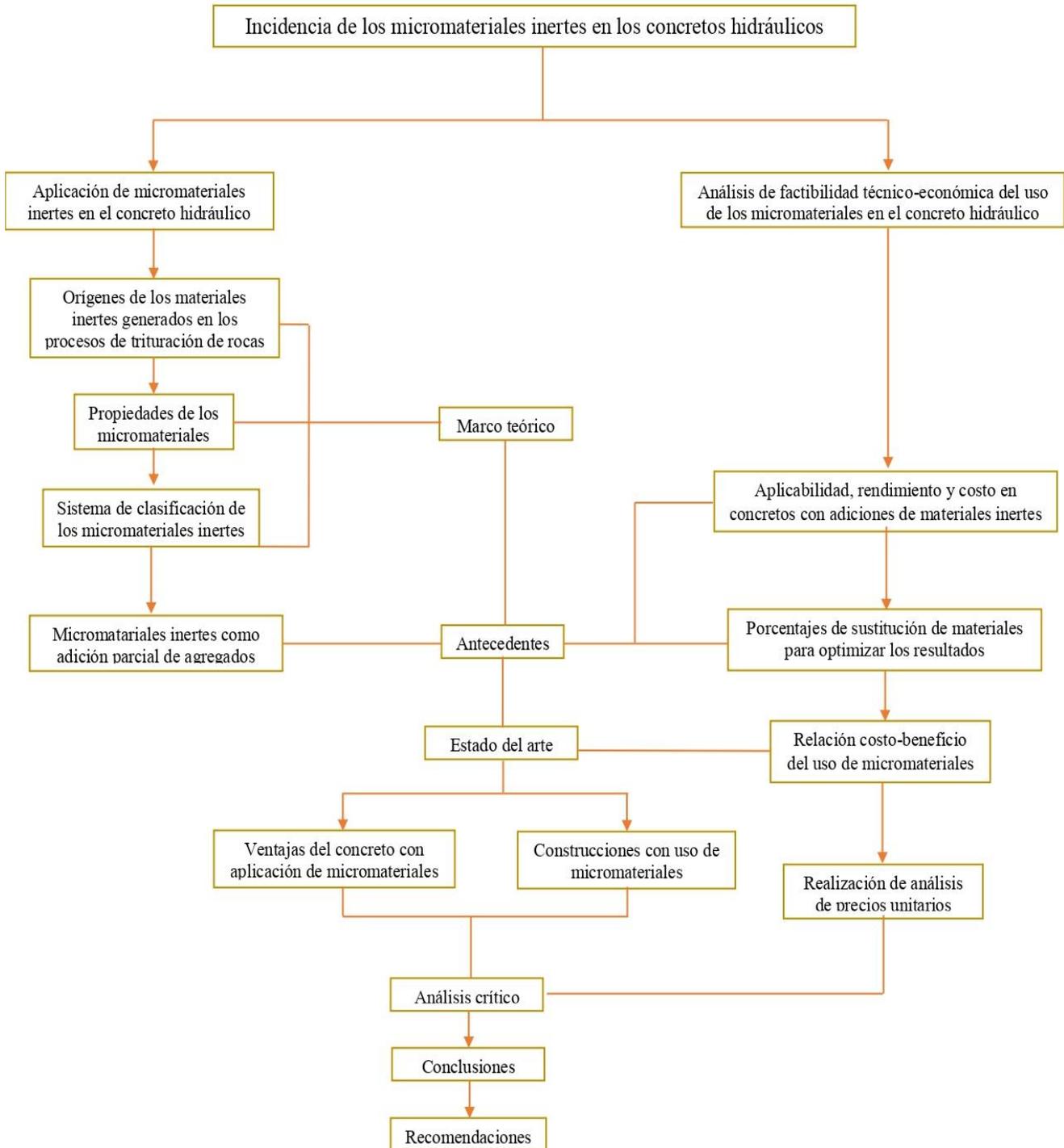
En síntesis, este estudio se enfoca en dar respuesta a la necesidad el uso de los micromateriales inertes en la mejora del concreto hidráulico y sus propiedades a fin de facilitar la toma de decisiones en adiciones por parte de ellos profesionales de la construcción. Lo anterior, entendiendo esto como una necesidad imperativa desde la reducción de costos y optimización de la eficiencia y eficacia de los procesos, los cuales de acuerdo a la escala en la que se manejan así se hacen las adiciones.



1. Marco metodológico

1.1. Diseño metodológico

Figura 1. Diseño metodológico de la investigación



Nota. Fuente: Autores



1.2. Métodos de recopilación de información

El tipo de estudio que nos ocupa es de carácter cualitativo descriptivo desde el cual se analiza la incidencia o influencia de los micromateriales inertes como adición en concreto hidráulicos, para lo cual se sigue por los postulados de autores representativos de esta línea como los son Hernández (2018), Taylor, Bogdán, Fuster y otros. Para esto es necesario realizar una revisión documental que permita un proceso descriptivo y argumentativo acorde con las exigencias dispuestas, finiquitando con tablas comparativas, generación de análisis de precios unitarios y estableciendo juicios de ingeniería que permitan confirmar la incidencia de los micromateriales inertes en el concreto.

Dado que el estudio se desarrolla desde una revisión de documentos que se consolida en un proceso descriptivo sin experimentación en donde no se imprimen estímulos no condicionantes, sino que se contrasta un reporte documental y bibliográfico obtenido de una búsqueda exhaustiva que permita una argumentación consecuente a la temática de los micromateriales inertes, y su influencia en las propiedades del concreto hidráulico (Taylor & Bogdan, 1987).

Teniendo en cuenta la naturaleza del estudio y los parámetros por los cuales se rige esta investigación se han dispuesto para la consecución de los datos de modo que sean fiables una serie de criterios y parámetros apoyados en descriptores y categorías que faciliten la factibilidad del argumento final a fin de que sea válido, pertinente y congruente al problema de la búsqueda de nuevos materiales que se empleen en el concreto (en este caso los micromateriales inertes) acorde lo que proponen Bernal y sus colaboradores (Bernal et al., 2010) disponiendo un registro de la documentación que se obtiene acorde a los objetivos que se dispusieron a fin de que los resultados puedan ser validados y verificados en el contexto que se estudia y analiza. El medio principal para la búsqueda de estudios, investigaciones y parámetros es la base de datos de la universidad de Cartagena y su repositorio, y de igual forma fuentes externas en las cuales se encuentre información secundaria acerca del tema de los micromateriales inertes, como Google Academics, tomando como referencia estudios no mayores a diez años de realización, en idiomas español, inglés, y portugués, parte de investigaciones desarrolladas por Universidades para tesis de grados, post-gradados y maestrías, o artículos científicos de revistas indexadas.



2. Marco teórico

2.1. Generalidades sobre el concreto

El concreto es una roca creada por el ser humano, diseñada y producida de acuerdo a normas establecidas para fines y aplicaciones que se requieren en un proyecto determinado y con características puntuales, como por ejemplo su resistencia a la compresión y tracción, durabilidad y trabajabilidad (Torres & Muñoz, 2012). Es por ello que desde que fue patentado en el año 1824, se consolidó como un material de construcción de excelente reputación representando ventajas como: bajo costo, acceso a materias primas, alto rendimiento en obra, etc. Además, dado que se manipula en estado fresco, puede tomar cualquier forma. La combinación de estas características es la razón principal por la que es ampliamente utilizado en la construcción. El concreto brinda resistencia y durabilidad a cualquier estructura que necesite ser tratada o construida, ya que posee ciertas propiedades que lo hacen altamente resistente a muchos factores ambientales, evitando procesos como carbonatación, lixiviación, ataques de ácidos y sulfatos, y expansiones debido a la actividad química álcali-agregado (Agresott, 2012).

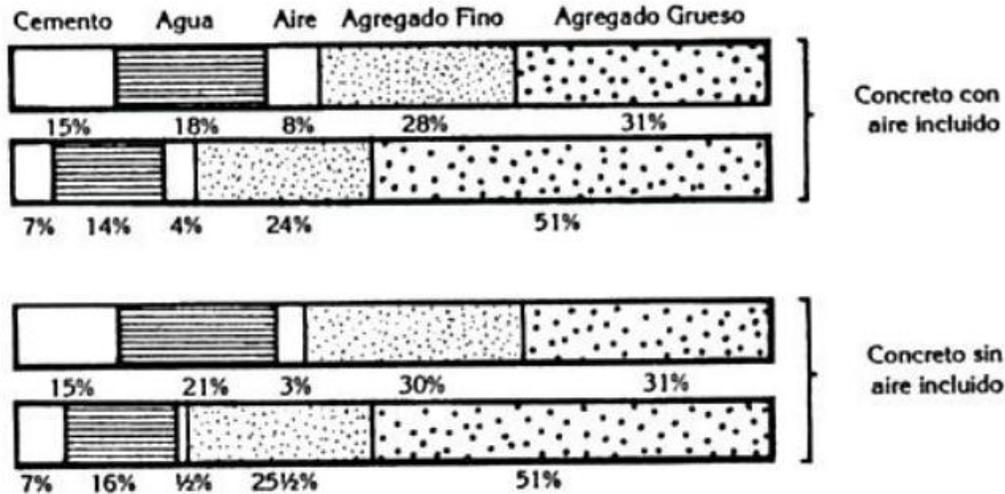
2.2. Componentes del concreto

El concreto es un producto final de la mezcla de varios materiales que a partir de reacciones físico-químicas alcanzan la resistencia necesitada para ser aprovechado como material estructural de construcción. Es decir, el concreto está conformado principalmente por tres materiales: cemento, agua y agregados. Cuando es necesario mejorar las propiedades del concreto, se agrega un cuarto componente, denominado aditivo.

La mezcla del concreto comienza cuando ocurre una reacción química conocida como hidratación, dada entre el agua y el cemento (Figura 2). En ella, las sustancias se unen para formar una mezcla que al fraguar o endurecerse pierde sus propiedades flexibles y se convierte en un material con solidez y consistencia (Castillo, 2018). Básicamente, cada material aporta sus propiedades, teniendo una incidencia específica sobre el producto final. Por esto es necesario seguir unas proporciones generales de cada uno de los materiales que lo constituyen que permitan que el concreto no se deteriore a largo plazo (Sánchez, 2001).



Figura 2. Materiales constituyentes del concreto



Nota. Fuente: Sánchez, 2001.

2.2.1. Cemento

El cemento es un conglomerante hidráulico, es decir, producto que al ser mezclado con agua forma una pasta cohesiva y endurecedora, dando como resultado productos mecánicamente resistentes y duraderos que se hidratan tanto en el aire como en el agua. La clasificación del cemento puede basarse en: la naturaleza de los ingredientes, la clase de resistencia o sus propiedades específicas, si es necesario (Instituto Costarricense del Concreto, 2009). En Colombia, la norma encargada para la regulación de materiales de construcción, establece seis tipos de cemento, cada uno para usos distintos y con propiedades que garantizan la funcionalidad del material para todos los ambientes posibles: tipo UG (Uso General), tipo ART (Alta resistencia temprana), tipo MRS (Moderada resistencia a sulfatos), tipo ARS (Alta resistencia a sulfatos), tipo MCH (Moderado calor de hidratación), tipo BCH (Bajo calor de hidratación) (Icontec, 2013).

2.2.2. Agua

El agua es un componente importante de las mezclas de hormigón y mortero porque permite que el cemento desarrolle su capacidad de unión. La NTC 3459 habla sobre la calidad del agua en el hormigón. Por cada cantidad de cemento existe la cantidad necesaria de agua de todo el árido para lograr su hidratación; el resto del agua solo sirve para aumentar la fluidez de la mezcla, llevando a cabo funciones de lubricación y controlabilidad adecuadas para la mezcla fresca. El exceso de agua es la cantidad que queda en la mezcla cuando el hormigón



se endurece, esta crea porosidad al momento que el material fragua, induciendo en la reducción de la resistencia. Debido a ello, cuando se requiere una mezcla con poca consistencia y alta plasticidad, no puede ser diluida con agua, sino con la añadidura de aditivos plastificantes. El agua utilizada en la preparación del hormigón y mortero debe ser apta para el consumo humano, libre de sustancias como aceites, ácidos, álcalis y sustancias orgánicas (Gutiérrez, 2003).

2.2.3. Agregados

Los agregados, también denominados áridos o inertes, son fragmentos o granos, usualmente pétreos, tiene como objetivo específico reducir el coste de la mezcla y dotarla de ciertas propiedades ventajosas, entre las que destaca especialmente la reducción de la contracción por solidificación o contracción plástica. Los áridos constituyen la mayor parte de la masa del hormigón, ya que constituyen del 70%-85% de su peso, por lo que las propiedades de los materiales inertes son tan importantes para la calidad final de la mezcla. Las propiedades de los áridos empleados deben favorecer el desarrollo de determinadas propiedades en el hormigón, entre las que destacan: trabajabilidad, requisitos de contenido de cemento, adherencia a la lechada y desarrollo de resistencias mecánicas. Teóricamente se contempla la conformación de la mezcla, por estos materiales pétreos, en dos fracciones diferentes de acuerdo con su tamaño: agregado grueso (usualmente piedra picada, canto rodado natural, o canto rodado picado) y agregado fino (arena natural o arena obtenida por trituración) (Porrero et al., 2009).

La principal característica de los agregados es la variación del tamaño de todos sus granos, la cual se conoce como granulometría (Tabla 1). Idóneamente, debe haber una secuencia gradual o escalonamiento de tamaños, desde los granos de mayor dimensión del agregado grueso, hasta los más finos de la arena (Porrero et al., 2009).

El agregado grueso es una combinación entre gravas o piedras trituradas con partículas de dimensiones mayores a 5mm (0,2 pulgadas), y generalmente entre 9,5mm y 37,5mm (3/8-3/2 pulgadas). La incidencia de los agregados gruesos recae directamente sobre las propiedades mecánicas, como lo son la resistencia y la durabilidad. Por otra parte, los agregados finos o arena, conforma la mayor parte del porcentaje en peso del concreto. Influyen directamente sobre la trabajabilidad del producto final, y mayormente sobre otras propiedades en estado fresco (Figura 2) (Méndez, 2012).



Tabla 1. Clasificación de agregados según su tamaño

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

Nota. Fuente: Sánchez, 2001.

Algunas propiedades de los agregados, que deben ser tenidas en cuenta para su control de calidad son las siguientes (Kosmatka et al., 2004):

- **Forma y textura superficial de las partículas:** Esta característica incide en mayormente en las propiedades del concreto fresco, esto se debe a que partículas, por ejemplo, de textura áspera, angulares o alongadas, precisan de mayor cantidad de agua para que el concreto tenga una manejabilidad ideal. Análogamente, la adherencia entre el cemento y el agregado pétreo aumenta si en vez de usar partículas de forma lisa y redondeada, se utilizan de textura áspera y angular.
- **Masa volumétrica (unitaria):** Se refiere al peso del agregado requerido para rellenar un recipiente con un volumen unitario especificado, referente al ocupado por los agregados y por los vacíos entre las partículas del mismo. Esta propiedad afecta directamente la demanda de pasta de la mezcla.
- **Masa específica relativa (Densidad relativa):** Es relación existente entre la masa del agregado y la masa de agua con el mismo volumen absoluto,
- **Masa específica (Densidad):** Esta propiedad es el resultado del producto entre la masa específica relativa y la densidad del agua.
- **Absorción y humedad superficial:** La absorción se define como el aumento en la masa del agregado en virtud de la cantidad de agua presente en los poros del material,



excluyendo el agua adherida a la superficie exterior de las partículas, esta última es denominada como humedad superficial. Los agregados que cuentan con una alta absorción suelen tener alta contracción por secado, y afectar las propiedades del producto final.

- **Resistencia y contracción:** La resistencia de los agregados no incide directamente sobre las características del concreto, al menos que se trate de uno de alta resistencia, ya que los esfuerzos en el agregado son frecuentemente, mucho mayores a la tensión en la totalidad de la sección de concreto.

Los ensayos para medir la calidad de los agregados se encuentran estipulados en Colombia por la norma Invías (Tabla 2).

Tabla 2. Ensayos de calidad de agregados

Ítem	Material	Ensayo
1	Material granular fino (arena de trituración)	I.N.V. E-133-13 Equivalente de arena de suelos y agregados finos
		I.N.V. E-213-13 Análisis granulométrico de los agregados gruesos y finos
		I.N.V. E-222-13 Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino
2	Material granular grueso (triturado de 3/4")	I.N.V. E-213-13 Análisis granulométrico de los agregados gruesos y finos
		I.N.V. E-218-13 Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores de 37 mm 1 1/2" por medio de la máquina de los ángeles
		I.N.V. E-223-13 Densidad, densidad relativa y absorción del agregado grueso
		I.N.V. E-227-13 Porcentaje de las partículas fracturadas en un agregado grueso
		I.N.V. E-230-13 Índices de aplanamiento y alargamiento de los agregados para carreteras

Nota. Fuente: Invías. Adaptado por: Camargo & Higuera, 2016.

2.3. Propiedades del concreto

Las características del concreto son aquellas que definen la calidad del producto en estado tanto fresco (edad temprana del concreto), como endurecido (edades mayores del concreto), indicando la validez de la mezcla, y sugiriendo si existió alguna falla al momento del diseño de la misma.

2.3.1. Propiedades en estado fresco

Alguna de las propiedades del concreto en estado fresco, son las siguientes:

- **Manejabilidad (trabajabilidad):** Se refiere a como la capacidad del hormigón de ser colocado, suficientemente compactado y terminado sin segregación ni fugas; la trabajabilidad se relaciona con el término plasticidad, que se define como una



propiedad del hormigón fresco si, desmoldado, puede tomar forma y cambiar lentamente. La manejabilidad no debe confundirse con la consistencia o la fluidez, esta última relacionada con el estado de mezcla seca (dura) o fluida (blanda), es decir, el porcentaje de humedad. Dentro de ciertos límites, las mezclas húmedas son más fáciles de manejar que las mezclas secas, pero dos mezclas de la misma consistencia no son igualmente manejables, para ello contar con la misma plasticidad (Gutiérrez, 2003).

- **Segregación:** Es la separación existente entre los componentes de la mezcla de hormigón. La segregación, puede ser originada por factores como la diferencia de tamaño entre las partículas, colocación y compactación del concreto, etc. Ambos extremos de consistencia de la mezcla producen segregación: si se cuenta con una mezcla muy seca, los materiales no se acomodan bien entre sí, dejando espacios vacíos de gran tamaño; en una mezcla muy fluidas, existe el riesgo de separación de la pasta (cemento y agua) (Gutiérrez, 2003).

2.3.2. Propiedades en estado endurecido

Hacen referencia en mayor medida a las características mecánicas del concreto, que alcanzan su plenitud a avanzadas edades. Algunas de ellas son las siguientes:

- **Resistencia:** Esta es una propiedad que cuantifica el esfuerzo máximo real al que puede someterse la mezcla de concreto a diferentes edades. Puede ser medida a compresión, tracción directa, flexo-tracción y tracción indirecta (ensayo brasileño). El control del concreto se realiza por ensayos de rotura a compresión. En ocasiones, sin embargo, el ensayo de flexotracción resulta ser el más apto para control de calidad, por reflejar más fielmente las condiciones de trabajo del concreto, como puede ser el caso de los concretos empleados en la construcción de pavimentos de carreteras o aeropuertos (Instituto Costarricense del Concreto, 2009).
- **Durabilidad:** Es aquella propiedad del concreto que prueba la calidad del concreto y otras características anteriormente, al tener una vida útil avanzada y un desgaste por exposición a ambientes nocivos. En este orden de ideas, un concreto es durable en cuanto conserva su conformación con el paso del tiempo al igual que sus características a nivel mecánico. Algunas características inciden directamente sobre la durabilidad del concreto, por ejemplo, la permeabilidad, los de composición del



concreto o variación de volumen a causa de fenómenos climatológicos. La durabilidad también depende de condiciones exposición al ambiente, situación que puede acelerar el deterioro por causas físicas, químicas o mecánicas (Gutiérrez, 2003).

2.4. Micromateriales inertes

2.4.1. Antecedentes

El concreto es un material cuya producción requiere de un alto gasto de recursos, tanto hídricos, como energéticos, lo que conlleva a convertirlo en un material potencialmente perjudicial para el medio ambiente, teniendo en cuenta además, el consumo que lo lleva a ser el material más usado por el hombre. En este sentido, es de vital importancia comprender la estructura del concreto y su producción a fin de comprender la magnitud de las afectaciones que sufre el medio ambiente con la demanda del material.

El gasto hidráulico para la obtención del producto final es elevado, pero es en la producción del cemento la parte en la que más se requiere gasto (también energético), y a consecuencia de ello se producen grandes cantidades de Dióxido de Carbono (CO₂) que se vierten directamente al medio ambiente (Prieto & Castellanos, 2017). Por tal razón se incentiva a la búsqueda de nuevos materiales, que obliguen a la industria a reducir el gasto y por ende los impactos a fenómenos ambientales como el calentamiento global y el cambio climático.

Los micromateriales inertes se perfilan como dichos componentes alternativos para el concreto. Estos son, materiales que se encuentran comúnmente en residuos sólidos urbanos (RSU), que relativamente no presentan un riesgo potencial al medio ambiente, pero ocupan un volumen mayor que otro tipo de residuos en espacios de disposición final (Ávila, et al., 2020). También se incluyen como parte de los desperdicios de la construcción, proveniente de suelos, tierra, lodo, rocas y restos de concreto (Arredondo, 2011). Esta situación ha obligado a que se profundice en el estudio de micromateriales inertes como material de adición al concreto, y se ha comprobado en distintas investigaciones que sin tener intervención directa dentro de las reacciones químicas de la producción de concreto hidráulico, mejoran propiedades como la trabajabilidad y consistencia en estado plástico, reducción de reactividad álcali-sílice, durabilidad, propiedades elásticas, térmicas cambios volumétricos y peso unitario del material endurecido (Torres & Muñoz, 2012).



Este es el argumento que plantean los autores Prieto & Castellanos en el estado del arte realizado sobre propiedades de concretos y morteros modificados con nanomateriales. Aunque no es una revisión directa sobre los micromateriales inertes, insta a la búsqueda de materiales de sustitución en la área o cemento, con fines sostenibles y ecológicos para la producción de concreto, que emulen las propiedades convencionales del material, y además, abarca los aditivos que adicionalmente mejoren las propiedades mecánicas, la plasticidad y durabilidad (Prieto & Castellanos, 2017).

Entonces, se puede afirmar que la indagación sobre nuevos materiales para su uso en concreto, no solo obedece a motivos ecológicos, si no a la búsqueda de optimización de procesos de producción de hormigón (fraguado y curado), y mejora de propiedades como resistencia a la compresión, tracción, ambientes agresivos, trabajabilidad, fluidez y consistencia. Esto se puede tomar como un punto de partida, ya que existe una multitud de materiales que pueden usarse tanto como reemplazo de cemento, de agregados, así como de aditivos para el concreto, independientemente si los fines de la investigación sean ecológicos, económicos, o físico-mecánicos.

Uno de los materiales usados son los micromateriales inertes, que se enmarca como componente alternativo en el concreto cuyo uso varía según diferentes factores como: disponibilidad de materias primas (relacionado con la viabilidad económica), modo de empleo (sustituto parcial de la arena o aditivo al cemento), y calidad del material. Como se mencionó anteriormente, los desperdicios de productos de la industria de la construcción se definen como una mezcla de materiales inertes, y también algunos de origen industrial, como aquellos que fueron probados en el estudio realizado por Acevedo & Posada (polietileno tereftalato) como reemplazo parcial de la arena, y que brindó resistencia similar a la compresión con respecto a probetas de hormigón convencional, mejorando la manejabilidad y contribuyendo a la construcción sostenible (Acevedo & Posada, 2019). En contraste a ello, se encuentran estudios que utilizan micromateriales inertes provenientes de rocas y suelos (calizas, mármol, granito, etc). Estos indican que la calidad y cantidad de uso de material como sustitución del cemento influye directamente en las ventajas técnicas que puede ofrecer dicha sustitución, siendo un ejemplo de estas la menor demanda de agua, ahorro de energía, menor porosidad capilar y mejor comportamiento ante ambientes agresivos (Fabra, et al.,



2017). Además, mejora propiedades en estado fresco como la trabajabilidad de la mezcla (Roa, O, 2016).

En este orden de ideas, el uso de micromateriales en el concreto no puede argumentarse, ni comprobarse desde un enfoque originario (como lo son las causas que llevaron a la búsqueda de los componentes alternativos: medioambientales, sostenibles, económicas), si no desde distintas otras variables, como el modo de empleo del micromaterial inerte (reemplazo de la arena o suplemento). Dentro de este marco, el porcentaje ya sea de adición o sustitución, abre un amplio campo de investigación para el descubrimiento de los distintos modos de uso de este tipo de materiales y la optimización de los procesos que permitan mejorar la calidad del producto final.

Una limitante encontrada en el estudio de los micromateriales inertes es que no ha sido estudiado a profundidad. No obstante, en busca de concretos alternativos algunas investigaciones se fundamentan en la mezcla de un micromaterial como sustitución parcial de la arena o cemento, más otro material usado como grava o en su defecto también como arena; en busca de concretos alternativos. Tal es el caso del estudio del esquisto y ceniza de lodo de papel como sustitución parcial de la arena, empleados para un concreto de resistencia de 3000 Psi. Los objetivos de este estudio fueron evaluar la incidencia de las mezcla de materiales anteriormente mencionadas, en propiedades en estado fresco del concreto como la consistencia y la exudación; En adición a esto se realizó el estudio sobre propiedades del concreto en estado endurecido, como la resistencia a la flexión y a la compresión. Los resultados obtenidos indicaron que el reemplazo mejoró propiedades como la resistencia a la compresión y la exudación, y resultó no incidir sobre la compresión y la consistencia (Almanza & Zamudio, 2020). Un estudio similar se realizó con cuarzo utilizado como grava y arena de cuarzo y de sílice como sustitución de la arena, presentando mejoras en propiedades estéticas como la transmitancia, pero sin influir sobre las propiedades mecánicas (Jaramillo & Moncaleano, 2016).

La disposición geográfica de las materias primas también es una variable a tener en cuenta en la presente temática, debido a que la disponibilidad o no de los materiales afecta la viabilidad de su implementación al concreto. Ahora bien, debe entenderse disponibilidad no solo a la extracción de materias primas de yacimientos o canteras, si no a la disposición de los componentes como residuos sólidos. Un ejemplo de esto es el caso del residuo de mármol



en México, ubicado exactamente en la región de la Comarca lagunera, en el norte del País, dónde se han identificado diferentes “tiraderos” que afectan los cuerpos de agua y contaminan el medio ambiente. Entonces, el aprovechamiento de los residuos de mármol de los tiraderos para su uso en la construcción se ha convertido en una opción sostenible, que soluciona un problema de residuos industriales (Chávez et al., 2015). El argumento de la investigación plantea que la factibilidad del uso de mármol en la zona como sustitución parcial de la arena, o adición a pastas cementantes en el concreto, no fuera posible sin los residuos presentes en la zona.

Por último, el polvo de mármol, como componente alternativo del concreto responde a la necesidad de búsqueda de materiales que brinden ventajas técnicas y constructivas con respecto al concreto convencional (Cockburn et al., 2011). Este tipo de material inerte es usado para mezclas de concreto autocompactante. Tal como en las anteriores investigaciones, la variable de estudio es el porcentaje de adición en las pastas cementantes, con el fin de que funcione como un “filler” en el concreto autocompactante, que es utilizado para alcanzar la fluidez y cohesión del producto final compensando el impacto que tiene el aumento de volumen de pasta de la mezcla (aumento de lubricación en el sistema y fluidez), El “filler” actúa como relleno de los espacios vacíos generados por el aumento de volumen, cambiando la porosidad de la pasta y elevando levemente sus propiedades mecánicas.

No obstante, el estudio realizado por Cockburn, realiza una comparación del polvo de mármol utilizado como filler para concreto autocompactante, con filler calizo de machaqueo producido en Barcelona, sugiriendo que, el mármol debe contar con suficiente disponibilidad, de tal forma que haga beneficioso el proceso de adición en términos de factibilidad con respecto a otros agregados y/o aditivos disponibles en la zona.

El autor sugiere de forma indirecta la necesidad de comparar el comportamiento de micromateriales inertes en el concreto con otro tipo de componentes distintos además de los convencionales y resalta la importancia de la ubicación geográfica con respecto a su disponibilidad para comprobar que su implementación cumpla con todos los objetivos mencionados anteriormente (economía, propiedades mecánicas, sostenibilidad, ecología, etc.) y que haga viable la implementación de este tipo de materiales en el mercado.

A modo de complemento del estado del arte, en la tabla 3 se muestran el efecto general y algunos detalles, sobre el uso de los agregados pétreos en el concreto (Chan et al., 2003):



INCIDENCIA DE LOS MICROMATERIALES INERTES EN LOS CONCRETOS HIDRÁULICOS



Tabla 3. Agregados pétreos en el concreto

Tipo de roca y origen	Nombre	Textura	Estructura	Observaciones relativas a su uso en el concreto
Plutónicas	Granito	Fanerítica	Batolitos cuerpos intrusivos	Fácilmente intemperizable en clima tropical, intemperismo esférico
	Diorita	Fanerítica	Cuerpos intrusivos	No estudiado
	Gabro	Fanerítica	Cuerpos intrusivos	Alto peso específico
Volcánicas piroclásticas	Riolita	Afanítica porfídica	Domos flujos de lava	Altamente reactiva con los álcalis del cemento
	Andesita	Afanítica porfídica	Derrames de lava	No estudiado
	Basalto	Afanítica vesicular	Derrames de lava	Alta resistencia a la compresión, porosa y resistente a la abrasión
	Tobas	Porfídica	Pseudoestratificación	Dependiendo de la mineralogía pueden ser reactivas y algunas son muy deleznable
Clásticas	Conglomerado	Fragmentos redondeados 2mm de diámetro	Estratificación gruesa, lentes rellenos de cauces, masiva	No estudiado
	Arenisca	Fragmentos 2mm a 1/16 mm de diámetro	Estratificación masiva lentes	Puede contener cementante sílico que es reactivo con los álcalis del cemento
	Lutita	Fragmentos 1/6 mm de diámetro	Laminaciones masiva	Puede presentar fisibilidad, baja resistencia a la compresión, puede hidratarse a través de los materiales arcillosos
No clásticas	Caliza	Cristalina	Estratificación masiva	Altamente soluble
	Marga	Cristalina	Estratificación	Sus minerales arcillosos puede hidratarse fácilmente
	Dolomita	Cristalina	Estratificación masiva	Sus componentes mineralógicos pueden provocar la reacción álcali-carbonato (a través de la desdolomitación)
	Yeso	Cristalina	Vetas y lentes	Muy ligero, baja resistencia a la abrasión
	Carbón	Criptocristalina	Mantos, vetas, lentes	Ligero, deleznable y/o frágil, produce problemas durante la hidratación del cemento pórtland
Foliadas	Pizarra pilita	Foliada de grano fino	Foliación	Deleznable
	Esquistos	Foliada de grano medio	Foliación	A veces muy deleznable
	Gneiss	Foliada de grano grueso	Foliación masiva	No estudiado
No foliadas	Hornfels	Afanítica	Masiva	Puede presentar sílice del tipo reactivo con los álcalis del cemento
	Cuarcita	Granoblástica	Masiva	Demhornfels
	Mármol skarn	Granoblástica	Masiva	No estudiado

Nota. Fuente: Chan et al., 2017.



3. Casos de estudio: Usos de micromateriales según su origen o modo de formación

La pregunta alrededor de la aplicación de los micromateriales inertes en el concreto hidráulico gira en cuanto a la cantidad de agregado o aditivo como porcentaje total del concreto debe ser empleado, y si resulta beneficioso para las propiedades del producto final. La disponibilidad de estudios sobre esta temática se concentra en países cuyo gobierno ha establecido normatividad sobre los materiales inertes (Caso Brasil) (Lisboa, 2004), o simplemente han explorado de forma constante (Colombia) (Jaramillo & Moncaleano, 2016).

3.1. Rocas origen metamórfico en el concreto hidráulico

Metamorfismo es la transformación de una clase coherente de roca, en otra, por debajo de la zona de intemperismo y por encima de la zona de fusión. Dicha transformación resulta en el estado sólido como consecuencia factores físico-químicos como la temperatura, la presión y otras reacciones; los cambios están asociados a las fuerzas que pliegan, fallan capas, inyectan magma y elevan o deprimen masas de roca. En este sentido, una dureza mayor de la roca resultante es producto a su estructura atómica, ya que en la profundidad el material fluye debido a la presión. Es más probable que las rocas de grano fino sufran las transiciones anteriores porque los minerales proporcionan más área para los agentes químicos. Las rocas formadas a partir de minerales de alta presión y alta temperatura también son resistentes a nuevos cambios, a diferencia de otras rocas como las arcillas, que son más susceptibles porque en realidad se formaron en la superficie (Duque, 2020).

3.1.1. Estudios sobre la influencia del Mármol

El mármol es la roca más común y conocida por excelencia. Este es producido por el metamorfismo de las calizas ricas en carbonato cálcico (calcita); cuando una intrusión ígnea cercana somete la calcita a temperaturas extremas, empieza por desprender dióxido de carbono y formando entonces cristales de calcita nuevos y transformándose en mármol, a través de la reacción con el gas. Los nuevos cristales tienen forma y tamaño de granos regulares y los fragmentos no están distribuidos aleatoriamente en la roca (como en la original), concediéndole solidez y textura uniforme (Duque, 2020).

El estudio del mármol para su uso en el concreto, se enfoca en la utilización de los residuos de la industria de dicha roca. A prueba de ello se encontró el estudio de Petry, que se rigió por las normas Brasileñas NBR NM (248, 53, 248, 52, 30, 45, 23, 67, 578, 5739,



7222). En este, se optimizó un programa experimental en el cual con el 0% de adición se buscaba establecer la resistencia a compresión base, con el 10% mejorar la resistencia a la tracción por compresión diametral, y con el 20% mejorar la absorción por capilaridad (Petry, 2017).

- El peso volumétrico de la arena es de un promedio de 1,50 kg/m³
- El peso volumétrico del agregado fino es de un promedio de 2,98 kg/m³
- El diámetro medio del polvo de mármol sin tratamiento es de 32,27 μm .
- El diámetro medio del polvo de mármol después de tratamiento es de 22,50 μm .
- Absorción de la arena 1.05 %
- Cemento utilizado: Tipo II-Z.

Para la fabricación del hormigón se adoptó el método de dosificación recomendado por Helene y Terzian (1992), que se basa en encontrar curvas que expresen el comportamiento de los materiales, y no de un rasgo aislado para una determinada resistencia característica. De la misma forma, y con el fin de comprobar la variación de las propiedades que aporta al hormigón la adición de residuos de mármol, se definieron tres mezclas con tres relaciones agua/cemento cada una, de esta forma se posible verificar la influencia de los contenidos de adición de residuos en el comportamiento de las propiedades mecánicas y la durabilidad, a fin de encontrar un nivel óptimo de adición de residuos que, al final, presente las mejores características técnico-económicas.

Se ensayaron diez probetas por cada mezcla, en moldes cilíndricos de dimensiones 10x20cm. Para determinar la capacidad de resistir esfuerzos, se realizaron ensayos de resistencia a la compresión simple, y resistencia a la tracción por compresión diametral. El ensayo de absorción de agua por capilaridad tuvo como finalidad encontrar la cantidad de agua absorbida por el espécimen, a través de sus huecos capilares, así como verificar visualmente la altura de ascenso del agua en los mismos. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4 y 5.



Tabla 4. Resistencia a la compresión a los 7 y 28 días del concreto premezclado con diferentes trazas y niveles de adición de residuos de mármol.

Diseño	% de adición de residuo	Relación agua cemento	7 días		28 días	
			Resistencia (Mpa)	Resistencia (Mpa)	Resistencia (Mpa)	Resistencia (Mpa)
1:3,5	0	0,40	33,78	34,27	42,65	39,40
1:5		0,51	22,82	24,77	33,45	30,99
5 1:6,5		0,64	12,41	19,99	17,73	21,25
1:3,5	10	0,42	30,49	27,98	38,73	40,40
1:5		0,51	18,67	22,03	27,85	27,24
5 1:6,5		0,64	13,51	14,42	17,48	19,02
1:3,5	20	0,44	28,09	28,56	37,61	37,13
1:5		0,55	20,47	20,19	28,24	28,04
5 1:6,5		0,64	14,10	14,44	20,13	20,92

Nota. Fuente: Petry et al., 2017.

Tabla 5. Absorción de agua por capilaridad media a las 72 horas.

Diseño	% de adición de residuo	Relación agua cemento	72 horas	
			Absorción (g/cm ²)	Absorción (g/cm ²)
1:3,5	0	0,40	0,91	1,14
1:5		0,51	1,24	0,81
5 1:6,5		0,64	1,27	1,39
1:3,5	10	0,42	0,77	0,85
1:5		0,51	1,17	1,12
5 1:6,5		0,64	1,23	1,05
1:3,5	20	0,44	1,06	1,24
1:5		0,55	1,26	0,85
5 1:6,5		0,64	1,55	1,62

Nota. Fuente: Petry et al., 2017.

Se evidencia entonces que la adición que logró mantener las propiedades mecánicas del concreto fue la del 20%, sin poder mejorarla, a diferencia de la mezcla de concreto con adición del 10% que tuvo resultados negativos, disminuyendo la capacidad de resistencia a la compresión hasta en un 30%.

En cuanto a la absorción, la adición del 10% de contenido contribuye a reducir esta característica, lo que era deseable y el 20% de contenido provocó un aumento de la absorción. En general, el residuo de mármol demostró ser ineficiente en vista de las propiedades estudiadas, sin embargo, lo que se le atribuye al tamaño de partícula, que en este caso fue de 22,5 μm .

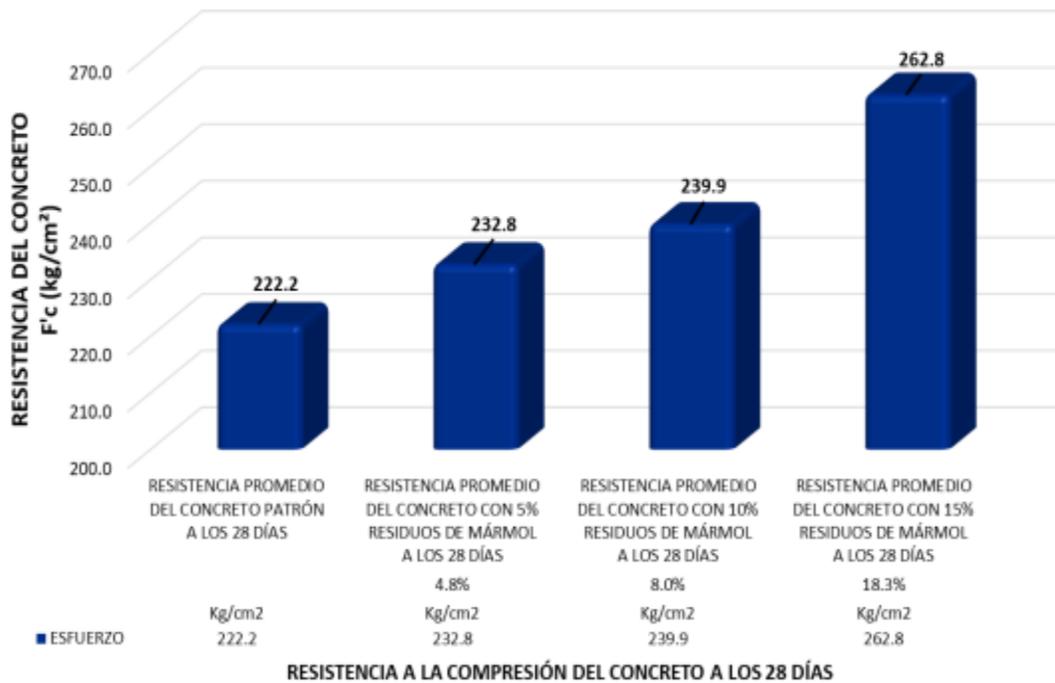


INCIDENCIA DE LOS MICROMATERIALES INERTES EN LOS CONCRETOS HIDRÁULICOS



Tomando en cuenta lo anterior, se realizó un estudio en el que el residuo pasaba por una etapa de trituración a fin de que cumplan las características de agregado fino, para posteriormente utilizarlo como adición para el reemplazo de arena (Arimana & Taquiri, 2020). Esta metodología fue usada bajo las normas NTP 400.037, que es la norma Peruana (dado que Perú fue el lugar de estudio) que brinda las especificaciones que requieren los agregados para emplearlos en concreto, teniendo en cuenta que no existe una norma en ese país que regule los micromateriales inertes. La adición del 5%, 10%, y 15% fue evaluada bajo ensayos de compresión (probetas cilíndricas), flexión (probetas rectangulares). Para los diseños de mezcla, el cemento usado fue cemento andino tipo I, la absorción del agregado grueso y fino fue de 1,20; la absorción del residuo de mármol fue de 0,6. Los resultados se especifican en las figuras 3 y 4.

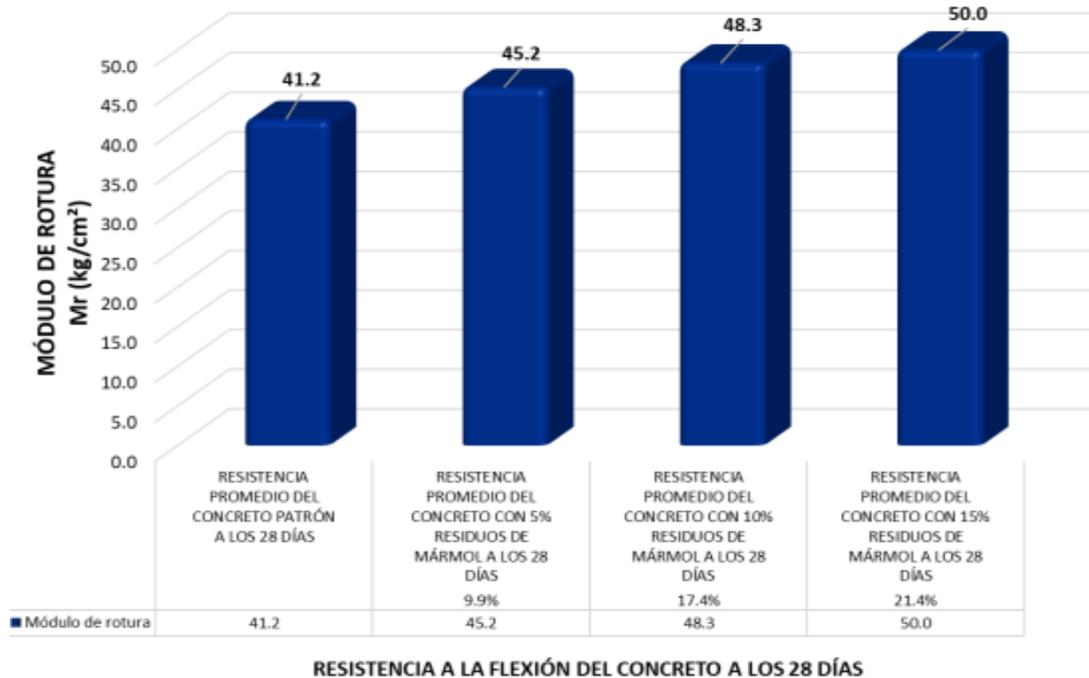
Figura 3. Comparación de la resistencia a la compresión del concreto (patrón, 5%, 10%, 15%) a los 28 días



Nota. Fuente: Arimana & Taquiri, 2020



Figura 4. Comparación de la resistencia a la compresión del concreto (patrón, 5%, 10%, 15%) a los 28 días



RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL CONCRETO A LOS 28 DÍAS

Nota. Fuente: Arimana & Taquiri, 2020

Entonces, en estos casos se observó que la adición de residuos de mármol en sustitución parcial de arena gruesa resultó beneficioso para las propiedades mecánicas de los concretos, aumentando las mismas hasta un 18,3% (compresión) y un 21,4% (tracción). Además, las propiedades del concreto en estado fresco también mejoran, debido a que las mezclas pasan de un estado trabajable (patrón), a un estado muy trabajable (15% de adición de polvo de mármol). Esto puede explicarse en el tipo de roca y su origen, es decir, el mármol es simplemente una roca compactada a partir de rocas calizas sometidas a altas temperaturas y elevadas presiones, que alcanzan un elevado grado de cristalización, que, en condiciones finamente molidas son capaces de mejorar las propiedades mecánicas del concreto sin tener actividad puzolánica en la mezcla.

3.2. Origen ígneo

Se forman por el enfriamiento y solidificación de una roca fundida. La primera subdivisión de estas rocas se da según el medio geológico (profundidad de emplazamiento) ya que les corresponden diferentes condiciones de presión en el momento de la cristalización. Se distinguen tres tipos de rocas ígneas: volcánicas o eruptivas, que se conforma a partir de



un magma originado en profundidad y termina congelándose en la superficie bajo la presión atmosférica donde se agota y se enfría. Hipabisales, con propiedades intermedias entre volcánicas y plutónicas, ya su formación ocurre a poca profundidad, lo que significa que cristaliza a profundidades intermedias con una presión que permite que escape el líquido; Plutónico, nacen por medio de una cristalización bastante lenta en profundidad, que bajo presión generalmente no permite que escapen los fluidos rocosos (Spikerman, 2010).

3.2.1. Estudio sobre la influencia del Granito

Es una roca intrusiva de grano grueso con un importante porcentaje de minerales clave, como lo son el cuarzo (de color claro) y feldespato, y otros minerales oscuros de menor porcentaje representativo (Lutgens & Tarbucks, 2005). En el año, 2000 se realizó un estudio de corte de granito (RGC) en el concreto, usándolo como adición (rango de 0-10%-20%) en reemplazo de la masa de cemento (Pereira, 2000). La normativa por la cual se rigió el estudio fue la NBR (10004, 10006, 12653, 5752, 5751, 5753, 7722, 7723, 12 142, 5739, 9778), por lo que se moldearon especímenes cilíndricos de 4x4x16cm, tres de referencia, tres con una adición de RGC del 10% y tres para una adición del 20%, en reemplazo de la masa de cemento. El cemento usado para el ensayo fue cemento Portland común CP I; el agregado fino con un módulo de finura de 2,45 y peso volumétrico de 2,64 g/cm³; el agregado grueso con una absorción de 0,60%, peso volumétrico de 1,47g/cm³. Según la normativa mencionada anteriormente, se realizaron los estudios de comportamiento del concreto con la sustitución parcial del cemento por RGC, en estado fresco y estado endurecido (teniendo en cuenta que el tamaño medio del aditivo es de 6,74 μ m). Los resultados se muestran en las tablas 6 y 7.

Tabla 6. Revenimiento de los diseños mezclados.

Mezcla		Revenimiento (mm)
Contenido	Relación agua - cemento	
Base	0,40	50
	0,55	60
	0,70	55
10% de adición	0,40	50
	0,55	65
	0,70	60
20% de adición	0,40	50
	0,55	65
	0,70	65

Nota. Fuente: Pereira, 2000



Tabla 7. Resistencia a la compresión de los diseños mezclados con RGC.

Mezcla	Relación agua - cemento	Edad (días)	
		7	28
Base	0,4	26,5	31,1
	0,55	18,0	21,4
	0,7	14,0	18,1
10% de adición	0,4	28,4	35,4
	0,55	19,0	23,6
	0,7	13,3	19,0
20% de adición	0,4	31,8	35,8
	0,55	19,4	26,3
	0,7	17,0	20,9

Nota. Fuente: Pereira, 2000

Con la adición de RCG en el hormigón, hubo un aumento en la cohesión y consistencia, proporcional al contenido y, en consecuencia, debido a que las pequeñas partículas de RCG difundidas por la mezcla, actúan como una barrera física para el movimiento ascendente del agua. Además, se observa que los hormigones con adición del 10% aumentaron su resistencia con respecto al hormigón base en un 8%. Mientras que los hormigones con adición del 20% aumentaron su resistencia en un 19,6 con respecto al hormigón base. Esto se explica debido a que la alta finura del material adicionado, promueve un refinamiento en la estructura de los poros del concreto, lo que contribuye a una mayor densificación de la zona de la matriz cementicia, y en consecuencia el aumento de la resistencia a compresión.

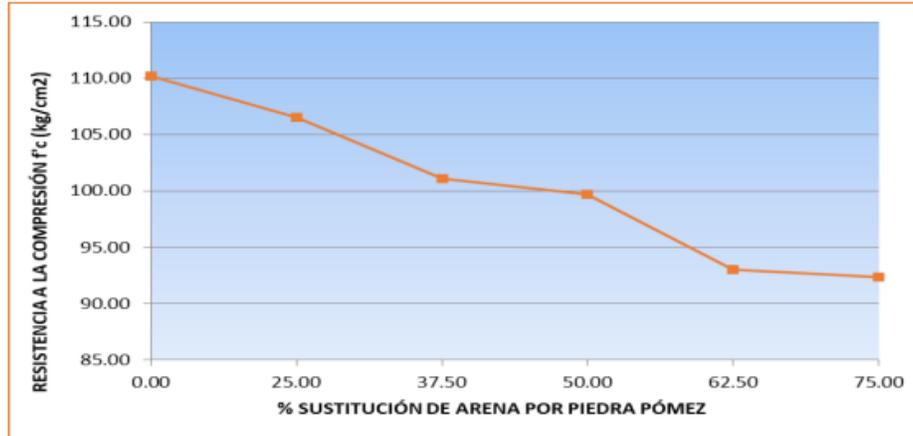
3.2.2. Estudio sobre la influencia de la piedra pómez

La pumita o piedra pómez es una de las pocas rocas que están constituidas por materia no mineral. Es una piedra de textura vítrea no cristalina (vidrio vocuolar). Su origen nace en las grandes cantidades de gases que se escapan de la lava, generando una masa gris y porosa (Lutgens & Tarbucks, 2005). El uso de esta piedra para el concreto se ha realizado bajo la premisa del diseño de un concreto ligero sin pérdida de capacidades mecánicas. Bajo este fin, en el año 2022, se evaluó las características de la adición del material, sustituyendo un 25%, 37,5%, 50%, 62,5%, y 75% de la arena. El estudio se desarrolló de tal forma, que el diseño de mezcla que cumpliera con los objetivos específicos de la investigación, fue utilizado para



un análisis comparativo de bloques de concreto con bloques de arcilla. Los resultados de la investigación se muestran en las figuras 5 y 6, y en las tabla 8 (Pari, 2022).

Figura 5. Evaluación de la resistencia a la compresión con la adición de pumita



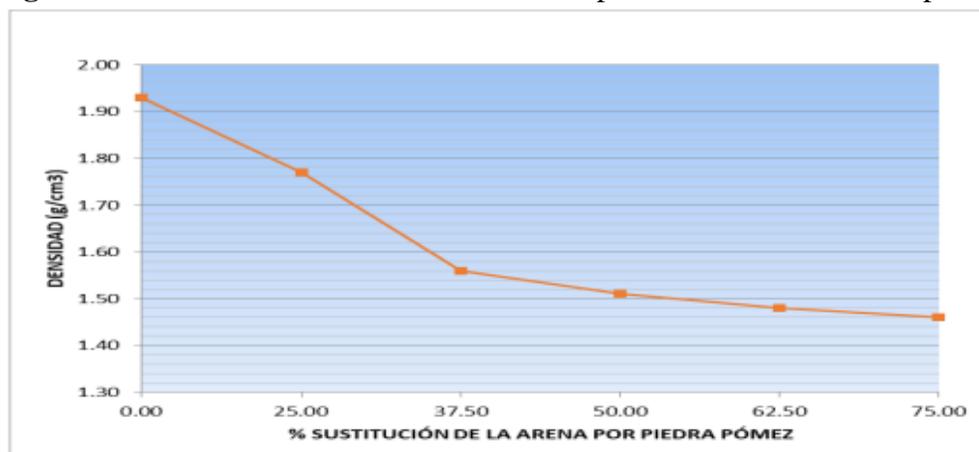
Nota. Fuente: Pari, 2022

Tabla 8. Densidades de concreto con reemplazo de pumita.

CUADRO DE DENSIDADES SEGÚN LAS DOSIFICACIONES	
% DE REEMPLAZO DE ARENA POR PÓMEZ	DENSIDAD (g/cm ³)
0.00	1.93
25.00	1.77
37.50	1.56
50.00	1.51
62.50	1.48
75.00	1.46

Nota. Fuente: Pari, 2022

Figura 6. Evaluación de la resistencia a la compresión con la adición de pumita



Nota. Fuente: Pari, 2022



Se infiere de las tablas que con el aumento de porcentaje de sustitución de arena por piedra pómez, la densidad va disminuyendo, pasó de ser 1,93g/cm a 1,46g/cm³. Por ello, se estableció que la mezcla escogida para comprobar las resistencias para unidades de albañilerías sería el último diseño, correspondiente a un reemplazo del 75% de arena por piedra pómez.

Siguiendo el orden de ideas, se realizaron estudios característicos para unidades de mampostería, como variación de dimensiones (1,33% para bloques de arcilla calcinada y 1,93% para el bloque de concreto ligero diseñado con anterioridad), alabeo (ambos materiales clasificados como clase V), absorción (17,55% para bloques de arcilla calcinada y 14,16% para ladrillo de concreto ligero. Y por último, ensayos de resistencia mecánica, como la flexión por tracción (7,27kg/cm² para bloques de arcilla calcinada y 10,96kg/cm² para el bloque de concreto ligero), flexión indirecta (3,47kg/cm² para bloques de arcilla calcinada y 2,15kg/cm² para el bloque de concreto ligero), y compresión (130,24kg/cm² para bloques de arcilla calcinada y 133,69kg/cm² para el bloque de concreto ligero). En la tabla 9 se observa el cuadro comparativo de cada ensayo de albañilería:

Tabla 9. Densidades de concreto con reemplazo de pumita

Propiedad	Con arcilla calcinada	Con diseño de mezcla de piedra pómez (75%)
Variación de dimensiones (%)	1,33	1,93
Alabeo (Clase)	V	V
Absorción (%)	17,55	14,16
Flexión por tracción (kg/cm ²)	7,27	10,96
Flexión indirecta (kg/cm ²)	3,47	2,51
Compresión (kg/cm ²)	130,24	133,69

Nota. Fuente: Pari, 2022

Entonces, se debe realizar la precisión que, aunque la resistencia del concreto disminuye con la suma de cada adición que se le hacía al concreto, el objetivo principal era la reducción de la densidad con un enfoque futuro a la utilización del concreto en materiales ligeros. El objetivo se logra debido a que escogido el diseño de mezcla con menor densidad,



igual a e incluso supera algunas propiedades características de los bloques de acilla calcinada convencionales.

3.2.3. Estudio sobre la influencia de la arena cuarzo feldespática

Los feldespatos son minerales universalmente difundidos, y son parte fundamental de las mayores rocas silíceas, hallándose también al estado de fragmentos de roca como la arcilla y la pizarra (Bernaola, 1911). En este sentido, la arena cuarzo feldespática es un desecho industrial que no tiene uso reciclable, que puede ser utilizada para reducir su impacto ambiental y evitar la contaminación de los cuerpos de agua cercanos a su disposición. Entre la literatura sobre este tipo de micromaterial, se planteó un estudio descriptivo y cuantitativo del uso de la arena cuarzo feldespática como agregado fino para la elaboración de adoquines en concreto. El análisis granulométrico y de control de calidad de los materiales agregados fue mediante la norma Guatemalteca Coguanor NTG 41007. La tablas 10 y 11, muestra la caracterización de la arena cuarzo-feldespática obtenida por los autores en el año 2019 (Ámperez, 2019).

Tabla 10. Caracterización de arena cuarzo-feldespática 1

Densidad relativa (sss)	2,46
Densidad (sss) (kg/m ³)	2 450,00
Masa unitaria, compactada (kg/m ³)	1490,00
Masa unitaria, suelta (kg/m ³)	1340,00
Porcentaje de vacíos, compactado (%)	39,00
Porcentaje de vacíos, suelto (%)	46,00
Porcentaje de absorción (%)	0,80
Contenido de materia orgánica	1
Pasa tamiz # 200 (%)	5,80
Retenido tamiz 6.35 (%)	9,00
Módulo de finura	1,28
Desintegración por Sulfato de Sodio	0,7890

Nota. Fuente: Ámperez, 2019



Tabla 11. Caracterización de arena cuarzo-feldespática 2

Densidad relativa (sss)	2,35
Densidad (sss) (kg/m ³)	2 340,00
Masa unitaria, compactada (kg/m ³)	1 540,00
Masa unitaria, suelta (kg/m ³)	1 400,00
Porcentaje de vacíos, compactado (%)	34,00
Porcentaje de vacíos, suelto (%)	40,00
Porcentaje de absorción (%)	13,10
Contenido de materia orgánica	1
Pasa tamiz # 200 (%)	8,00
Retenido tamiz 6.35 (%)	2,40
Módulo de finura	1,30
Desintegración por Sulfato de Sodio	0,2142

Nota. Fuente: Ámperez, 2019

El diseño de la mezcla fue realizado bajo el valor referencial para adoquines de la norma guatemalteca en cuestión, por ende, se realizaron cuatro diseños de mezclas distintos, de la siguiente forma:

- Muestra A: 50 % arena de Borda y 50 % arena de Torres 1, y aglomerante hidráulico.
- Muestra B: 50 % arena de Borda y 50 % arena de Torres 1, agregado grueso y aglomerante hidráulico.
- Muestra C: 25 % arena de Borda y 75 % arena de Torres 1, agregado grueso y aglomerante hidráulico.
- Muestra D: 75 % arena de Borda y 25 % arena de Torres 1, agregado grueso y aglomerante hidráulico

Los resultados son presentados en las tablas 12 y 13:



INCIDENCIA DE LOS MICROMATERIALES INERTES EN LOS CONCRETOS HIDRÁULICOS



Tabla 12. Resultado de estudio de reemplazo de arena feldespática 1

Muestra	Ensayo a Flexión kg/cm ²	Ensayo a flexión Norma NTG 41086 ⁽¹⁾ kg/cm ²	Promedio kg/cm ²	Promedio Norma NTG 41086 ⁽²⁾ kg/cm ²	Absorción de agua en (% de masa)	Absorción de agua Norma NTG 41086 ⁽³⁾ en (% de masa)
A-1	145.03	46.8	160	55	4.55	≤ 7.7
A-2	176.17	46.8			3.74	≤ 7.7
A-3	158.79	46.8			3.72	≤ 7.7
B-1	114.66	46.8	116.45	55	3.66	≤ 7.7
B-2	122.89	46.8			3.97	≤ 7.7
B-3	111.80	46.8			4.22	≤ 7.7
C-1	74.39	46.8	79.91	55	5.12	≤ 7.7
C-2	80.15	46.8			4.73	≤ 7.7
C-3	85.18	46.8			4.81	≤ 7.7
D-1	94.23	46.8	98.82	55	4.52	≤ 7.7
D-2	103.25	46.8			4.26	≤ 7.7
D-3	98.99	46.8			3.99	≤ 7.7

Nota. Fuente: Ámperez, 2019

Tabla 13. Resultado de estudio de reemplazo de arena feldespática 2

Muestra	Esfuerzo a compresión kg/cm ²	Esfuerzo del diseño de mezcla propuesto kg/cm ²	Absorción de agua en (% de masa)	Absorción de agua Norma NTG 41086 en (% de masa)
A-4	532.32	280.00	5.08	≤ 7.7
A-5	488.28	280.00	5.27	≤ 7.7
A-6	543.56	280.00	4.66	≤ 7.7
B-4	424.00	280.00	4.44	≤ 7.7
B-5	377.41	280.00	3.77	≤ 7.7
B-6	490.00	280.00	4.08	≤ 7.7
C-4	358.00	280.00	5.51	≤ 7.7
C-5	352.00	280.00	5.86	≤ 7.7
C-6	358.42	280.00	6.4	≤ 7.7
D-4	420.79	280.00	4.25	≤ 7.7
D-5	383.84	280.00	4.83	≤ 7.7
D-6	406.57	280.00	4.23	≤ 7.7

Nota. Fuente: Ámperez, 2019

En la comprobación a flexión del concreto, los adoquines de las cuatro muestras cumplieron con los requerimientos iniciales de resistencia que establece la norma COGUANOR NTG 41086. Los valores obtenidos en los ensayos son elevados, entonces se establece que mecánicamente es viable la elaboración de adoquines sin agregado grueso (muestra A) debido a que obtuvo la menor resistencia de los otros tres diseños de mezcla.



Los adoquines tipo A son los que obtuvieron una mayor resistencia a flexión, esto se puede explicar que es debido a la homogeneidad del material. La muestra B y demás, bajaron la resistencia con respecto al A, debido a que al tener agregado grueso en la mezcla, el resto de agregados carezcan de buena adherencia (Ámperez, 2019).

En los ensayos a compresión, todos los adoquines superaron el valor de la muestra patrón establecido por la norma. Los adoquines de la muestra A, tuvieron el mejor comportamiento mecánico, a pesar que esta muestra en el diseño de mezcla no contiene agregado grueso. Esto puede atribuirse a que las arenas tienen mejor adherencia entre ellas que con el agregado grueso (Ámperez, 2019).

3.2.4. Estudio sobre la influencia del polvo de sílice

El polvo de sílice es un subproducto industrial producido por la descarga de arena de sílice a partir de silicio metálico o ferro silicio en un horno de arco eléctrico. Tras ser tamizado en distintas dimensiones para su comercialización, el residuo queda en forma de polvo que no puede ser reutilizado en el proceso productivo industrial. Por ello, se analizó su uso en el concreto en reemplazo parcial de cemento con dosis de sílice del 10%.-15%, con relaciones de agua y cemento de 0,45 y 0,65 respectivamente. El ensayo consistió en medir las propiedades mecánicas con cada diseño de mezcla mencionado anteriormente, por medio de probetas cilíndricas de 30 cm de alto y 15 cm de diámetro (Tabla 14). Además, también se realizó el estudio de propiedades como la porosidad efectiva y aparente, y asentamientos (Giménez et al., 2018).

Tabla 14. Diseño de muestras para la evaluación de polvo de sílice en el concreto

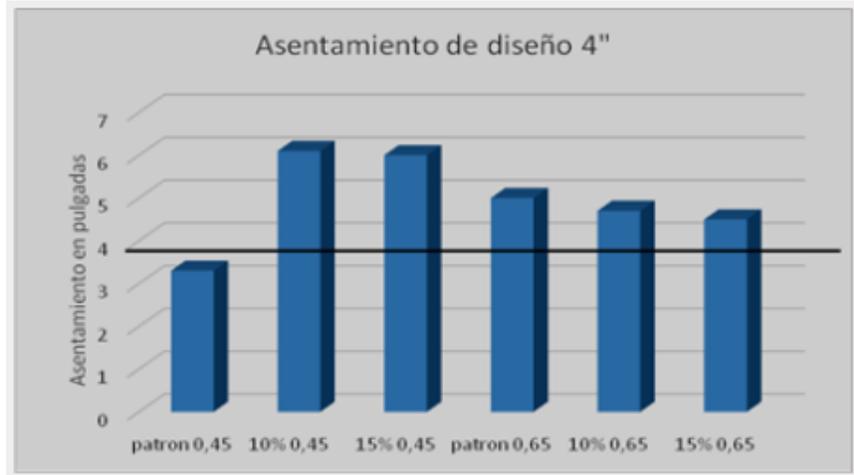
<i>Cantidad de probetas patrón y probetas con sustitución para distintas relaciones a/c</i>				
Mezclas	Patrón	Sustitución 10%	Sustitución 15%	Ensayo de Resistencia
0,45	4	4	4	9
0,65	4	4	4	9
Total de probetas	8	8	8	18

Nota. Fuente: Giménez et al., 2018

Los resultados se muestran en la figuras 8-10.

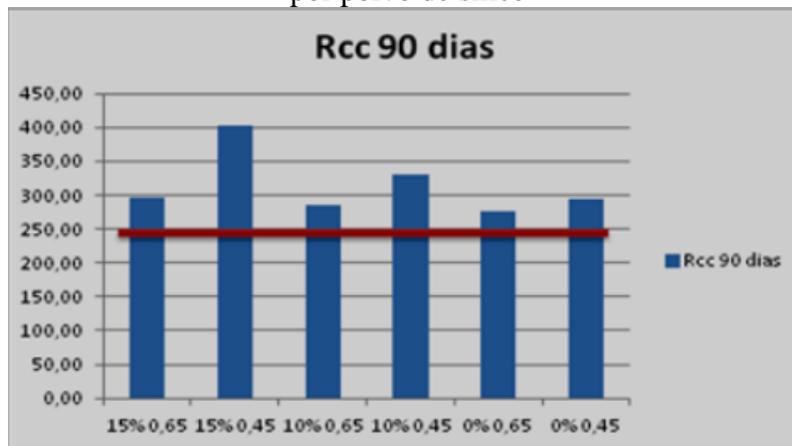


Figura 7. Evaluación de asentamiento para mezclas con sustitución de arena por polvo de sílice



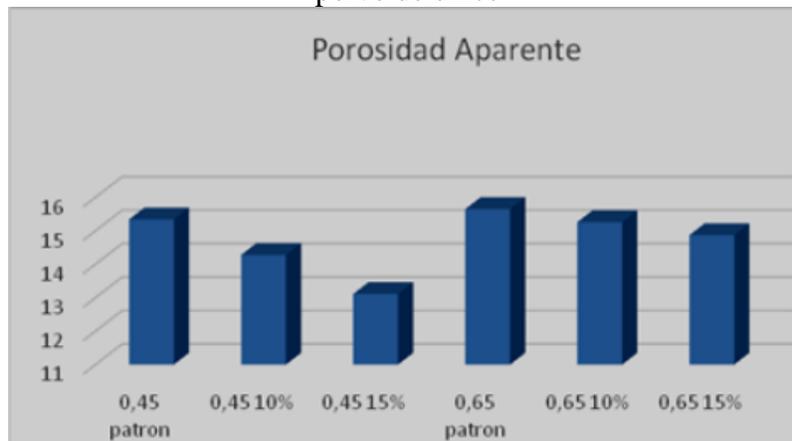
Nota. Fuente: Giménez et al., 2018

Figura 8. Evaluación de resistencia a la compresión para mezclas con sustitución de arena por polvo de sílice



Nota. Fuente: Giménez et al., 2018

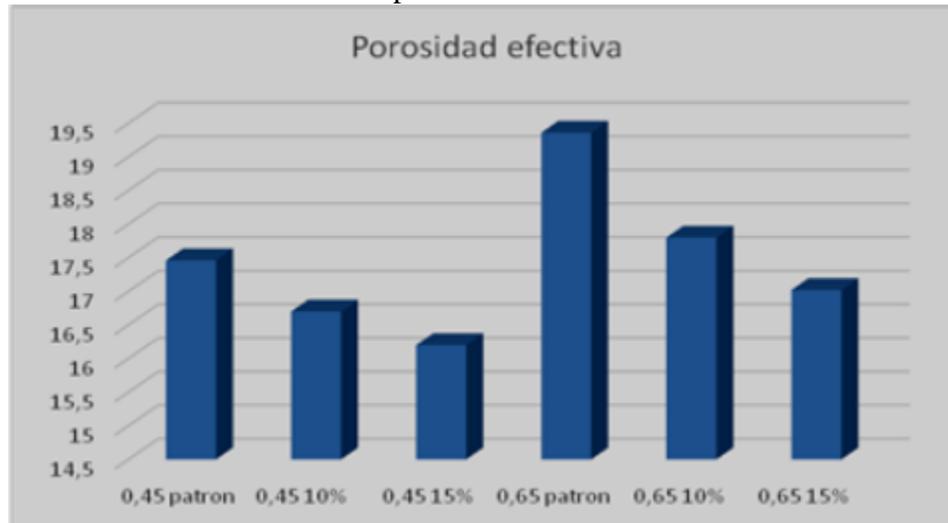
Figura 9. Evaluación de la porosidad aparente para mezclas con sustitución de arena por polvo de sílice



Nota. Fuente: Giménez et al., 2018



Figura 10. Evaluación de la porosidad efectiva para mezclas con sustitución de arena por polvo de sílice



Nota. Fuente: Giménez et al., 2018

El objetivo principal del estudio era establecer concretos de mayor resistencia mecánica, y se logró a cabalidad, a causa de que los resultados de los ensayos de esfuerzo a compresión de las probetas con la adición de arena de sílice por cemento, obtuvieron mayores valores en comparación a las probetas de concreto convencional. La resistencia logró un aumento del 60,8% frente al concreto convencional, con la relación agua-cemento igual a 0,45, convirtiéndose de esta manera en un concreto de alta resistencia con un valor promedio de 401 Kgf/cm².

El resto de parámetros se ven afectados por la poca durabilidad del concreto (porosidad, absorción, asentamiento), debido a que no cumple las características necesarias de durabilidad. En cuanto a la trabajabilidad de la mezcla, los autores observaron una mezcla con tendencia a seca, por lo que se tuvo que agregar un aditivo plastificante que mejorara las condiciones de manejo del concreto en el estado fresco.

3.3. Origen sedimentario

Las rocas sedimentarias son analizadas con igual criterio que las anteriormente mencionadas, con el fin de usarlas como material incidente en el concreto hidráulico. Las rocas sedimentarias son constituidas por la acumulación de sedimentos, proceso conocido como sedimentación. Son depósitos principalmente producto de la erosión y restos de materia orgánica o materiales volcánicos, y son diversos en tamaños, composición, forma y origen. Los sedimentos son transportados al sitio de depósito por factores como la gravedad, agua,



aire, hielo o crecimiento biológico en el sitio, y la acumulación depende de factores como la temperatura, el entorno químico y la bioestructura del área (González, 2019).

3.3.1. Estudio sobre la influencia del carbón mineral

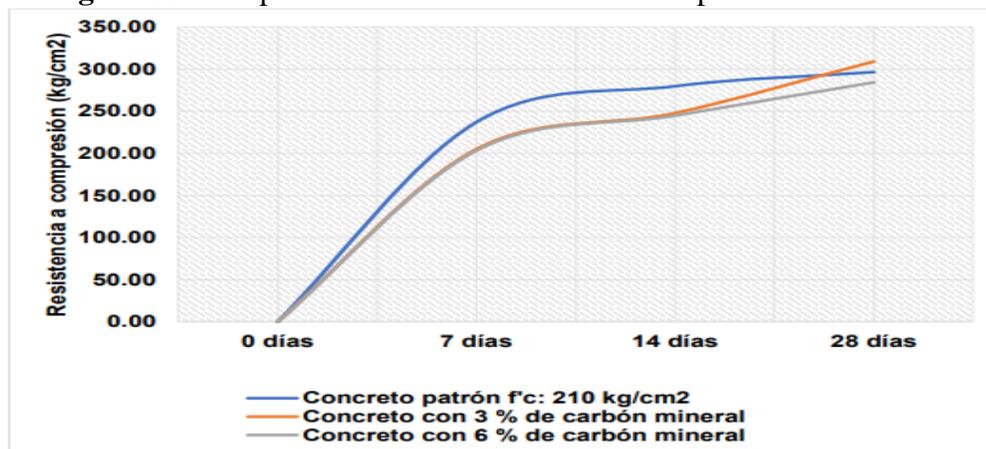
Es una roca sedimentaria de color negro, con altos porcentajes constitutivos de carbono y cantidades variables elementos como hidrógeno, azufre, oxígeno y nitrógeno. Esta roca es producto de la descomposición de componentes orgánicos que se acumulan en zonas pantanosas o marinas que carecen de profundidad, que con el paso del tiempo, se ven afectadas por condiciones de presión y temperatura (Servicio Geológico Mexicano, 2013). El estudio del carbón encontrado (Dionicio, E., 2021), se llevó a cabo bajo la norma técnica peruana (NTP). El aditivo de carbón mineral fue estudiado mediante 15 especímenes (probetas): diseño patrón, diseño con 3% de carbón y 6% de carbón mineral como adición al concreto. El carbón mineral obtuvo un módulo de finura de 6,2; el agregado grueso, un peso volumétrico de 1,847 g/cm³, una absorción de 0,53% y un módulo de finura de 7,4; mientras que el agregado fino obtuvo un peso volumétrico de 1,615 g/cm³, con una absorción del 1,31% y un módulo de finura de 2,8. El cemento usado para la muestra fue tipo I. Los resultados se reflejan en la tabla 15 y figura 11.

Tabla 15. Resultados de ensayos de consistencia para concretos con agregado de carbón mineral.

Especímen N°	Fecha Vaciado	Slump	
		pulg.	cmts.
Muestra patrón	27/09/2021	3 3/4	9.52
Con 3% de carbón	07/10/2021	3 1/8	7.95
Con 6% de carbón	07/10/2021	4	10.20

Nota. Fuente: Dionicio, 2021

Figura 11. Comparación de la resistencia a la compresión del concreto.



Nota. Fuente: Dionicio, 2021



Los resultados no indican mayor variabilidad de los concretos con adición de carbón mineral con respecto a la mezcla patrón. Con una consistencia mayor menor obtenida con un 3% de adición (menor trabajabilidad), se obtiene un ligero aumento en la resistencia a la compresión con respecto a la mezcla patrón; contrario al caso de la adición del 6%, en la que se obtiene mayor trabajabilidad, pero menor resistencia a la compresión. Lo que se traduce en que, aunque se obtiene un ligero aumento o disminución de las propiedades del concreto tanto en estado fresco como endurecido con la adición de carbono mineral, esta no influye significativamente en las propiedades del producto final.

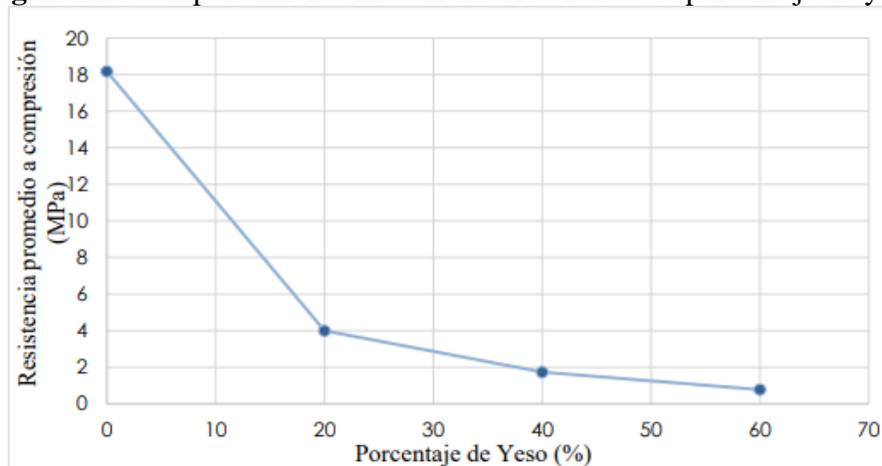
3.3.2. Estudio sobre la influencia del yeso

El yeso es una sedimentaria cuya forma está dada por n cristales tabulares exfoliables en láminas, generalmente incoloros. Cuenta una dureza de 2 en la escala de Mohs y una gravedad específica de 2.32 gr/cc. En cuanto a propiedades físicas, su color generalmente es de blanco o blanco con tonalidades grises; no obstante, puede tener diversos tintes de amarillo, rojizo, castaño, etc. Esto es producto de las imperfecciones e impurezas (arcilla, óxido de hierro, sílice y caliza) (Subsecretaría de Minería de México, 2017).

Las rocas sedimentarias se estudian en el concreto para mejorar su comportamiento tanto en estado fresco como endurecido. Sin embargo, el empleo de materiales inertes de este origen en el concreto no garantiza el mejoramiento de las características de la mezcla. Esto se justifica en el estudio del yeso residual (analizado bajo la norma Técnica colombiana NTC 1377, 673, 1299) (Carrillo, S., 2021), el cual se obtuvo de restos de elementos clínicos odontológicos, y procesados mediante molienda hasta conseguir partículas de tamaño menor a 5mm. El modo de empleo para los ensayos fue mediante el relleno con concreto, de moldes de acero de dimensiones 15x30cm. El porcentaje de adición de yeso escogido fue de 0%, 20%, 40%, 60%; los agregados se mantuvieron en la misma cantidad, y se muestran en la figura 12.



Figura 12. Comportamiento mecánico del concreto vs porcentaje de yeso.



Nota. Fuente: Carrillo, 2021

Se evidencia en este caso que la adición de yeso residual influye significativamente en el comportamiento mecánico del concreto, debido a que redujo en un porcentaje hasta del 95% su capacidad de resistencia a la compresión. La explicación de ello causa en el exceso de sulfato de calcio dihidratado y hemihidratado conlleva a problemas en el fraguado del concreto, y expansión por exceso de sulfatos ocasionando problemas de formación de grumos en el producto terminado, además de generar agrietamientos internos; estos últimos producidos por la baja relación agua yeso, que inducía a la absorción excesiva de agua de este material, impidiendo la conglomeración del resto de componentes del concreto.

3.3.3. Estudio sobre la influencia de la roca caliza

La roca caliza es la roca sedimentaria con mayor abundancia en la tierra. La calcita mineral constituye la mayoría de la composición de la caliza. Esta roca se forma por medios inorgánicos o medios químicos (Lutgens & Tarbucks, 2005). El estudio de la roca caliza en su utilización para el concreto consiste en el aprovechamiento de residuos de la industria de dicho material, con el fin de hacer reemplazos en el agregado grueso y buscar mejoras en las propiedades mecánicas como la resistencia a la flexión (Blas & Mena, 2019). El diseño de los ensayos se realizó bajo la conformación de una población de 27 probetas de concreto: 9 para el concreto patrón y 9 para 2%, y 9 para el 5% (de sustitución). Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 16 y figura 13.

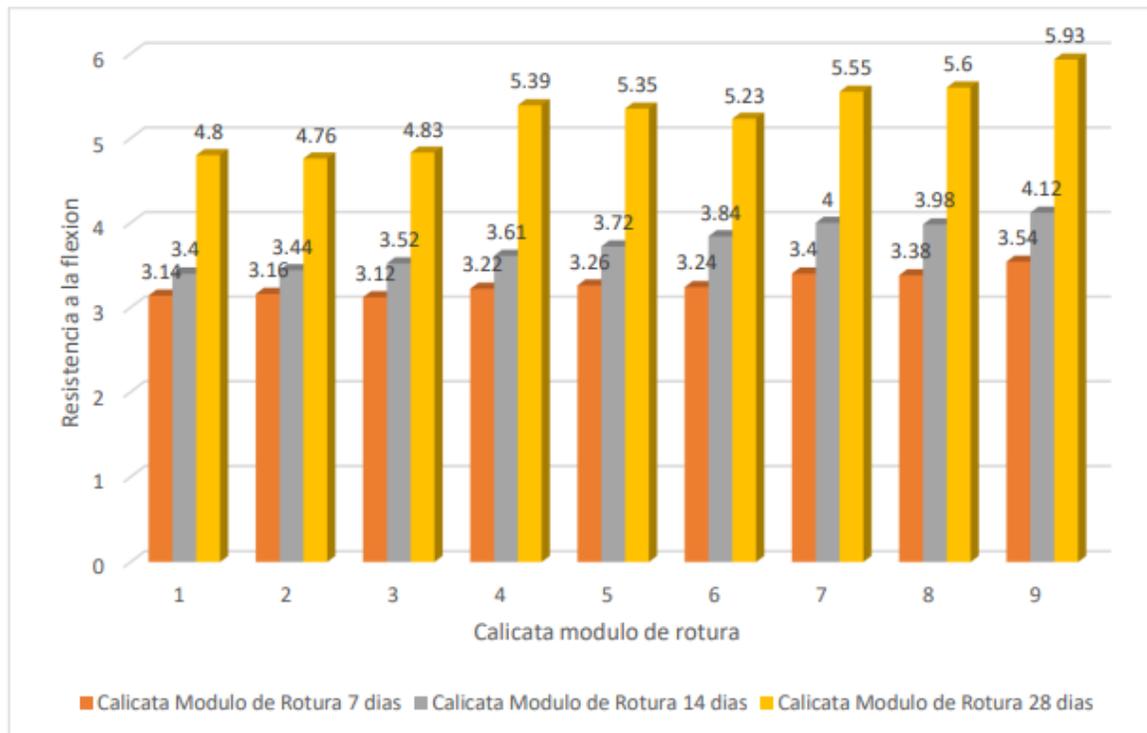


Tabla 16. Módulo de rotura de concreto con adición de polvo de caliza

DESCRIPCIÓN	Calicata Módulo de Rotura		
	7 días	14 días	28 días
Concreto Patrón	3.14	3.4	4.8
	3.16	3.44	4.76
	3.12	3.52	4.83
Polvo de Roca Caliza 2%	3.22	3.61	5.39
	3.26	3.72	5.35
	3.24	3.84	5.23
Polvo de Roca Caliza 5%	3.4	4	5.55
	3.38	3.98	5.6
	3.54	4.12	5.93

Nota. Fuente: Blas & Mena, 2019

Figura 13. Comportamiento mecánico del concreto vs porcentaje de yeso



Nota. Fuente: Blas & Mena, 2019

En la tabla 16 se puede apreciar que el efecto de la sustitución del 2% y el 5% del agregado grueso por polvo de roca caliza es altamente significativo en la resistencia a la flexión final del concreto. Se comprueba entonces que este micromaterial mejora la resistencia a la flexión hasta en un 23% la resistencia a la flexión del concreto, además de que la edad del concreto hasta los 28 días (edad máxima de estudio) fue directamente proporcional a la resistencia en cuestión.



3.4. Otros orígenes

3.4.1. Estudios sobre la influencia de residuos cerámicos

El estudio de los materiales inertes se ha ampliado hasta el uso de agregados cerámicos finos obtenidos de la demolición de edificios y también de la industria cerámica. Corominas & Etxeberria indagaron sobre las propiedades del concreto de alto rendimiento hecho con residuos finos de cerámica y agregados mixtos grueso. En los ensayos de calidad del concreto se diseñó una mezcla con agregados cerámicos finos (FCA) como sustitución del 15% y 30% de arena natural y utilizando el 20%, 50% y 100% de agregados gruesos mixtos (CMA) en sustitución de los agregados gruesos naturales. Los resultados mostraron que el concreto producido con hasta un 30% de FCA logró propiedades mecánicas y de durabilidad similares o mejoradas a las del concreto convencional (tabla 17). El hormigón fabricado con hasta un 20 % de CMA logró una resistencia a la compresión similar a la del hormigón convencional de alto rendimiento de 100 MPa. A los 180 días de curado los hormigones elaborados con hasta un 50% de CMA obtuvieron bajo riesgo de corrosión (González-Corominas & Etxeberria, 2014).

Tabla 17. Evaluación de la adición de residuos mecánicos en el concreto

Notación	Porcentaje de reemplazo	Densidad seca	Absorción (%)	Resistencia a la compresión				Resistencia a la tensión	Módulo de elasticidad
				Especímenes tipo cubo		Especímenes tipo cilíndricos			
				28 días	28 días	1 día	28 días		
NAC	0	2,51	1,39	57,40	102,10	90,70	100,1 (10%)	5,10	0,014
RAC-CWA	15	2,50	1,30	72,10	102,10	97,00	108,8 (12%)	5,10	0,015
	30	2,48	1,31	67,60	109,70	97,40	118,6 (22%)	5,20	0,016
RAC-RCA100	20	2,50	1,24	73,80	108,00	92,30	101,5 (10%)	5,70	0,015
	50	2,48	1,51	79,20	104,80	95,80	106,9 (12%)	5,60	0,015
	100	2,43	1,51	78,70	108,50	89,50	107,6 (20%)	5,10	0,013
RAC-RCA60	20	2,44	1,76	73,60	102,50	87,90	95,1 (8%)	6,30	0,014
	50	2,40	1,93	72,40	103,10	83,10	97,2 (17%)	5,10	0,014
	100	2,34	2,43	79,40	100,80	80,80	92,8 (15%)	5,90	0,013
RAC-RCA40	20	2,47	2,08	67,10	104,30	83,80	94,2 (12%)	5,30	0,013
	50	2,43	2,12	60,70	96,80	81,20	95,6 (18%)	6,20	0,014



INCIDENCIA DE LOS MICROMATERIALES INERTES EN LOS CONCRETOS HIDRÁULICOS



	100	2,39	2,17	56,60	91,20	72,20	86,6 (20%)	4,20	0,014
RAC- MRA	20	2,43	1,88	73,90	101,60	79,60	95,6 (20%)	4,60	0,021
	50	2,35	2,48	64,00	87,00	66,40	79,7 (20%)	4,50	0,026
	100	2,19	3,97	52,10	72,30	53,00	69,2 (31%)	4,20	0,036

Nota. Fuente: Corominas & Etxeberria, 2014

Un estudio análogo al de los autores mencionados anteriormente, se realizó en la Universidad privada del norte en el año 2021, pero se le agregó un nuevo campo analítico al estudio, que contemplaba la adición de residuos de cerámica en sustitución parcial de los agregados finos (con porcentajes de: 0% hasta 60%), además, evaluando propiedades tanto en estado fresco como en estado endurecido (28 y 56 días) y realizando un estudio económico acerca del tema (Velasquez, 2021). La ejecución de los ensayos fue permitida en cuanto a la construcción de 10 probetas (10 cm x 20 cm) para cada variable dependiente. Los resultados obtenidos se encuentran en las tablas 18-21, y figuras 14-15.

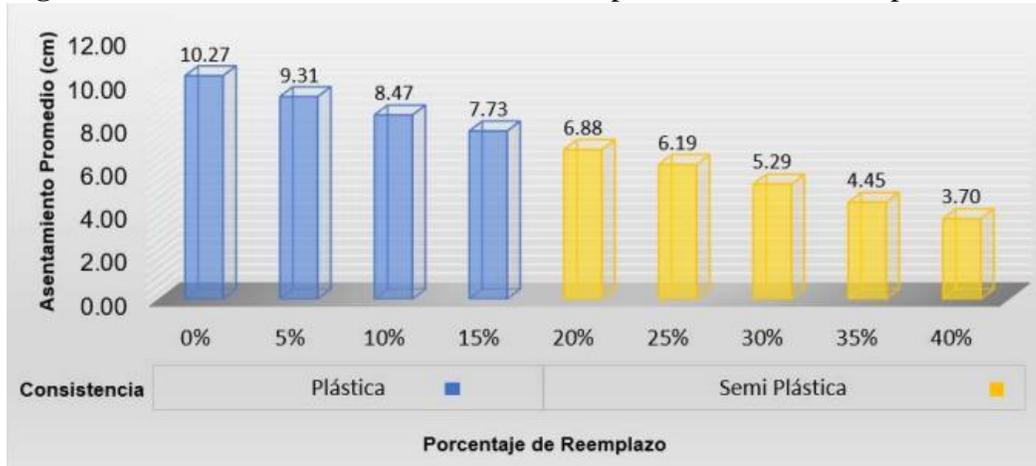
Tabla 18. Asentamiento según el porcentaje de remplazo de porcelanato molido

Dosificación		Asentamiento promedio (pulg)
Porcelanato reciclado molido (%)	Agregado fino (%)	
0	100	4
5	95	3 11/16
10	90	3 3/8
15	85	3 1/16
20	80	2 3/4
25	75	2 7/16
30	70	2 1/8
35	65	1 13/16
40	60	1 1/2

Nota. Fuente: Velasquez, 2021



Figura 14. Consistencia de concretos con reemplazos de residuos de porcelanato.



Nota. Fuente: Velasquez, 2021

Tal como se observa, hasta el 15% de reemplazo del agregado fino por residuos de porcelanato disminuye el asentamiento hasta una consistencia plástica de trabajabilidad media. Por el contrario, las mezclas con 20%-40% de reemplazo le quitan trabajabilidad a la muestra, puesto a que se obtuvo un asentamiento menor, categorizándose como un diseño de consistencia semiplástica. Los autores llegaron a la conclusión que las propiedades en estado fresco que presentó el concreto con las adiciones correspondientes, se justifican en que el agregado fino se caracteriza su forma redondeada y textura lisa (lo que proporciona una baja absorción), al contrario del residuo cerámico (porcelanato), que posee una forma angulosa, acompañada de textura rugosa (de alta absorción). Esto quiere decir que al presentarse una alta absorción de los residuos como agregado, requieren mayor agua para su hidratación, y al utilizar la misma cantidad de agua resultan mezclas más secas y con menor fluidez.

Tabla 19. Resistencia promedio de concretos con agregados de porcelanato molido (28 días)

Dosificación		Resistencia promedio (Kg/cm ²)
Porcelanato reciclado molido (%)	Agregado fino (%)	
0	100	269,49
5	95	274,36
10	90	280,75
15	85	284,77
20	80	289,3
25	75	296,73
30	70	304,14
35	65	309,56
40	60	311,93

Nota. Fuente: Velasquez, 2021

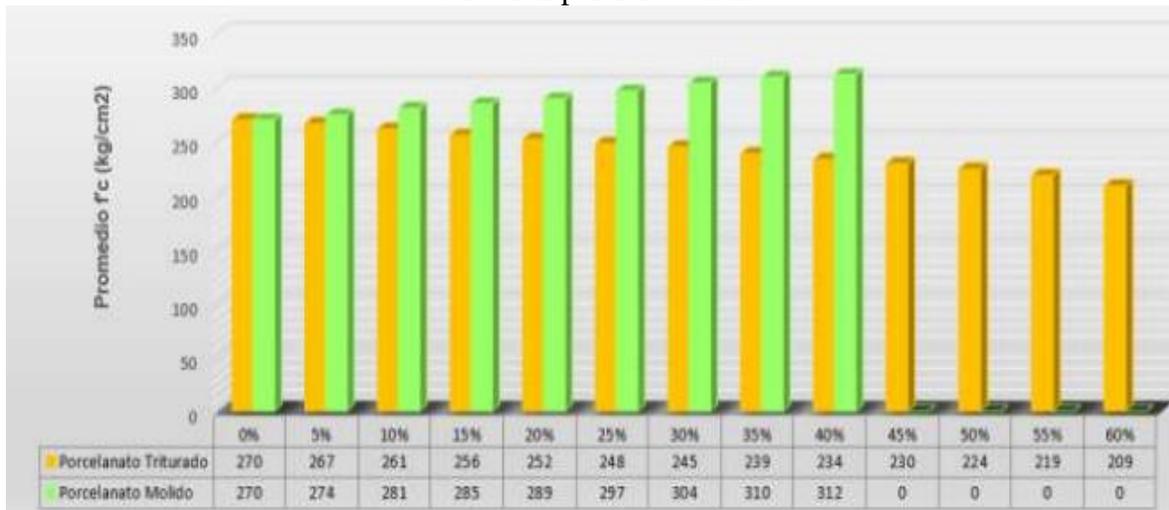


Tabla 20. Resistencia promedio de concretos con agregados de porcelanato molido (56 días)

Dosificación		Resistencia promedio (Kg/cm ²)
Porcelanato reciclado molido (%)	Agregado fino (%)	
0	100	284,19
5	95	288,03
10	90	297,24
15	85	299,91
20	80	310,53
25	75	314,52
30	70	320,74
35	65	324,16
40	60	328,41

Nota. Fuente: Velasquez, 2021

Figura 15. Comportamiento mecánico del concreto con residuos de porcelanato como sustitución parcial de arena.



Nota. Fuente: Velasquez, 2021

Las propiedades en estado endurecido también resultaron beneficiadas por la adición del material en reemplazo del agregado fino: con una adición del 40%, el concreto obtuvo una resistencia a la compresión a los 28 días de 312kg/cm², aproximadamente un 15% mayor que la muestra de concreto patrón (270kg/cm²). A los 56 días, el comportamiento fue similar. Con el 40% se obtuvo una resistencia promedio de 328 kg/cm², bajando la fluidez y trabajabilidad de la mezcla.



Tabla 21. Resistencia promedio de concretos con agregados de porcelanato molido (56 días)

Dosificación		Absorción promedio (%)	Densidad promedio (kg/m ³)	Porosidad (%)
Porcelanato reciclado molido (%)	Agregado fino (%)			
0	100	5,3	2221	11,9
5	95	5,1	2219	11,4
10	90	4,9	2219	11,1
15	85	4,9	2218	10,9
20	80	4,7	2215	10,6
25	75	4,4	2211	9,8
30	70	4,4	2211	9,8
35	65	4,2	2210	9,3
40	60	4,1	2208	9,1

Nota. Fuente: Velasquez, 2021

Se infiere que existe una relación directa entre la porosidad y la absorción del concreto, debido a que con la disminución de la primera, decreció la segunda. Entonces, la absorción se define como un criterio de durabilidad del concreto y define la porosidad, es decir los espacios huecos que se conectan entre sí en la matriz. Se deduce que el concreto mejora su calidad con la adición del material por arena, ya que a menor porosidad, mayor calidad y durabilidad del concreto, al tener un producto final con una compactación óptima.

En cuanto a la densidad, en todas las muestras evaluadas se presentó una disminución de la densidad, pero no alcanzó hasta categorizarse como concreto liviano según la NTP (<1680kg/m³). La muestra con menor densidad, se obtuvo con el reemplazo del 40% con residuos cerámicos, para un valor de 2208kg/cm³.

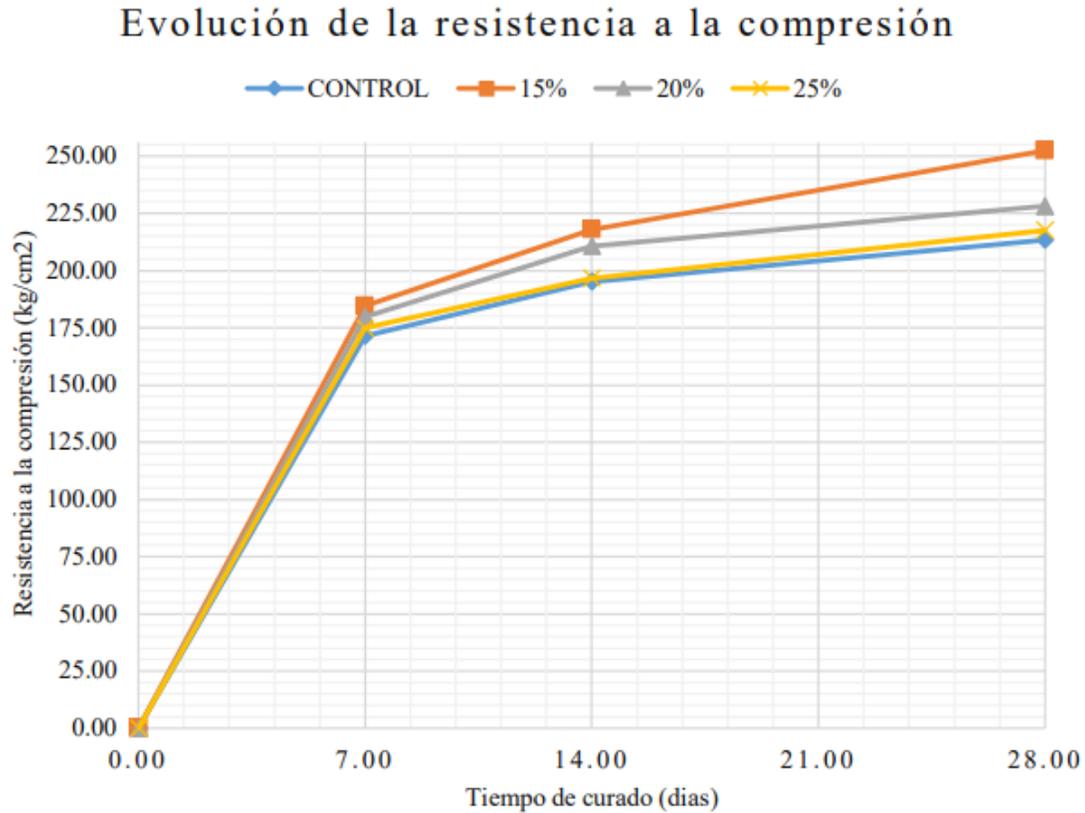
3.4.2. Estudio sobre la influencia del vidrio molido

También se realiza el estudio de materiales de gran demanda a nivel comercial, y que son una problemática para su reciclaje, como el vidrio. En 2019, se realizó el estudio sobre la resistencia a la compresión del concreto con adición de vidrio molido. El objetivo de la investigación fue verificar la incidencia de este tipo de material en sustitución de agregado fino, con porcentajes de adición de 15%, 20%, y 25%, tomando como base un diseño de control. El estudio se llevó a cabo con la fabricación de 10 probetas (una para cada diseño,



incluyendo el de control), y estimando sus cantidades de forma teórica, para un asentamiento slump de 3''-4'' (Paredes, 2019). Los resultados se muestran en la figura 16.

Figura 16. Evolución de la resistencia a la compresión de concretos con uso de vidrio molido



Nota. Fuente: Paredes, 2019

Dentro de la comparación de los resultados obtenidos del concreto adicionado con partículas de vidrio, los autores concluyen que se produce una disminución del porcentaje de absorción en el concreto conforme aumenta la adición de vidrio reciclado molido, lo cual incrementa la fluidez, mejorando de forma directa la trabajabilidad de la muestra. Además, la resistencia a la compresión hasta el 15% de vidrio como adición, pero al incrementarse más dicha cantidad de vidrio, esta resistencia disminuye, aproximándose a la resistencia del concreto de control (patrón).



3.5. Análisis de casos de estudio

A continuación se presenta una tabla (22) resumen de los estudios analizados en el estado del arte:

Tabla 22. Resumen de estudios analizados críticamente del estado del arte

Estudio (autores)	Micromaterial	Sustitución de (% óptimo)	Resultados obtenidos
Evaluación del uso de residuos de mármol en la producción de hormigón (Petry, 2017)	Mármol	Arena (20%)	Se obtuvo las mismas propiedades mecánicas que la muestra patrón ($f_c=39$ Mpa). No obstante, con el reemplazo se aumentó la absorción de agua por capilaridad
Evaluación de la resistencia a la compresión y flexión del concreto f_c : 210 kg/cm ² , mediante la adición de residuos de mármol (Arimana & Taquiri)	Mármol	Arena (15%)	Con el reemplazo se obtuvo un beneficio mecánico en todas las muestras, pero con el 15% aumentaba la trabajabilidad a muy trabajable.
Uso de residuos de corte de granito (RCG) como adición para la producción de hormigón	Granito	Cemento (20%)	Se obtuvo un concreto con propiedades mecánicas mejoradas en un 20% y además la muestra mejoró su fluidez.
Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de la adición de piedra pómez para la elaboración de unidades de albañilería de concreto ligero en la ciudad de Puno (Pari)	Pumita	Arena (75%)	Aunque bajó su resistencia mecánica, se obtuvo un concreto más ligero, que se utilizó para la comparación con bloques tradicionales de arcilla, obteniendo resultados muy favorables.
Elaboración de adoquines de concreto, utilizando como agregado fino arena cuarzo-feldespatita	Cuarzo-Feldespatita	Arena (100%)	El uso planteado para el estudio es en adoquines, y resultó que la muestra que reemplazó el 100% de la arena y no se mezcló con agregado grueso obtuvo las mejores propiedades



INCIDENCIA DE LOS MICROMATERIALES INERTES EN LOS CONCRETOS HIDRÁULICOS



Estudio físico mecánico de concretos sustituidos con polvo de sílice expuestos en ambiente agresivo (Giménez et al)	Sílice	Arena (10% con relación agua cemento de 0,65)	El estudio mostró mejoras en capacidad de resistencia hasta en un 60% pero no en términos de durabilidad
Evaluación de las propiedades del concreto con la adición del carbón mineral triturado (Dionicio)	Carbón mineral	Arena (3%)	No presentó variabilidad en cuanto a las propiedades del concreto base
Influencia de la incorporación de yeso residual en las propiedades químicas y mecánicas del concreto simple (Carrillo, S)	Yeso	Arena (20%)	El material no presentó condiciones favorables en ninguno de los porcentajes de reemplazo
Efecto de sustitución del 2% y 5% de agregado grueso en peso por polvo de roca caliza en resistencia a la flexión en el concreto patrón (Blas & Mena)	Caliza	Agregado grueso (5%)	Aumentó propiedades mecánicas hasta en un 23%
Propiedades del hormigón de altas prestaciones elaborado con áridos finos cerámicos reciclados y mixtos gruesos	Residuos de cerámica	Agregado grueso (20%)	Propiedades similares al concreto patrón, aunque con un reemplazo del 50% mejoró en aspectos como resistencia a la corrosión
Análisis de la resistencia a la compresión del concreto $F'c=210$ kg/cm ² con adición de vidrio reciclado molido	Residuos de vidrio molido	Arena (15%)	Proporcionó un aumento en la resistencia a la compresión (hasta un 10%) con el aumento de la edad del concreto
Influencia del porcelanato reciclado como reemplazo de los agregados sobre asentamiento, compresión, absorción, densidad y porosidad en el concreto	Residuos de porcelanato	Arena (40%)	Las propiedades mejoraron en estado endurecido. Se obtuvo un concreto de alta resistencia, durabilidad y calidad, pero con mezcla seca y poca trabajabilidad.

Nota. Fuente: Autores.

El análisis anteriormente elaborado indica que la adición de micromateriales inertes implica una serie de estudios que dependen directamente del acople a las normas locales, debido a que no existen, en Latinoamérica, normas específicas que regulen la adición de este



tipo de componentes. Ahora bien, la adición de micromateriales provenientes de rocas, involucra directamente la añadidura de varios tipos de minerales en el concreto, por lo que se recomienda realizar estudios mineralógicos respectivos que concluyan que el material que se adicionará no contenga minerales nocivos para la matriz cementicia.

Se realizó el análisis de residuos de cerámicos finos, residuos de la construcción RCD, y de residuos ornamentales, dado que se pueden analizar teniendo en cuenta el origen de la roca original, el tamaño de la partícula, módulo de finura, y porcentaje de adición con respecto a cualquier componente del concreto (AF, AG, O CP). Contrario de cómo se planteó en la teoría, algunos micromateriales disminuyen la trabajabilidad debido a la forma de sus partículas, y por el contrario, aumentan las propiedades estructurales del producto final.

4. Análisis de precios unitarios (APU)

El análisis de precios unitarios se puede encontrar en el apartado de anexos. Se realizó solo para el ítem de materiales puesto a que es el único valor que puede variar con respecto al cada diseño de mezcla. El diseño de mezcla utilizado fue un concreto patrón de 300 Psi, luego se calculó el precio unitario del mismo material pero con un reemplazo del 20% de arena por residuos de mármol (óptimo según la investigación realizada), y también con un reemplazo del 40% de arena por residuos cerámicos (óptimo según la investigación realizada). Por último se anexa el análisis de costos realizado por Velasquez en su estudio sobre el reemplazo de la arena por residuos cerámicos en distintos porcentajes.



5. Conclusiones

En primera medida es importante resaltar la importancia de la búsqueda de materiales alternativos para el concreto que permitan reducir el impacto ambiental que genera el material más usado en la construcción a nivel mundial. Se resalta entonces el uso de los micromateriales en el uso del concreto hidráulico, que fue la temática central de la presente monografía. Dentro de la revisión bibliográfica se pudo encontrar que no el origen del material no influye directamente sobre sus resultados en la aplicación en el concreto. No obstante, la forma de partículas del micromaterial influye de manera directa en la mezcla final: las partículas angulares y de textura rugosa propician una mayor absorción en la mezcla, por lo que, si se mantiene la misma relación agua/cemento, se obtendrá una mezcla con menor trabajabilidad que el concreto convencional, pero más resistente.

En este orden de ideas se hace importante la realización de más estudios, y definir un campo de aplicación para el concreto con reemplazo de micromateriales inertes, como en alguno de los estudios encontrados, que realizaban un análisis comparativo de bloques de concreto (con reemplazo de un micromaterial) y el bloque de concreto de arcilla tradicional; o también, el estudio para la aplicación del concreto alternativo en adoquines para carreteras.

En términos precisos, la única roca metamórfica sobre la que se han estudiado sus residuos para la aplicación en el concreto es el mármol. Dichos estudios, prima, según el estudio, un aumento de las propiedades mecánicas (no disminución) hasta en un 20%, manteniendo las capacidades del material en estado fresco. Las rocas ígneas, como la andesita y el granito ha sido estudiada de igual forma, por lo que se encontró que los residuos de esta última roca mejoraban las características de consistencia del concreto, y las de resistencia de igual forma, hasta en un 20%, llegando a valores de 36 Mpa.

La pumita representó un caso particular en la revisión, debido a que, con la adición de la misma en reemplazo de la arena, los valores de resistencia bajaron. Pero el estudio no se enfocaba en las propiedades mecánicas, si no en crear un bloque de concreto ligero, igualando las propiedades del bloque de arcilla calcinada convencional, o en su defecto, mejorándolas. Tal objetivo se cumplió ya que el bloque de concreto con un 75% de piedra pumita en vez de arena, obtuvo una resistencia a la compresión (133,9kg/cm²) superior al bloque convencional (130kg/cm²). Entonces, el estudio puede dar paso a la apertura de un nuevo mercado comercial sobre el uso de la pumita en este tipo de elementos de construcción.



INCIDENCIA DE LOS MICROMATERIALES INERTES EN LOS CONCRETOS HIDRÁULICOS



Las rocas sedimentarias representaron el peor balance frente a los otros dos tipos de rocas que sus residuos pueden ser usados como micromateriales. Tanto el yeso, como el carbón residual, tuvieron incidencia negativa en la muestras de concreto, por lo que se concluyó que no son materiales aptos para su uso en la construcción de concretos hidráulicos (concretos para diseño de 20Mpa, obtuvieron resistencias de menos de 5Mpa).

Otros materiales fueron objeto de estudio para la presente investigación, como el vidrio triturado y los residuos cerámicos para su uso en el concreto hidráulico. Este último tipo de residuo brindó excelentes propiedades para el hormigón, dando como resultado un concreto con mayor durabilidad que el diseño patrón, y una resistencia a la compresión mejorada en un 25%, llegando al valor de 328kg/cm².

En el criterio económico, se estudió el mármol cuyo residuo es bastante barato, el cual se aplicó un diseño de mezcla según el porcentaje óptimo deducido en el presente estudio (20%), de igual forma se estudió los residuos cerámicos, y se obtuvo una disminución del valor unitario del metro cúbico de concreto en pequeñas medidas, alrededor de un 5%. Lo que significa que el empleo de este tipo de materiales para la construcción representa un carácter más físico-mecánico y ambiental, que económico. No obstante, sobre dicho criterio pueden afectar otro tipo de variables, como lo son la disponibilidad del tipo de material en la zona y el acceso al mismo, debido a que grandes trayectos en transporte pueden aumentar y/o disminuir el valor unitario del concreto. Además, la variabilidad de materiales de agregados hace que se cuente con distintas opciones que ofrezcan mejor economía, y que este tipo de materiales no sean tan influyentes en el precio final de la mezcla, tal como lo es el acero.



6. Recomendaciones

De acuerdo a las conclusiones del estudio, se recomienda hacer uso de ensayos de calidad para la adición de los micromateriales inertes en el concreto y cualquier otro tipo de material. Esto se debe a que los materiales residuales pueden contener partículas nocivas para la mezcla y pueden perjudicar al proyecto que se requiera llevar a cabo.

De igual forma se recomienda hacer énfasis en residuos de rocas metamórficas, que es un campo no explorado en la parte de uso para concretos hidráulicos, y que se empleen técnicas, convenios y políticas para que los residuos de industrias ornamentales y otras no contaminen el medio ambiente a gran escala, sino que sus desechos puedan ser bien aprovechados.



7. Anexos

ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS

ITEM: 4. UNID: M3
DESCRIPCION: CONCRETO DE 3000 PSI

Tabla 23. Materiales (Patrón)

Descripción	Unid	Cant	Precio Unitario	Parcial
Cemento Argos	KG	350	\$ 590	\$ 206.500
Arena fina	M3	0,56	\$ 77.000	\$ 43.120
Triturado 3/4"	M3	0,84	\$ 93.900	\$ 78.876
Agua	L	180	\$ 25	\$ 4.500
SUB-TOTAL				\$ 332.996

Nota. Fuente: Autores.

Tabla 24. Materiales (20% de residuo de mármol)

Descripción	Unid	Cant	Precio Unitario	Parcial
Cemento	KG	350	\$ 590	\$ 206.500
Arena fina	M3	0,448	\$ 77.000	\$ 34.496
Polvo residual de mármol	M3	0,112	\$ 5	\$ 1
Triturado 3/4"	M3	0,84	\$ 96.723	\$ 81.247
Agua	L	180	\$ 25	\$ 4.500
SUB-TOTAL				\$ 326.744

Nota. Fuente: Autores.



Tabla 25. Materiales (40% residuo cerámico)

Descripción	Unid	Cant	Precio Unitario	Parcial
Cemento	KG	350	\$ 590	\$ 206.500
Arena fina	M3	0,336	\$ 77.000	\$ 25.872
Residuo cerámico	M3	0,224	\$ 68.000	\$ 15.232
Triturado 3/4"	M3	0,84	\$ 93.900	\$ 78.876
Agua	L	180	\$ 25	\$ 4.500
SUB-TOTAL				\$ 330.980

Nota. Fuente: Autores.

Figura 17. Comparación de precios con respecto a la adición de porcelanato molido



Nota. Fuente: Velasquez, 2021



8. Referencias

1. Acevedo Jaramillo, A. B., & Posada Franco, J. E. (2019). Polietileno tereftalato como reemplazo parcial del agregado fino en mezclas de concreto. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 18(34), 45–56. <https://doi.org/10.22395/rium.v18n34a3>
2. Agresott, J. (2012). Diseño de mezclas de concreto usando como aditivos residuos plasticos provenientes de chatarra electronicata [Universidad Tecnológica de Bolívar]. <http://biblioteca.utb.edu.co/notas/tesis/0063260.pdf>
3. Almanza Muñoz, S. P., & Zamudio Loarte, M. B. (2020). *Influencia de la mezcla de ceniza de lodo de papel y esquisto en las propiedades del concreto $f'c=210\text{Kg/cm}^2$* , *La Libertad - 2020* [Universidad César Vallejo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/62465>
4. Ámperez, G. (2019). Elaboración de adoquines de concreto, utilizando como agregado fino arena cuarzo-feldespática [Universidad Juan Carlos de Guatemala]. <http://www.repositorio.usac.edu.gt/13919/>
5. Antón, F. R. (2018). *Estudio microestructural de pastas de cemento expuestas a medios simulados de agresividad moderada frecuentes en ambientes rurales*. Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior De Ingenieros de Caminos, canales y puertos . Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado el 01 de Septiembre de 2021
6. Arimana, I., & Taquiri, L. (2020). Evaluación de la resistencia a la compresión y flexión del concreto $f'c: 210\text{ kg/cm}^2$, mediante la adición de residuos de mármol [Universidad Cesar Vallejo]. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/54557>
7. Arredondo, S. (2011). *Estudio microestructural de concretos sustentables aplicando técnicas avanzadas*. Repositorioinstitucional.mx. <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/774/1/Susana%20Pao%20la%20Arredondo%20Rea%20DCM.pdf>
8. Avila López, U., Gallardo Heredia, D. M., & Erika Martínez Sánchez, D. (s/f). *Cementos alcalinos de bajo impacto ambiental base residuos de vidrio-caliza*. Squarespace.com. Recuperado el 15 de marzo de 2022, de <https://static1.squarespace.com/static/55564587e4b0d1d3fb1eda6b/t/5ffe012d427c9>



b49996a8d41/1610481966294/14+AvilaL%C3%B3pez+Pue065+ATS+V12N1+97-103.pdf

9. Bernal, C. A., Correa, A. P., Pineda, M. I., Lemus, F. J., Fonseca, M. d., & Muños, C. R. (2010). *Metodología de la Investigación*. Colombia: Pentrice Hall. <https://abacoenred.com/wp-content/uploads/2019/02/El-proyecto-de-investigaci%C3%B3n-F.G.-Arias-2012-pdf.pdf>
10. Bernaola, V. (1911). Contribución al estudio de los feldespatos y arcillas : algunos datos sobre materiales arcillosos y silíceos de la República Argentina [Universidad de Buenos Aires]. http://hdl.handle.net/20.500.12110/tesis_n0067_Bernaola
11. Blas, A., & Mena, W. (2019). Efecto de sustitución del 2% y 5% de agregado grueso en peso por polvo de roca caliza en resistencia a la flexión en el concreto patrón Huaraz - Ancash [Universidad César Vallejo]. https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/45843/Blas_CAB-Mena_IWF-SD.pdf?sequence=1&isAllowed=y
12. Carrillo, S. (2021). Influencia De La Incorporación De Yeso Residual En Las Propiedades Químicas Y Mecánicas Del Concreto Simple [Universidad Santo Tomás]. <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/34848/2021CarrilloJoan.pdf?sequence=11&isAllowed=y>
13. Castillo, P. (2018). Instructivo de la producción, colocación y manejo del concreto elaborado en obra. <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/14212/CastilloTorresPaulaIsabel2018Anexo.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
14. Chan Yam, J. L., Solís Carcaño, R., & Moreno, E. I. (2003). Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto. *Revista Ingeniería*, 7(2), 39–46. <https://www.virtualpro.co/biblioteca/influencia-de-los-agregados-petres-en-las-caracteristicas-del-concreto>
15. Chávez, J. R. B., Mendiola, L. L., Narayanasamy, R., Coca, F. J. O., & López, A. S. (2015). Revisión sobre el uso de residuos de mármol, para elaborar materiales para la construcción. *Revista Arquitectura e Ingeniería*, 9(3), 4. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6361736>
16. Dionicio, E. (2021). EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO CON LA ADICIÓN DEL CARBÓN MINERAL TRITURADO [Universidad Cesar Vallejo]. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/77332>



17. Duque, G. (2020). Manual de geología para ingenieros. Universidad Nacional. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/3145>
18. Fabra, K., Florez, C., Callejas, H., & Cajas, P. (Eds.). (2017). *Vista de Aprovechamiento de subproductos de origen carbonatado en la industria del cemento y el concreto: Una revisión para evaluar su aplicación en el departamento del Huila*. Informador Técnico (Colombia). http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec/article/view/880/1337
19. García, E. Z. (2020). *Calidad de Arena para concreto hidráulico en cinco bancos de materiales del municipio de Puebla*. Puebla : Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
20. García, L. C. (2017). Reflexiones sobre la edificación sustentable. *Construcción y tecnología en concreto*. Recuperado el 26 de Septiembre de 2021, de <https://www.imcyc.com/revistacyt/index.php/ingenieria?start=5>
21. Giménez, A., Olavarrieta, M., Escalona, L., & Gallegos, H. (2018). Estudio físico mecánico de concretos sustituidos con polvo de sílice expuestos en ambiente agresivo simulado. *Gaceta Técnica*, 19(2), 37–50. <https://www.redalyc.org/journal/5703/570360789005/html/>
22. Gonzalez-Corominas, A., & Etxeberria, M. (2014). Properties of high performance concrete made with recycled fine ceramic and coarse mixed aggregates. *Construction and building materials*, 68, 618–626. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.016>
23. González, L. (2019). Geología, ciencia y cultura. Servicio geológico Colombiano. <https://libros.sgc.gov.co/index.php/editorial/catalog/book/26>
24. Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. P. (2018). *Metodología de la Investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta* (Impreso por Edamsa Impresiones ed.). (I. E. C.V, Ed.) México D.F: Ma Graw Hill - Interamericana Editores S.A de C.V.
25. Icontec. (2013). Norma Técnica Colombiana (NTC) 121: Especificación de desempeño para cemento hidráulico. Icontec. <https://wiac.info/docview>
26. Lisboa, E. (2004). Obtención de hormigones autocompactantes a partir de residuos de la elaboración de mármoles y granitos y estudio de propiedades mecánicas [Universidade Federal de Alagoas]. <http://www.repositorio.ufal.br/handle/riufal/377>



27. Lutgens & Edward. (2005). *Ciencias de la tierra: Una introducción a la geología física*. Pearson.
<https://xeologosdelmundo.org/wp-content/uploads/2016/03/TARBUCK-y-LUTGENS-Ciencias-de-la-Tierra-8va-ed.-1.pdf>
28. Méndez, E. (2012). Propuesta para sustitución de agregados petreos por agregados pet, en diseño de mezcla de concreto con resistencia $f'c=150\text{kg/cm}^2$, usado para banquetas, guarniciones y firmes [Universidad Veracruzana].
<http://cdigital.uv.mx/handle/123456789/30611>
29. Moncaleano, C., & Jaramillo, J. (2016). Uso de Diferentes Agregados Finos y Fibras en el Concreto Fabricado con Cuarzo como Agregado Grueso [Universidad de La Salle].
https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1091&context=ing_civil
30. Paredes, A. (2019). Análisis de la resistencia a la compresión del concreto $F'c=210\text{kg/cm}^2$ con adición de vidrio reciclado molido [Universidad Nacional de San Martín].
<https://repositorio.unsm.edu.pe/bitstream/handle/11458/3339/CIVIL%20-%20Alexis%20Paredes%20Bendez%20Bendez%20Bendez%20Bendez.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
31. Pari, L. (2022). 1. evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de la adición de piedra pómez para la elaboración de unidades de albañilería de concreto ligero en la ciudad de puno [Universidad Nacional del Altiplano].
http://tesis.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/18478/Pari_Condori_Lelys_Del_Carmen.pdf?sequence=1&isAllowed=y
32. Pereira, J. (2000). UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE CORTE DE GRANITO (RCG) COMO ADIÇÃO PARA PRODUÇÃO DE CONCRETOS [UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL].
<https://doi.org/10.17271/19800827912013597>
33. Petry, N. D. S., Delongui, L., Muller, Á. L., Masuero, A. B., & Dal Molin, D. C. C. (2017). Avaliação do uso de resíduos de marmoraria na produção de concretos. *Revista de Arquitetura IMED*, 6(2), 71. <https://doi.org/10.18256/2318-1109.2017.v6i2.1946>
34. Prieto, L. F. M., & Castellanos, M. F. G. (2017). Propiedades de concretos y morteros modificados con nanomateriales: estado del arte. *Arquetipo*, 14, 81–98.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6178185>
35. Porrero, J., Ramos, C., Grases, J., & Velazco, G. (2009). Manual del concreto estructural. Ábaco del Rey. <https://www.libreriaingeniero.com/2017/09/manual-del-concreto-estructural-joaquin-porrero.html>



36. Roa, O. (2016). *LAS MEZCLAS DE CONCRETO HIDRÁULICO CON ADITIVOS INCLUSORES DE AIRE "CENIZAS VOLANTES"* [UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS]. <https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/5069/RoaParraOscarAdolfo2016.pdf;jsessionid=54923528FAF5514421004504C8FF39F1?sequence=1>
37. Sánchez, D. (2001). *Teconología del concreto y del mortero*. Bhandar Editores. https://www.academia.edu/35759848/Tecnolog%C3%ADa_del_concreto_y_del_mortero_Diego_S%C3%A1nchez_De_Guzm%C3%A1n_Bhandar_Editores
38. Servicio Geológico Mexicano. (2013). *Rocas sedimentarias*. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/157798/Que-es-el-carbon-mineral.pdf>
39. Silva, O. J. (2020). *360 Concreto*. Obtenido de <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/tipos-de-agregados-y-su-influencia-en-mezcla-de-concreto>
40. Spikerman, J. (2010). *Elementos de geología general*. Fundación de Historia Natural Félix de Azara. <https://www.fundacionazara.org.ar/img/libros/elementos-de-geologia-general.pdf>
41. Subsecretaría de Minería de México. (2017). *Perfil de Mercado del Yeso*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/287809/Perfil_Yeso_2017.pdf
42. Taylor, S., & Bogdan, R. (1987). *Introducción a los métodos cualitativos de Investigación*. Barcelon - Buenos Aires - Mexico: Paidós.
43. Torres, G., Muñoz, I. F., Ing, U. M., Ciudad Universitaria, I. C., & Facio, R. (2012). *Concreto hidráulico: Usos y aplicaciones*. Ucr.ac.cr:8080. <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/bitstream/123456789/4295/1/34247.pdf>
44. Valdez, P., Barragán, B., Girbes, I., Shuttleworth, N., & Cockburn, A. (2011). *Uso de residuos de la industria del mármol como filler para la producción de hormigones autocompactantes*. *Materiales de Construcción*, 301, 61–76. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3439849>
45. Velasquez, G. (2021). *Influencia del porcelanato reciclado como reemplazo de los agregados sobre asentamiento, compresión, absorción, densidad y porosidad en el concreto* [Universidad privada del norte]. <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/29593>