

Incidencia de las propiedades físicas de agregados calizos y silíceos en el comportamiento mecánico de los concretos hidráulicos

Ramón Torres-Ortega & Manuel Saba

Programa de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Cartagena, Cartagena, Colombia



Para citaciones: R. Torres-Ortega, M. Saba, "Incidencia de las propiedades físicas de agregados calizos y silíceos en el comportamiento mecánico de los concretos hidráulicos", *Ing-Nova*, vol. 2, no. 2, pp. 69-88, Jul. 2023. <https://doi.org/10.32997/rin-2023-4143>

Recibido: 13 de febrero de 2023

Revisado: 05 de mayo de 2023

Aprobado: 10 de mayo de 2023

Autor de correspondencia:

Ramón Torres-Ortega

rtorreso@unicartagena.edu.co

Editor: Miguel Ángel Mueses. Universidad de Cartagena-Colombia.

Copyright: © 2023. R. Torres-Ortega & M. Saba. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/> la cual permite el uso sin restricciones, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre y cuando que el original, el autor y la fuente sean acreditados.



RESUMEN

La caracterización físico-mecánica de los agregados pétreos permite determinar la influencia de los mismos en las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido, principalmente en su resistencia mecánica y durabilidad, por lo que en el estudio que se presenta a continuación se analizan las propiedades granulométricas, de resistencia a la abrasión, terrones de arcilla y partículas deleznable, porcentaje de caras fracturadas, índice de plasticidad, material que pasa Tamiz No. 200 y absorción, según corresponda, de un agregado grueso de tipo silíceo (A1) correspondiente a un canto rodado y uno de tipo calizo (A2) y de un agregado fino (AR1) provenientes de dos fuentes de materiales localizadas en la ciudad de Cartagena. De esta manera, se elaboraron cilindros y vigas de concreto con relaciones de agua/cemento de 0.45 y 0.47 y distintas dosificaciones de aditivos plastificantes, para realizar ensayos de asentamiento, resistencia a compresión y resistencia a flexión, obteniendo un aumento en la resistencia a la compresión de 21% con la utilización de agregado de tipo calizo en el concreto hidráulico. Además, se presenta la caracterización mediante microscopía SEM EDS y EDX de los agregados gruesos A1 y A2 utilizados y el análisis SEM EDS de los concretos elaborados con dichos agregados.

Palabras clave: Resistencia a la compresión; Graduación de agregados; Durabilidad del concreto.

Incidence of the physical properties of limestone and siliceous aggregates on the mechanical behavior of hydraulic concretes

ABSTRACT

The physical-mechanical characterization of the stone aggregates makes it possible to determine their influence on the properties of the concrete in the fresh and hardened state, mainly in its mechanical resistance and durability, for which the properties are analyzed in the study presented below. granulometric, resistance to abrasion, clay lumps and crumbly particles, percentage of fractured faces, plasticity index, material that passes Sieve No. 200 and absorption, as appropriate, of a siliceous coarse aggregate (A1) corresponding to a boulder and

one limestone type (A2) and a fine aggregate (AR1) from two sources of materials located in the city of Cartagena. In this way, concrete cylinders and beams were made with water/cement ratios of 0.45 and 0.47 and different dosages of plasticizing additives, to carry out settlement, compression resistance and flexural resistance tests, obtaining an increase in the resistance to 21% compression with the use of limestone aggregate in hydraulic concrete. In addition, the characterization by means of SEM EDS and EDX microscopy of the coarse aggregates A1 and A2 used and the SEM EDS analysis of the concretes made with said aggregates are presented.

Keywords: Compressive strength; Aggregate gradation; Concrete durability.

1. Introducción

En la actualidad, el concreto hidráulico se constituye como el material más utilizado en la industria de la construcción, cuyo desempeño depende de las propiedades de la matriz de la pasta de cemento y de las partículas de roca o agregados que se agregan a esta, así, el comportamiento de este material compuesto depende fundamentalmente de las propiedades de cada uno de estos dos componentes y de la interfase que se genera entre ellos [1]. Los agregados utilizados en el concreto se caracterizan por tomar las propiedades físicas, químicas y mecánicas de la roca madre [2]. Así, los agregados más comunes a utilizar en el concreto son las de tipo calizo, caracterizados generalmente por ser altamente porosos y por su buena adherencia con la pasta de cemento [3] y las de tipo silíceo caracterizadas por presentar menor porosidad, mayor densidad y módulo de elasticidad y forma redondeada con superficie más suave y lisa con respecto a las rocas trituradas [4].

2. Antecedentes

2.1 Agregados pétreos

Los agregados pétreos se constituyen como materiales granulares de textura sólida, provenientes de macizos rocosos o depósitos no consolidados que contienen partículas de roca de distintos tamaños, pudiendo tener un origen sedimentario como resultado de fuerzas geológicas erosivas del agua y el viento [5], haber sido sometidos a cambios de presión y temperatura, proviniendo de rocas metamórficas [6] o ser obtenidos a partir de rocas ígneas mediante el enfriamiento y la solidificación de magma [7].

Las características de los agregados en cuanto a forma, textura y gradación influyen significativamente en la manejabilidad, exudación y segregación del concreto fresco, y en la resistencia, rigidez, permeabilidad y durabilidad del concreto endurecido [8], por lo que deben estar constituido por partículas limpias, resistentes y durables, que desarrollen buena adherencia con la matriz de cemento [9].

2.1.1 Naturaleza petrológica de los agregados pétreos

Según su naturaleza petrológica, los agregados se pueden clasificar en agregados calizos, agregados silíceos y agregados ígneos y metamórficos [10]. La roca caliza es un tipo de roca común, abundante y económica en los procesos de trituración, que se caracteriza por ser altamente porosa y estar constituida principalmente por carbonato de calcio (75%) y carbonato de magnesio (13%) [3]. Este tipo de agregado secado al aire bajo

condiciones normales presenta densidades que oscilan entre 1.90 g/cm³ y 2.20 g/cm³, mientras que, en condiciones de humedad, la densidad puede ser de 2.20 g/cm³ a 2.90 g/cm³ [11]. Además, se caracteriza por su buena adherencia con la pasta de cemento, por lo que las resistencias obtenidas pueden aumentarse usándose en la producción de concretos piedra caliza más densa y con bajos coeficientes de desgaste [12].

Por su parte, los agregados silíceos se caracterizan por presentar menor porosidad, mayor densidad y módulo de elasticidad y forma redondeada con superficie más suave con respecto a las rocas trituradas [4]. La presencia de agregado silíceo en una mezcla de concreto puede ocasionar sangrado y exudación en estado fresco. Además, por su rigidez y superficie suave y lisa puede presentarse una incompatibilidad entre la pasta de cemento y los agregados, ofreciendo una menor adherencia entre ellos, debido a que la zona de interfase existente entre la pasta y los agregados puede ser débil en comparación con el uso de rocas calizas trituradas como agregado grueso [13]. Además, debido a su baja porosidad, este tipo de agregado presenta mayor resistencia al desgaste [14].

Los agregados metamórficos son aquellos provenientes de rocas metamórficas que a su vez provienen de ígneas y sedimentarias que han experimentado grandes presiones y altas temperaturas. Por su parte, los agregados ígneos son rocas formadas por la consolidación del magma fundido, clasificándose en rocas intrusivas y extrusivas [15].

2.1.2 Caracterización de agregados pétreos

La caracterización de los agregados que conforman el concreto es un factor determinante en el comportamiento mecánico y la durabilidad de estructuras de concreto [8]. La absorción se destaca como la propiedad que más influye en la consistencia del concreto, ya que las partículas de los agregados absorben el agua disminuyendo la manejabilidad de la mezcla. La forma y el tamaño del agregado también inciden significativamente en la consistencia del concreto, así, a mayor superficie del agregado a cubrir con pasta, se tendrá menor fluidez [12].

Por otra parte, la granulometría y el tamaño máximo del agregado afectan las cantidades relativas requeridas de los agregados, la relación agua/cemento, la trabajabilidad, la economía y la durabilidad del concreto. Así, cuando los agregados son muy gruesos generalmente producen mezclas rígidas, mientras que aquellos que tienen una curva granulométrica suave, producirán resultados más satisfactorios en las propiedades del concreto en estado fresco [16].

Las propiedades físico-mecánicas de los agregados pétreos inciden directamente en la resistencia y durabilidad del concreto en estado endurecido. La textura de los agregados afecta la adherencia entre las partículas y la matriz de concreto, lo que se refleja en la variación de la resistencia, ya que partículas rugosas tienden a producir mayores resistencias que las partículas lisas. Por su parte, la durabilidad se asocia a un bajo contenido de agua, por lo que los agregados angulares, aplanados y alargados afectan negativamente la durabilidad del concreto al aumentar la demanda de agua [8].

Con el fin de caracterizar las propiedades de los agregados pétreos, la Norma Técnica Colombiana NTC 174 establece los requisitos de gradación y calidad para los agregados finos y gruesos a utilizarse en el concreto [17].

2.1.2.1 Propiedades físicas y mecánicas de los agregados pétreos

La granulometría se define como la composición en porcentaje de los diversos tamaños de agregado en una mezcla, indicando de mayor a menor tamaño, por una cifra que representa, en peso, el porcentaje parcial de cada tamaño que pasa o queda retenido en los diferentes tamices utilizados para tal medición [18]. Luego, la granulometría y el tamaño máximo del agregado afectan las proporciones relativas de los mismos en los diseños de mezclas y la relación agua/cemento, impactando en la resistencia, manejabilidad, economía, porosidad, contracción y durabilidad del hormigón [19]. Además, la forma de las partículas de los agregados depende del tipo de roca y sus características y de las condiciones de sedimentación y transporte que experimentó durante la transformación [20], influyendo en la manejabilidad del concreto en estado fresco y en otras características físicas en estado sólido. Se conoce como absorción al incremento en masa del agregado por efectos de la penetración de agua en los poros que conforman sus partículas, [21]. Se ha evidenciado experimentalmente que los agregados de alta absorción facilitan el transporte de fluidos en el concreto, propiciando la penetración de cargas ambientales [22] y, por lo general, presentan un alto porcentaje de partículas finas, lo que ocasiona que su superficie específica total sea mayor [23], generando una mayor demanda de agua de mezclado y por consecuencia, un mayor requerimiento de cemento para mantener la misma relación agua/cemento.

El índice de plasticidad se expresa como el porcentaje del peso en seco de una muestra de agregado fino, lo que indica el intervalo de variación del contenido de humedad con el cual el agregado se mantiene plástico [24].

Las impurezas se constituyen como sustancias o partículas indeseadas que se pueden mezclar con los agregados, como sustancias orgánicas, sales solubles, limos, arcillas y carbón [25]. La capa externa de los agregados puede estar formada por elementos químicos nocivos al concreto, aunque la roca sea de buena calidad. Así, las impurezas como humos, restos orgánicos y sales solubles retrasan el fraguado y causan deterioros en el concreto, mientras que los limos y arcillas en grandes cantidades conducen a incrementos en el agua requerida para reducir el fraguado.

Abordando las propiedades mecánicas de los agregados, la resistencia a la abrasión se define como la capacidad para resistir el desgaste causado por frotación o fricción, principalmente por acciones mecánicas como rozamiento, deslizamiento, raspadura, percusión y arrastre de materiales abrasivos [26]. En general, los agregados de rocas que tienen alta resistencia de compresión uniaxial presentan una alta resistencia a la abrasión [27].

2.2 Propiedades físicas y mecánicas de concretos con agregados calizos y silíceos

La evidencia anecdótica y algunos estudios comparativos indican que, para mezclas de concretos equivalentes, los agregados calizos generalmente permiten obtener resistencias a la compresión más altas que los agregados de tipo silíceo, observando mejoras en todas las edades, de 1 a 28 días, que oscilan entre el 10% y el 20% [28], lo que se atribuye a que el agregado calizo exhibe características de adherencia con la pasta de cemento superiores a las presentadas por el agregado silíceo. Así, la mayor angularidad, menor esfericidad, textura más gruesa y naturaleza más alagada del agregado de piedra caliza contribuye a la mejor unión entre la pasta y los agregados en el concreto [29].

2.3 Microscopia SEM

Actualmente, en el estudio de compuestos cementicios se ha adoptado la caracterización multiescalar de este tipo de materiales [30]. Así, mientras que en la caracterización a macro escala se trata el concreto como un material homogéneo, evaluando sus propiedades macroscópicas mediante pruebas de resistencia mecánica, comportamiento a la fatiga, permeabilidad y resistencia a la corrosión [31], a meso escala se considera como un material heterogéneo compuesto por agregados, cemento y agua, estando sus propiedades determinadas por las de la pasta de cemento y las interfases, así como por la forma y distribución de los agregados [32]. A microescala, es posible observar los productos de la hidratación del concreto y la microestructura de la superficie de los agregados, permitiendo comprender las propiedades de las diferentes fases a meso escala y las propiedades mecánicas a macro escala [33]. La Microscopia Electrónica de Barrido SEM es una técnica básica de estudio que aprovecha la incidencia de un haz de electrones en las muestras, permitiendo caracterizar la morfología de la superficie, su grado de cristalinidad, estructuras, degradación y textura. Así, esta técnica permite el análisis de las características morfológicas, estructurales y químicas de los materiales.

3. Materiales y métodos

Para el desarrollo experimental del presente estudio, se utilizaron agregados obtenidos de dos canteras ubicadas en la ciudad de Cartagena. Para el agregado grueso se seleccionaron dos tipos: A1 (3/4") proveniente de la Fuente 1 y A2 (3/4"), proveniente de la Fuente 2. El agregado fino (AR1) se obtuvo de la Fuente 1. A continuación, se presenta el origen detallado de los agregados a utilizar. Debe mencionarse que las gradaciones y los ensayos físico-mecánicos se realizaron por tipo de agregado grueso, manteniendo la misma fuente para el agregado fino (fuente 1) y el mismo cemento (tipo III).

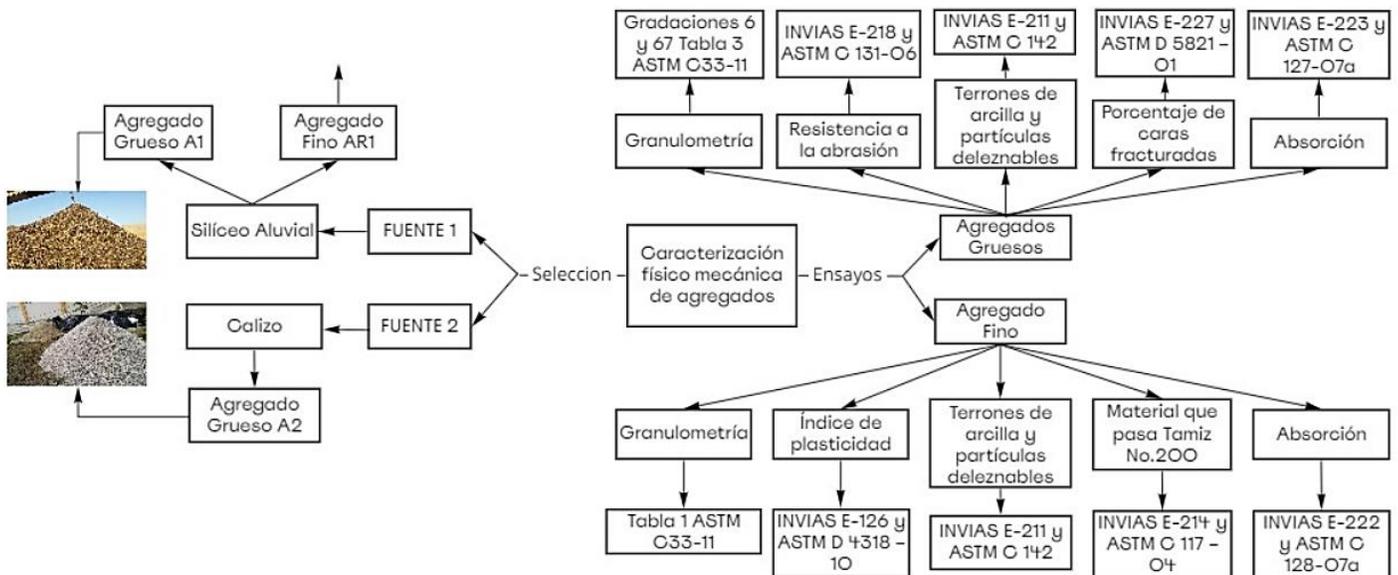


Figura 1. Esquema metodológico de caracterización de agregados

Para el análisis de las granulometrías de las dos fuentes seleccionadas para el agregado grueso, se consideraron las gradaciones para los agregados de la ASTM C 33-11 que establece que la granulometría del

agregado grueso para concretos hidráulicos se debe ajustar a las granulometrías especificadas en la Tabla 3 de dicha norma, planteando una serie de rangos y combinaciones adaptables a los agregados disponibles en distintos países.

Así, debido a que el tamaño máximo de los agregados seleccionados equivale a 3/4" se escogieron como granulometrías de comparación la 6 y 67 presentadas en la norma descrita. Debe mencionarse que la gradación 67 es una combinación entre las gradaciones 6 y 7.

Los ensayos de granulometría para los agregados finos correspondiente a la arena proveniente de la Fuente 1 se realizaron de acuerdo con las especificaciones establecidas en la Norma INVIAS 213. Además, se comparó la granulometría obtenida con los rangos permitidos en la Tabla 1 de la ASTM C33-11 que especifica la granulometría del agregado fino para concreto hidráulico.

3.1 Ensayos para la caracterización físico-mecánica de concretos con agregados silíceos y calizos

Una vez caracterizados los dos tipos de agregados gruesos seleccionados y el agregado fino estudiado, se realizaron ensayos de resistencia mecánica a compresión y flexión a muestras de concreto, con el objetivo de establecer comparaciones entre concretos reforzados con agregado grueso de tipo silíceo y de tipo calizo. Debe mencionarse que para el diseño de mezclas se utilizó un cemento tipo III, estableciendo inicialmente una relación agua/cemento de 0.45 y posteriormente de 0.47. Además, se utilizaron como aditivos plastificantes Plastime NT AD-30 y Viscocrete en distintas dosificaciones y combinaciones. De esta manera, se determinó el asentamiento o Slump, los días de fraguado, la resistencia a la compresión y a la flexión y el incremento de resistencia a compresión al comparar los dos tipos de agregados gruesos estudiados.

3.1.1 Ensayos de Asentamiento

El ensayo realizado para determinar el asentamiento de las muestras de concreto estudiadas se llevó a cabo siguiendo lo establecido en las normas NTC 396 y ASTM 143. Para ello, se colocó cada muestra de concreto fresco en el molde tronco cónico, compactando, mediante una varilla, con 25 golpes cada una de las tres capas y levantando posteriormente el molde para permitir que el concreto se asentara. Luego, se calculó el asentamiento como la diferencia entre la posición inicial y la desplazada de la superficie superior del concreto.

3.1.2 Ensayos de resistencia a la compresión

Los ensayos para determinar la resistencia a compresión de los especímenes cilíndricos de las muestras de concreto se realizaron de conformidad a las especificaciones de la NTC 673 y la ASTM C39. Así, se aplicó una carga axial de compresión hasta que estos fallaran, calculando la resistencia a la compresión como el cociente entre la carga máxima alcanzada durante el ensayo y la sección transversal del área del espécimen.

3.1.3 Ensayos de resistencia a la flexión

Para determinar la resistencia de las muestras de concreto a la flexión, se siguió el método de ensayo establecido en las normas NTC 2871 y ASTM C78, por lo que se utilizaron vigas simples con cargas en los

tercios medios. De esta manera, se cargó el espécimen continuamente y sin impactos, aplicando la carga a una tasa constante hasta el punto de rotura.

4. Resultados y Discusión

Las gradaciones realizadas para las dos fuentes de agregados gruesos seleccionadas se presentan en la tabla que se muestra a continuación. Los datos sombreados corresponden a aquellos que no cumplen con los porcentajes permitidos por la Norma ASTM C33-11 para las granulometrías 6 y 67.

Tabla 1. Resultados Granulometría de agregado grueso. Comparación con las gradaciones 6 y 67 de la Tabla 3 ASTM C33-11

<i>Granulometría ASTM C33-11</i>	<i>Identificación de la muestra: Agregado Grueso</i>			
	<i>Fecha de ensayo: Enero de 2022</i>			
<i>Size number ASTM C33: 6</i>	<i>Tamiz</i>	<i>Abertura (mm)</i>	<i>A1</i>	<i>A2</i>
19-9.5 mm (3/4 a No. 4)			FUENTE 1	FUENTE 2
			<i>% Que pasa</i>	
100	1"	25,4	100	100
90-100	3/4"	19	91,6	99,6
20-55	1/2"	12,5	67,2	67,2
0-15	3/8"	9,5	42,7	33,8
0-5	No. 4	4,8	5,9	3,7
0	No.8	2,4	0,4	1,3
0	Fondo		0	0,8
<i>Size number ASTM C33: 67</i>				
19-4.75 mm (3/4 a No. 8)				
100	1"	25,4	100	100
90-100	3/4"	19	91,6	99,6
0	1/2"	12,5	67,2	67,2
20-55	3/8"	9,5	42,7	33,8
0-10	No. 4	4,8	5,9	3,7
0-5	No.8	2,4	0,4	1,3
0	Fondo		0	0,8

A continuación, se presenta la distribución granulométrica del agregado A1, correspondiente a la primera fuente, de tipo sílice aluvial, en la que las barras de error indican el rango del porcentaje que pasa permitido por la Norma para las gradaciones 6 y 67.

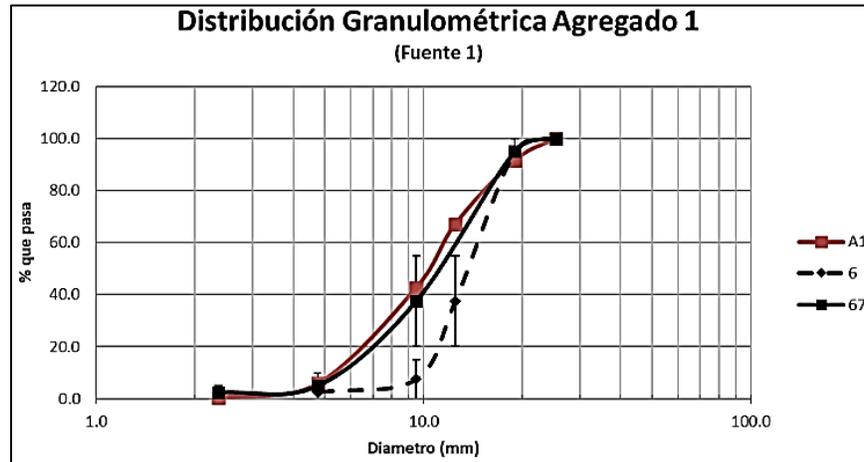


Figura 2. Distribución granulométrica del Agregado 1 y su comparación con la granulometría 6 y 7 de la Tabla 3 de la ASTM C33-11

De esta manera, se observa que el agregado A1 no cumple con los porcentajes de partículas con tamaño 12.5 mm , 9.5 mm y 4.8 mm de la granulometría 6, siendo un incumplimiento por exceso, lo que indica que hay más partículas con este tamaño que las permitidas, sin embargo, el exceso de partículas de 4.8 mm es inferior al 1%. Al comparar la gradación obtenida con la granulometría 67, se evidencia un exceso de porcentaje de partículas de tamaño de 12.5 mm , debido a que la norma no referencia porcentajes de este tamaño. Sin embargo, se evidencia que la curva se corresponde con la gradación de referencia en el intervalo de 9.5 mm a 19.0 mm al que pertenece. Así, se concluye que para la Fuente 1, el agregado A1 cumple para la granulometría 67.

Por su parte, el agregado A2, no cumple con los porcentajes de partículas con tamaño 12.5 mm y 9.5 mm de la granulometría 6, siendo este incumplimiento también por exceso. En lo que respecta a la granulometría 67, se observa un exceso de porcentaje de partículas de tamaño 12.5 mm , ya que la norma de referencia no cita porcentaje de este tamaño. Sin embargo, de manera análoga a la señalada para el agregado A1, la curva es similar a la gradación al intervalo de 9.5 mm a 19 mm al que pertenece.

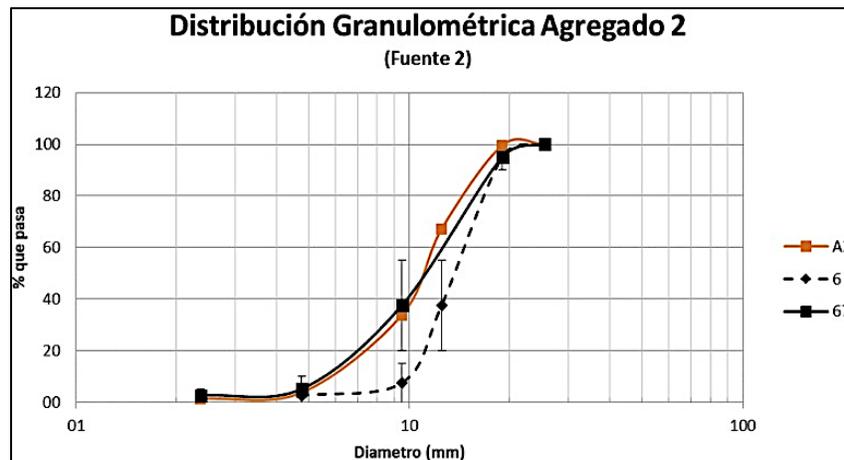


Figura 3. Distribución granulométrica del Agregado 2 y su comparación con la granulometría 6 y 7 de la Tabla 3 de la ASTM C33-11.

Así, es posible afirmar que el agregado A2 cumple para la granulometría 67 de la ASTM C33-11. Además, este agregado presenta características similares al A1, siendo ligeramente de calidad superior al cumplir con el porcentaje de tamaño 4.8 mm. Los resultados de la granulometría para el agregado fino AR1 se presentan a continuación:

Tabla 2. Resultados Granulometría de agregado fino. Comparación con los rangos permitidos en la Tabla 1 de la ASTM C33-11.

<i>Granulometria ASTM C33-11</i>	Identificación de la muestra: Agregado Fino		
	Fecha de ensayo: Enero de 2022		
<i>ASTM C33-11 Tabla 1</i>	Tamiz	Tamaño de partícula	<i>ARI</i> % Que pasa
100	3/8"	9,5	100
95-100	No.4	4,8	91,52
80-100	No.8	2,4	69,85
50-85	No.16	1,2	51,73
25-60	No.30	0,6	40,36
5-30	No.50	0,3	16
0-10	No.100	0,15	2,11
0-5	No.200	0,075	0,58

En la tabla anterior se evidencia que el agregado fino AR1 no cumple para los tamaños 4.8 mm y 2.4 mm de la Tabla 1 de la ASTM C33-11. A continuación se presenta la distribución granulométrica del agregado fino AR1

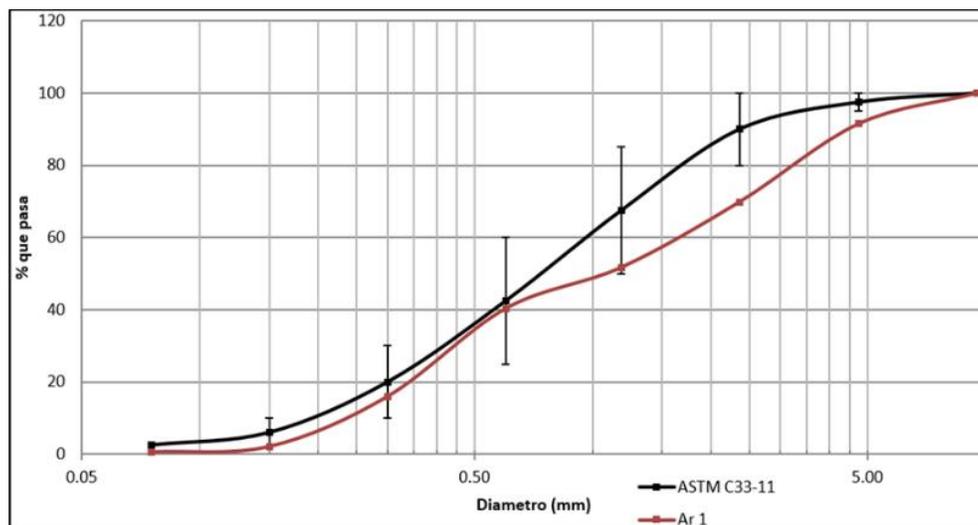


Figura 4. Granulometría de agregado fino AR1 con respecto a la norma ASTM C33-11.

Seguidamente, se presentan los resultados obtenidos a partir de los ensayos realizados para caracterizar los dos agregados gruesos y el agregado fino seleccionado, y su comparación con la normatividad vigente representada en el Artículo 505 del Manual de Especificaciones Generales de Construcción de carreteras y

Normas de Ensayo de Materiales del Instituto Nacional de Vías INVIAS 2013, que toma como referente internacional a la Norma ASTM C-295.

Tabla 3. Resumen de la caracterización de los agregados estudiados.

<i>Propiedad/ Agregado</i>	<i>Agregado Grueso</i>		
	<i>A1</i>	<i>A2</i>	<i>Artículo 505 INVIAS</i>
<i>Desgaste (M. de los Angeles).</i>	16.63%	27.23%	<i>Max 40%</i>
<i>Terrones de arcilla</i>	0.79%	0.59%	<i>Max 3%</i>
<i>Caras fracturadas</i>	85.62%	86.77%	<i>Min 60%</i>
<i>Absorción</i>	2%	4%	
<i>Densidad seca</i>	2403.33 <i>kg/m³</i>	2292.84 <i>kg/m³</i>	
<i>Densidad saturada</i>	2451.39 <i>kg/m³</i>	2384.56 <i>kg/m³</i>	
<i>Densidad aparente</i>	2525 <i>kg/m³</i>	2475 <i>kg/m³</i>	
<i>% De vacíos</i>	29.16%	30.31%	
<i>Humedad</i>	0.20%	1.20%	
<i>Propiedad/ Agregado</i>	<i>Agregado Fino ARI</i>		
<i>Índice de plasticidad</i>	NP		NP
<i>Terrones de arcilla</i>	4.96%		<i>Max 3%</i>
<i>Material que pasa Tamiz No.200</i>	3.76%		<i>Max 3%</i>
<i>Absorción</i>	2.35%		<i>Max 4%</i>
<i>Densidad seca</i>	2512.26 <i>kg/m³</i>		
<i>Densidad saturada</i>	2571.39 <i>kg/m³</i>		
<i>Densidad aparente</i>	2670.57 <i>kg/m³</i>		

A partir de los resultados obtenidos se evidencia que, al bordar las propiedades de dureza de los agregados estudiados, ambos cumplen con los requerimientos establecidos en la normatividad referenciada, presentando el agregado silíceo un menor porcentaje de desgaste que el agregado calizo, lo que se traduce en una mayor resistencia a la abrasión, debido a la baja porosidad de los agregados de tipo silíceo [14].

Al evaluar el porcentaje de terrones de arcillas y partículas deleznablees presentes en los áridos estudiados es posible afirmar que ambos se encuentran por debajo de los límites establecidos, lo que indica que estos agregados gruesos se caracterizan por propiedades de limpieza óptimas, sin partículas indeseables que puedan afectar adversamente la calidad de la mezcla de concreto.

Como se puntualizó en apartados anteriores, los agregados silíceos se caracterizan por tener una porosidad menor que la presentada por los agregados de tipo calizo, por lo que la capacidad de absorción de los primeros será menor que la de los segundos, relación también válida para el porcentaje de humedad [4]. Así, es evidente que el agregado A2 duplica la capacidad de absorción de del agregado A1, situación similar a la ocurrida al analizar el porcentaje de humedad. Además, se ratifica que la densidad de los agregados calizos al presentar una porosidad elevada, tienen una densidad menor al de los silíceos. Al comparar los resultados de densidad seca y densidad saturada obtenidos para los agregados calizos con los valores teóricos referenciados [11], se puede afirmar que existe una correspondencia entre ellos.

En cuanto al análisis de agregados finos, es evidente que este contiene impurezas o partículas indeseadas que pueden afectar la calidad del concreto, teniendo en cuenta que excede los porcentajes establecidos por la Norma para el contenido de terrones de arcilla y partículas deleznablees y el porcentaje de material que pasa el tamiz No. 200. Sin embargo, se destaca que, por tratarse de un material silíceo, los niveles de absorción del AR1 son relativamente bajos, ajustándose a los límites establecidos.

Posteriormente se realizaron comparaciones entre los resultados obtenidos experimentalmente y los registrados en la bibliografía existente a nivel nacional e internacional. Para los agregados gruesos fue posible establecer las siguientes comparaciones. Al comparar el porcentaje de desgaste de los dos agregados calizos tomados como referencia, es evidente que estos presentan menor resistencia a la abrasión que el agregado silíceo, situación similar a la presentada anteriormente en los ensayos propios, ratificando que la baja porosidad.

Tabla 4. Comparativo agregado grueso con bibliografía existe

Propiedad/Agregado	Resultado	Tipo de agregado	Referencia
Desgaste (M. De los Ángeles)	30.86%	Calizo	[34]
	22,00%	Silíceo	[35]
	38,00%	Calizo	[36]
	27.23%	Calizo	Propia
	16.63%	Silíceo	Propia
Caras fracturadas	94.5%	Calizo	[37]
	98,00%	Silíceo	[38]
	86.77%	Calizo	Propia
	85.62%	Silíceo	Propia
Absorción	1.95%	Calizo	[39]
	3.1%	Calizo	[34]
	1.8%	Silíceo	[35]
	4.5%	Calizo	[36]
	4%	Calizo	Propia
	2%	Silíceo	Propia
Densidad seca	2.32 g/cm ³	Calizo	[34]

	2.16 g/cm ³	Silíceo	[40]
	2.23 g/cm ³	Calizo	Propia
	2.40 g/cm ³	Silíceo	Propia
Densidad saturada	2.26 g/cm ³	Silíceo	[40]
	2.38 g/cm ³	Calizo	Propia
	2.45 g/cm ³	Silíceo	Propia
Densidad aparente	2.21 g/cm ³	Calizo	[36]
	2.48 g/cm ³	Calizo	Propia
	2.53 g/cm ³	Silíceo	Propia
Humedad	1,00%	Calizo	[39]
	1,29%	Calizo	[34]
	1.20%	Calizo	Propia
	0.20%	Silíceo	Propia

Al comparar los porcentajes de absorción y de humedad de los agregados de las referencias [34] y [39] con los de los valores experimentales obtenidos para el agregado A2, se observa la relación directamente proporcional entre estas dos propiedades físicas. Además, es evidente que en todo caso el porcentaje de absorción inicial de agua y de humedad es mayor en los agregados calizos que en los de tipo silíceo, situación que también obedece a la alta porosidad de los primeros.

Analizando las densidades de los agregados en cuestión, se observa que las densidades del agregado de tipo silíceo estudiado son mayores a las de los agregados de tipo calizo, tanto de fuentes propias como de fuentes externas. Sin embargo, las densidades del agregado silíceo consultado en la bibliografía resultan ser menores a las de los calizos.

De esta manera se observa que existe una relación de correspondencia entre los valores experimentales obtenidos y los valores consignados en la bibliografía consultada. Debe anotarse que se escogieron referencias bibliográficas en cuyos procedimientos se siguieran las especificaciones de las normas internacionales citadas anteriormente, con el fin de garantizar una uniformidad en procedimientos que permitiera realizar comparaciones objetivas. Seguidamente, se presenta la comparación para agregados finos.

Tabla 5. Comparativo agregado fino con bibliografía existente.

<i>Propiedad</i>	<i>Valor</i>	<i>Referencia</i>
<i>Terrones de arcilla</i>	1.34%	[41]
	4.96%	Propia
<i>Material que pasa Tamiz No.200</i>	12.80%	[41]
	3.74%	Propia
<i>Absorción</i>	1.70%	[41]
	2.35%	Propia
<i>Densidad aparente (kg/m³)</i>	1420	[41]
	2670.57	Propia

Al comparar los valores obtenidos experimentalmente con los valores referenciados para el agregado fino, es posible afirmar que aun cuando el porcentaje de terrones de arcilla de los últimos es considerablemente

menor al de los primeros, es cuestionable la limpieza del material al evaluar el porcentaje de material que pasa el tamiz No. 200 que resulta ser muy elevado, excediendo el límite establecido por la normatividad internacional que rige esta propiedad.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para el asentamiento, días de fraguado, resistencia a la compresión y resistencia a la flexión de las muestras de concreto estudiadas.

Tabla 6. Resultados de ensayos físico-mecánicos para caracterización de concreto.

Fuente de material AF	Fuente de material AG	Relacion A/C	% VISCO CRETE	% PLASTI MENT AD-30	SLUMP (cm)	Días de fraguado	Resistencia compresion (Mpa)	Resistencia flexion (Mpa)	Incremento Resistencia compresion (Mpa)	Incremento Resistencia compresion (%)
AR1	A1 (Silíceo)	0,45	0,4%	0,0%	15,00	23,0	39,9	4,80		
AR1	A2 (Calizo)	0,45	0,6%	0,0%	8,50	21,0	43,7	5,10	3,76	9%
AR1	A1 (Silíceo)	0,45	0,4%	0,0%	7,5	17,0	38,9	5,3		
AR1	A2 (Calizo)	0,47	0,6%	0,4%	10,0	11,0	50,4	4,8	11,5	30%
AR1	A1 (Silíceo)	0,47	0,6%	0,0%	9,0	28,0	51,9			
AR1	A2 (Calizo)	0,47	0,6%	0,4%	0,0	40,0	64,8		12,9	25%
PROMEDIO DE GANANCIA EN RESISTENCIA DEL AGREGADO CALIZO										21%

Seguidamente, se presentan de manera grafica los resultados obtenidos para las resistencias a compresión y a flexión de las muestras de concreto con agregados silíceos y calizos estudiadas. De esta manera, se evidencia que la relación agua/cemento de 0.47 permite obtener valores de resistencia a compresión superiores a las obtenidas para relaciones de 0.45.

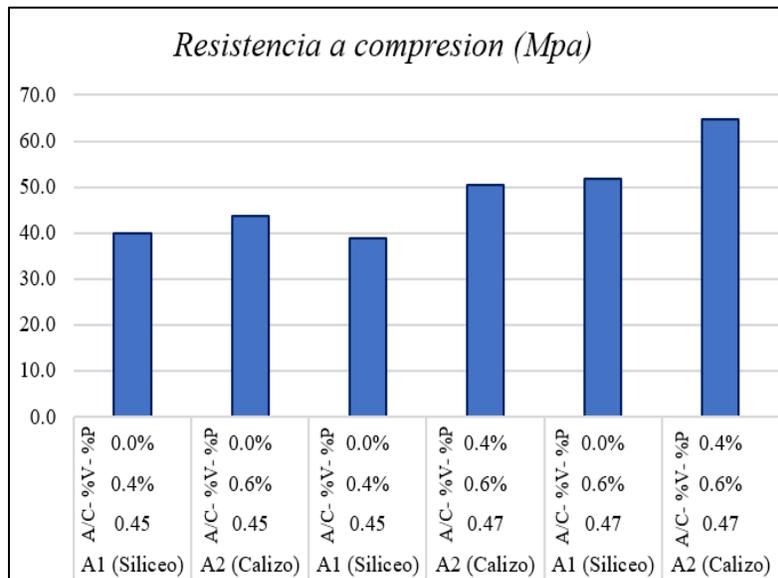


Figura 5. Resultados de ensayo de resistencia a compresión para concretos con agregados calizos y silíceos y distintas relaciones agua/cemento.

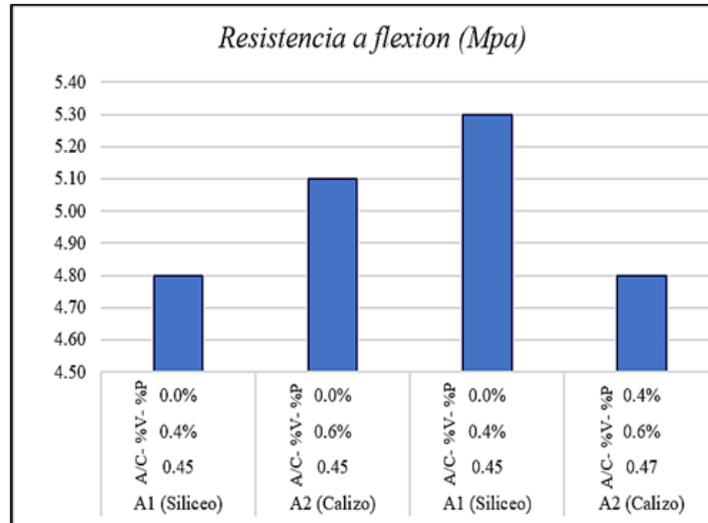


Figura 6. Resultados de ensayo de resistencia a flexión para concretos con agregados calizos y silíceos y distintas relaciones agua/cemento.

A partir de los ensayos realizados, es posible observar que la utilización de agregado calizo como agregado grueso en mezclas de concreto aumenta en aproximadamente un 21% la resistencia a la compresión en comparación a aquellos concretos en los que se utiliza agregados de tipo silíceo. En cuanto a los resultados de la resistencia a la flexión las diferencias no son significativas por tal motivo el comportamiento es similar para los dos tipos de agregados usados en el presente trabajo.

Tabla 7. Comparativos ensayos físico-mecánicos para caracterización de concreto

<i>Propiedad</i>	<i>Resultado</i>	<i>Tipo de agregado</i>	<i>Referencia</i>
<i>Resistencia a la compresión a/c = 0.45</i>	43.7 Mpa	Calizo	Propia
	39.9 Mpa	Silíceo	Propia
	38.9 Mpa	Silíceo	Propia
	35.4 Mpa	Calizo	[42]
	28.9 Mpa	Silíceo	[42]
	30.2 Mpa	Calizo	[43]

De esta manera, se evidencia que la resistencia a compresión del agregado calizo evaluado experimentalmente es superior a la de los agregados silíceos tanto en las fuentes propias como en la bibliografía referenciada. Debe anotarse que al analizar los resultados obtenidos por los autores de la fuente [42] se observa que la resistencia mecánica del agregado calizo es superior a la del silíceo en un 22,5%.

Una vez presentada la caracterización macroscópica de los agregados silicios y calizos en mención y del concreto compuesto de cada uno de estos materiales, se muestra a continuación la caracterización microscópica mediante microscopia SEM EDS y EDX de los agregados estudiados. Así, fue posible determinar mediante el análisis SEM EDX que el agregado silíceo estudiado está compuesto principalmente por sílice en un 33.9%, oxígeno en un 54.9% y carbono en un 8.6%, mientras que el agregado calizo se compone de oxígeno en 47.3%, 38% de calcio y 14.7% de carbono.

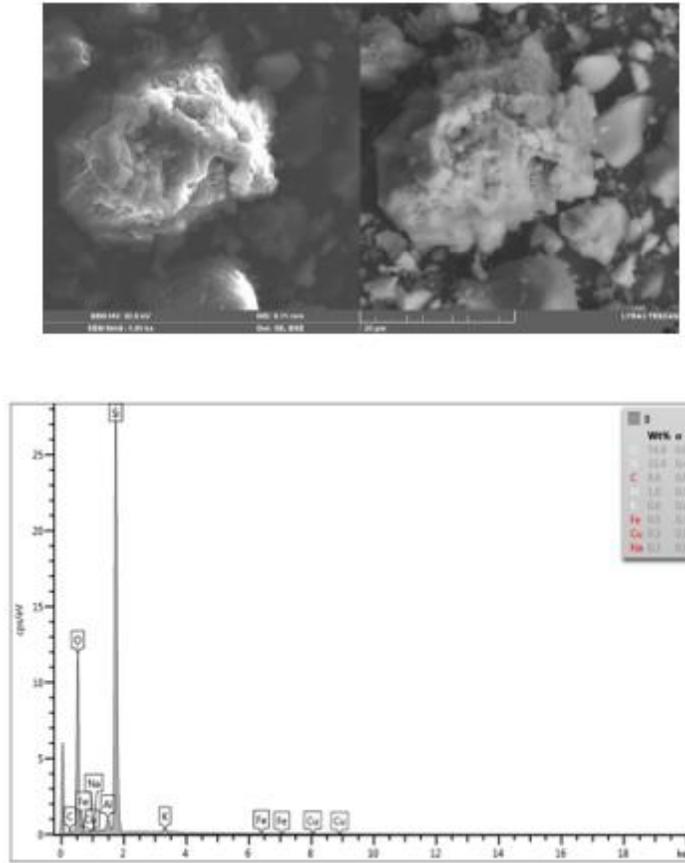


Figura 7. Microscopia SEM EDS y EDX para agregado silíceo A1

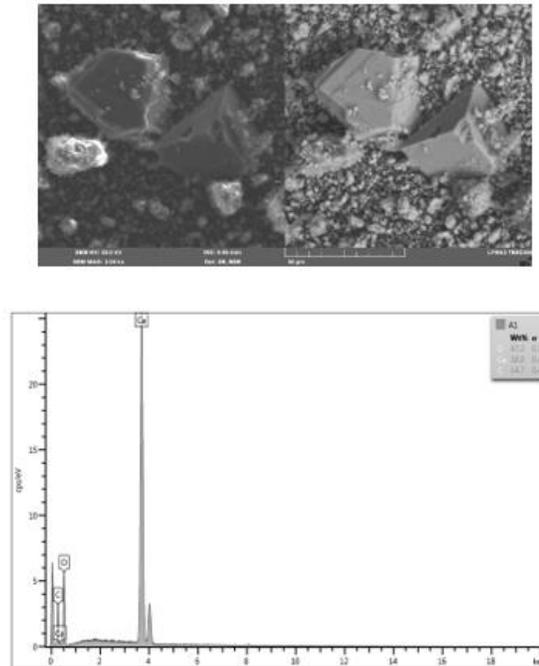


Figura 8. Microscopia SEM EDS y EDX para agregado calizo A2.

Mediante la caracterización realizada por microscopía SEM EDS, se ratifica lo sostenido con anterioridad a partir de los ensayos de resistencia mecánica, al observar el agrietamiento en el concreto con agregado silíceo A1 que deja en evidencia la incompatibilidad en la interfase por problemas de adherencia entre este tipo de áridos y la matriz cementicia, mientras que en al analizar la microscopía del concreto con agregado calizo A2, se evidencia una mayor uniformidad en el material compuesto.

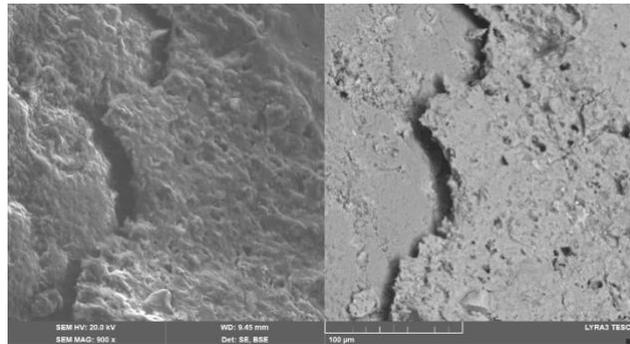


Figura 9. Microscopía SEM EDS concreto con agregado silíceo A1

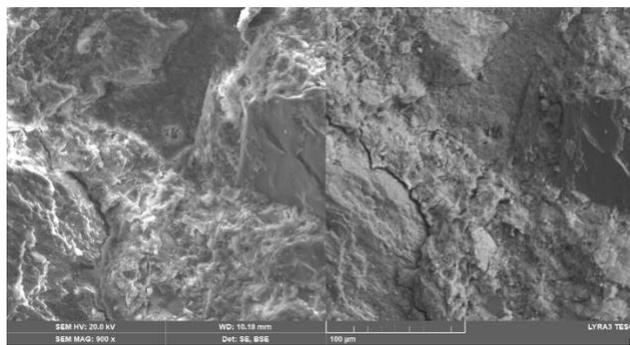


Figura 10. Microscopía SEM EDS Concreto con agregado calizo A2.

5. Conclusiones

A partir de la caracterización físico mecánica de los agregados gruesos de tipo calizo y silíceo, del agregado fino y de los ensayos de resistencia a la compresión y a la flexión de concretos compuestos por estos materiales, es posible concluir que el concreto elaborado con agregado de tipo calizo presenta una mayor resistencia a la compresión en comparación con el elaborado con agregado silíceo correspondiente a un canto rodado, debido a que el agregado calizo es menos denso, absorbe mayor humedad inicial y tiene mayor número de caras fracturadas, generando, superficie más rugosa y una mejor adherencia entre el agregado y la matriz cementicia. El agregado silíceo, por su origen, es un canto rodado redondeado, de tamaño pequeño en forma natural y con caras que aun después de fracturadas continúan lisas. De esta manera, con la utilización de agregado de tipo calizo en el concreto hidráulico se registra un aumento promedio en la resistencia a la compresión de 21%, mientras que los resultados mecánicos de las resistencias a la flexión no son significativos. Este comportamiento queda verificado al analizar la microscopía SEM EDS de los concretos compuestos por agregados silíceo A1 y calizo A2, evidenciando en el segundo mayor homogeneidad en el material compuesto debido a la mejor adherencia entre la matriz cementicia y el agregado. Adicional la trabajabilidad representada por el asentamiento (slump) en los concretos frescos es

mayor para los elaborados con agregados silíceos comparados con los calizos en un incremento aproximado de 76%, esto puede observarse en la tabla 7.

6. Referencias

- [1] R. Solís, E. Moreno, and E. Arjona, "Evaluación del concreto con bajas relaciones agua/cemento y agregados calizos de alta absorción," *Rev. Fac. Ing. UCV*, vol. 27, no. 4, 2012.
- [2] M. Orozco, Y. Avila, S. Restrepo, and A. Parody, "Factors influencing concrete quality: a survey to the principal actors of the concrete industry," *Revista Ingeniería de Construcción RIC*, vol. 33, no. 2, pp. 161–172, 2018.
- [3] E. Moreno, R. Solis, J. Varela, and M. Gomez, "Tensile strength of concrete with high absorption limestone aggregate," *Concreto y Cemento. Investigación y Desarrollo*, vol. 8, no. 1, pp. 35–45, 2016.
- [4] L. Diaz and J. Torres, "Análisis de diferentes dosis de aditivos superplastificantes en las propiedades mecánicas de una mezcla de concreto hidráulico con base a diferentes tamaños máximos nominales de agregado grueso tipo silíceo," Cartagena, 2020.
- [5] A. González, "Diagnostico de avances investigativos de fuentes de agregados pétreos en Colombia y Boyacá para obras civiles," Tunja, 2021.
- [6] W. P. Orozco-Centeno, J. W. Branch Bedoya, and J. A. Jiménez-Builes, "Classification of fine-grained igneous, sedimentary and metamorphic rocks through structured programming," *Boletín de Ciencias de la Tierra*, no. 36, pp. 5–9, Jul. 2014, Doi: 10.15446/rbct. n36.44037.
- [7] Y. Valdés-Mariño *et al.*, "Rocas vulcanógenas ultramáficas metamorizadas asociadas al complejo ofiolítico Moa-Baracoa en el sector Camarioca Sur Metamorphosed volcanic ultramafic rocks associated with the Moa-Baracoa ophiolite complex in the Camarioca Sur sector Empresa Moa Nickel."
- [8] M. Patricia León and F. Ramírez, "Caracterización morfológica de agregados para concreto mediante el análisis de imágenes" Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá. Universidad de Los Andes, Bogotá. Colombia, 2010. [Online]. Available: www.ing.puc.cl/ric
- [9] D. Ferreira and K. Torres, "Caracterización física de agregados pétreos para concretos casos: Vista Hermosa (Mosquera) y Mina Cemex (Apulo).," 2016.
- [10] A. Padilla Rodríguez and M. Básicos, "CAPÍTULO 2."
- [11] L. Rivero, D. Loria, and S. Kauil, "Caracterización de agregados calizos para la elaboración de concreto en Valladolid, Yucatan.," *Ava Cient*, vol. 4, no. 2, pp. 115–123, 2019.
- [12] J. Chan, R. Solís, and E. Moreno, "Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto," *Ingeniería*, vol. 7, no. 2, pp. 39–46, 2003.

- [13] M. A. da Silva, M. Pepe, R. G. M. de Andrade, M. S. Pfeil, and R. D. Toledo Filho, "Rheological and mechanical behavior of High Strength Steel Fiber-River Gravel Self Compacting Concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 150, pp. 606–618, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.06.030.
- [14] M. Arezoumandi, A. Smith, J. S. Volz, and K. H. Khayat, "An experimental study on flexural strength of reinforced concrete beams with 100% recycled concrete aggregate," *Engineering Structures*, vol. 88, pp. 154–162, Apr. 2015, doi: 10.1016/j.engstruct.2015.01.043.
- [15] D. Olguin, "Proceso de producción de Agregados Pétreos y su Control de Calidad," Ciudad de México, 2016.
- [16] A. Cerquera, C. Rodríguez, and D. Ruano, "Análisis mineralógico, químico y porosímetro de los agregados pétreos de una cantera perteneciente a la formación geológica de la sabana en el municipio de Soacha - Cundinamarca," Bogotá, 2017.
- [17] "NORMA TÉCNICA NTC COLOMBIANA 174."
- [18] J. Toirac, "Ciencia y Sociedad," *Ciencia y Sociedad*, vol. XXXVII, no. 3, pp. 293–334, 2012, [Online]. Available: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=87024622003>
- [19] A. Alzate, "Caracterización físico-mecánica de los agregados pétreos (materiales de arrastre y canteras) del municipio de Dosquebradas," Pereira, 2018.
- [20] "Agregados para concreto: Propiedades y clasificación," 2010.
- [21] J. Cañas, "Densidad, Densidad Relativa y Absorción del agregado fino," *Universidad Centroamericana*.
- [22] R. G. Solís Carcaño and M. Á. Alcocer Fraga, "Durabilidad del concreto con agregados de alta absorción," *Ingeniería Investigación y Tecnología*, vol. 20, no. 4, pp. 1–13, oct. 2019, doi: 10.22201/fi.25940732e.2019.20n4.039.
- [23] L. F. Jiménez and E. I. Moreno, "Durability Indicators in High Absorption Recycled Aggregate Concrete," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2015, 2015, doi: 10.1155/2015/505423.
- [24] "Determinación del límite plástico e índice de plasticidad," *Universidad Nacional de Ingeniería, Lima*, 2016.
- [25] M. Alcocer and R. Solís, "Concrete durability with high absorption aggregates", *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, Vol. 4, México, 2018.
- [26] J. Fonseca, "Resistencia a la abrasión superficial de un suelo no cohesivo estabilizado con cemento," Costa Rica, 2010.
- [27] S. Pyo, S. Y. Abate, and H. K. Kim, "Abrasion resistance of ultra-high performance concrete incorporating coarser aggregate," *Construction and Building Materials*, vol. 165, pp. 11–16, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.036.

- [28] D. P. Bentz *et al.*, "Multi-scale investigation of the performance of limestone in concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 75, pp. 1–10, Jan. 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.10.042.
- [29] D. Wang, C. Shi, N. Farzadnia, Z. Shi, and H. Jia, "A review on effects of limestone powder on the properties of concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 192, Elsevier Ltd, pp. 153–166, Dec. 20, 2018. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.119.
- [30] X. Chen, G. Wang, Q. Dong, X. Zhao, and Y. Wang, "Microscopic characterizations of pervious concrete using recycled Steel Slag Aggregate," *Journal of Cleaner Production*, vol. 254, May 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120149.
- [31] X. Chen, H. Wang, H. Najm, G. Venkateela, and J. Hencken, "Evaluating engineering properties and environmental impact of pervious concrete with fly ash and slag," *Journal of Cleaner Production*, vol. 237, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.117714.
- [32] X. Cai, H. Zhang, J. Zhang, X. Chen, J. Yang, and J. Hong, "Investigation on reinforcing mechanisms of semi-flexible pavement material through micromechanical model," *Construction and Building Materials*, vol. 198, pp. 732–741, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.243.
- [33] M. Khedmati, Y. R. Kim, J. A. Turner, H. Alanazi, and C. Nguyen, "An integrated microstructural-nanomechanical-chemical approach to examine material-specific characteristics of cementitious interphase regions," *Materials Characterization*, vol. 138, pp. 154–164, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.matchar.2018.01.045.
- [34] M. Tufail, K. Shahzada, B. Gencturk, and J. Wei, "Effect of Elevated Temperature on Mechanical Properties of Limestone, Quartzite and Granite Concrete," *International Journal of Concrete Structures and Materials*, vol. 11, no. 1, pp. 17–28, Mar. 2017, doi: 10.1007/s40069-016-0175-2.
- [35] P. Petrounias *et al.*, "Petrographic characteristics of sandstones as a basis to evaluate their suitability in construction and energy storage applications. A case study from Klepa Nafpaktias (Central Western Greece)," *Energies*, vol. 13, no. 5, Mar. 2020, doi: 10.3390/en13051119.
- [36] U. S. Jayawardena, "Laboratory studies of Miocene limestone in Sri Lanka," *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, vol. 50, no. 4, pp. 422–425, Nov. 2017, doi: 10.1144/qjgegh2016-106.
- [37] A. Seitllari, M. Lanotte, and M. E. Kutay, "Effect of aggregate selection and design gyrations on the performance of polymer and devulcanized rubber modified mixtures," *International Journal of Pavement Research and Technology*, vol. 14, no. 1, pp. 54–62, Jan. 2021, doi: 10.1007/s42947-020-0065-5.
- [38] M. R. P. E. Akhtari, A. A. Kordani, and M. Zarei, "Low-Temperature Fracture Toughness Study for Hot Mix Asphalt and Warm Mix Asphalt Under Pure Mode I and II Loading Condition," *International Journal of Pavement Research and Technology*, vol. 15, no. 2, pp. 320–332, Mar. 2022, doi: 10.1007/s42947-021-00024-2.
- [39] N. R. Ismail and Y. Abdulwahid, "Engineering Characterization of Local Limestone and Marlstone Aggregates in Koya Area as a Case Study," 2021.

- [40] A. Malik, A. K. Misra, M. Kalra, and V. Gayathri, "Variation in physico-mechanical characteristics of kota sandstone, under different environmental conditions," *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, vol. 9, no. 1, pp. 31–41, 2018, doi: 10.22712/susb.20180004.
- [41] W. O. Ajagbe, M. A. Tijani, I. S. Arohunfegbe, and M. T. Akinleye, "Assessment of fine aggregates from different sources in Ibadan and environs for concrete production," *Nigerian Journal of Technological Development*, vol. 15, no. 1, p. 7, Mar. 2018, doi: 10.4314/njtd.v15i1.2.
- [42] M. B. S. Sollero, A. L. Moreno Junior, and C. N. Costa, "Residual mechanical strength of concrete exposed to high temperatures – international standardization and influence of coarse aggregates," *Construction and Building Materials*, vol. 287, p. 122843, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122843.
- [43] N. Bheel, S. L. Meghwar, S. A. Abbasi, L. C. Marwari, J. A. Muger, and R. A. Abbasi, "Effect of Rice Husk Ash and Water-Cement Ratio on Strength of Concrete," *Civil Engineering Journal*, vol. 4, no. 10, p. 2373, Oct. 2018, doi: 10.28991/cej-03091166.