

Caracterización morfológica de agregados para concreto mediante el análisis de imágenes

Morphological characterization of concrete aggregates by means of image analysis

María Patricia León*¹, Fernando Ramírez**

* Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá. COLOMBIA

** Universidad de Los Andes, Bogotá. COLOMBIA

Fecha de recepción: 22/ 10/ 2009
Fecha de aceptación: 10/ 04/ 2010
PAG. 215 - 240

Resumen

La morfología de los agregados influye en las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido, sin embargo no se ha establecido una correlación entre parámetros de forma y características del concreto de manera que la incidencia de la forma sea tenida en cuenta en el diseño de la mezcla. La medición de la forma por los métodos tradicionales es subjetiva, por esta razón últimamente se han utilizado tecnologías de análisis de imágenes para determinar las características de forma de las partículas. En este estudio se determinaron las características morfológicas de diferentes agregados usando los métodos tradicionales y el de análisis de imágenes con los descriptores de Fourier, y se determinaron las propiedades mecánicas de concreto preparado con agregados de diferente forma con el fin de evaluar la influencia de esta en las propiedades del concreto fresco y endurecido. Los resultados indican que las propiedades mecánicas no se ven afectadas de manera importante por la forma de los agregados, sin embargo, influye significativamente en la trabajabilidad.

Palabras Clave: Concreto, morfología de agregados, análisis de imágenes, resistencia a la compresión, trabajabilidad

Abstract

Properties of fresh and hardened concrete are affected by the morphological characteristics of the aggregates. However, there is not an established correlation, between the aggregate shape and the concrete properties, to be taken into account during the mix design process. Conventional aggregate shape measurement methods are subjective, and that is why image analysis has been recently used to determine the morphological characteristics of particles. In this study, the morphological characteristics of coarse aggregates from two different sources are determined using both, conventional methods and image analysis by means of Fourier descriptors. Mechanical properties of concrete prepared with coarse aggregates having different elongation indexes were evaluated. Results indicate that the aggregate shape has little influence in the concrete compressive strength and elastic modulus, while its influence in workability is significant.

Keywords: Concrete, aggregates morphology, image analysis, compressive strength, workability

1. Introducción

Los agregados pétreos son componentes fundamentales del concreto hidráulico, del concreto asfáltico y de las bases granulares. Sus características afectan no solo las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido sino también el costo del mismo. Los agregados conforman entre el 70% y el 80% del volumen del concreto, razón por la cual es importante conocer sus propiedades y la influencia de las mismas en las propiedades del concreto para optimizar no solo su uso y explotación, sino también el diseño de mezclas de concreto.

1. Introduction

Stone aggregates are fundamental elements of hydraulic concrete, asphaltic concrete and granular bases. Their characteristics affect not only fresh and hardened concrete properties but also its cost. Aggregates occupy between 70% and 80% of concrete volume, that is why it becomes important to know the aggregate properties and their influence on concrete properties, in order to improve not only its use and exploitation but also the concrete mix design process.

¹ Autor de correspondencia / Corresponding author:
E-mail: mpleon@javeriana.edu.co



Las características de los agregados en cuanto a su forma, textura y gradación influyen en la trabajabilidad, en el acabado, en la exudación y en la segregación del concreto fresco y afectan la resistencia, la rigidez, la retracción, la densidad, la permeabilidad y durabilidad del concreto en estado sólido (Quiroga, 2003).

El componente más costoso del concreto es el cemento. La pasta de cemento (cemento y agua) es el elemento que llena los vacíos entre los agregados, provee la trabajabilidad del concreto en estado fresco y proporciona la adherencia o pega entre los agregados una vez el concreto se endurece. El porcentaje de vacíos de una mezcla de agregados está principalmente relacionado con su gradación, forma y textura (De Larrard, 1999). Los vacíos generados en mezclas de agregados con partículas aplanadas y alargadas generalmente son mayores que en mezclas con partículas redondeadas y por lo tanto la demanda de pasta de estas últimas para alcanzar una trabajabilidad dada y para obtener una adecuada pega entre agregados será menor. El uso de dosificaciones bajas de pasta (dentro de ciertos límites), además de la reducción en costos de producción, tiende a generar menos problemática relacionada con fisuración, calor de hidratación, y durabilidad. En las últimas décadas técnicas de análisis de imágenes han sido utilizadas para evaluar la forma y la textura de partículas. A partir de estas técnicas se han obtenido índices de forma, angularidad y textura que definen cuantitativamente estas propiedades. Los métodos de diseño de mezclas de concreto usados en la actualidad no consideran de una manera directa el efecto de la forma y de la textura de los agregados, por ejemplo en el caso del método de diseño del ACI 211.1 (1991) se tiene en cuenta parcialmente el efecto de la forma al involucrar el módulo de finura de las arenas y la masa unitaria compacta de los agregados, sin embargo este método no establece variaciones en la cantidad de agua debido a estos factores. Esta problemática sumada a las limitaciones con las que cuentan algunas ciudades en cuanto al suministro de agregados por fuentes de explotación insuficientes, el alto costo económico y el impacto ambiental generado por la explotación, hacen que sea necesario conocer de manera precisa las características de los agregados y la influencia de las mismas en las propiedades del concreto de tal manera que esta información sea considerada de manera explícita y racional en el proceso de diseño de mezclas de concreto.

Aggregate shape, texture and gradation characteristics affect the workability, finishing, bleeding and segregation of fresh concrete; and they also affect the strength, stiffness, retraction and permeability and durability of hardened concrete (Quiroga, 2003).

Cement is the most expensive component of concrete. Cement paste (cement and water) is the element filling the voids among aggregates, provides workability for fresh concrete and creates adhesion or bonding among aggregates once concrete is hardened. The percentage of voids in an aggregate mix is mainly related with its gradation, shape and texture (De Larrard, 1999). The voids resulting from aggregates mixes with flat and elongated particles are generally higher than those from rounded particles, therefore, there will be a lower demand of cement paste for rounded aggregates, in order to achieve a desired workability and to obtain an adequate bonding among aggregates. The use of low paste dosages (within certain limits) a part from reducing costs, tends to create less difficulties in relation to cracking, heat of hydration and durability. During recent decades, image analysis techniques have been used to assess the shapes and texture of particles. From those techniques and texture indexes have been obtained, which define such properties quantitatively. Design methods for concrete mixes, do not consider in a direct way the aggregate shape and textures, for instance in the case of the design method ACI 211.1 (1991) the shape effect is partially taken into account by involving the sand fineness modulus and aggregates compact unit mass, however, this method does not establish water amount variations due to such factors. This situation together with limitations in some cities as far as aggregate provision is concerned, because of insufficient exploitation sources, high economical cost and exploitation environmental impacts make really necessary accurately know the characteristics of aggregates and their influence on the concrete properties, in order to explicitly and rationally consider such information in the concrete mix design process.

El objetivo general de este estudio es la caracterización morfológica de los agregados usados para mezclas de concreto hidráulico y la estimación de su influencia en las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido. Este proyecto comprende la caracterización físico-mecánica de agregados triturados de diferentes fuentes usados en la producción de concretos en Bogotá, el registro e interpretación de imágenes digitales de los agregados de cada una de las fuentes seleccionadas para obtener sus características de forma, la caracterización del concreto en estado fresco (asentamiento), y la caracterización mecánica del concreto endurecido (módulo de elasticidad y resistencia a la compresión), para finalmente evaluar la influencia de las características morfológicas de los agregados en las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido.

2. Marco teórico

2.1 Efecto de la forma de los agregados en el concreto

Las características de los agregados tienen un efecto significativo en el comportamiento del concreto en estado fresco y endurecido. Las principales características de los agregados que afectan las propiedades del concreto son forma y textura, gradación, absorción, mineralogía, resistencia y módulo de elasticidad, tamaño máximo, gravedad específica, resistencia al ataque de sulfatos y dureza. En la medida en que se determine la influencia de cada una de estas propiedades en el comportamiento del concreto, será posible realizar diseños de mezclas más económicos.

Para lograr una mezcla de concreto óptima se requieren entre otras condiciones que la compacidad de la mezcla de agregados sea la máxima posible con una trabajabilidad adecuada de forma que se minimice la cantidad de pasta de cemento requerida para la pega de los agregados. Igualmente se requiere que sus componentes satisfagan características que permitan que la mezcla de concreto sea durable y cumpla con los requisitos de trabajabilidad y resistencia establecidos durante el diseño. La estimación de la compacidad de una mezcla granular es un problema fundamental para el manejo y conocimiento del concreto (Andersen y Johansen, 1991), y depende de 3 parámetros fundamentales: tamaño y distribución de los granos, forma de los granos (morfología y textura) y método de compactación de la mezcla de concreto.

The main purpose of this study is the morphological characterization of aggregates used in hydraulic concrete mixes and the assessment of their influence on fresh and hardened concrete properties. This project comprises a physical and mechanical characterization of crushed aggregates, from different sources, used for concrete production in Bogota; the registration and interpretation of aggregates digital images from each selected source to obtain their shape characteristics, characterization of fresh concrete (settlement); and the mechanical characterization of hardened concrete (modulus of elasticity and compressive strength), to evaluate the influence of the aggregates morphology on the fresh and hardened concrete properties under.

2 Theoretical framework

2.1 Aggregate shape effect on concrete

Aggregate characteristics have a major effect on fresh and hardened concrete behavior. The main aggregates characteristics affecting the concrete properties are shape and texture; gradation; absorption; mineralogy; compressive strength and elasticity modulus; maximum size; specific gravity; sulfates attack resistance and hardness. Once the influence of each individual property is determined on concrete behavior, it shall be possible to design more cost effective mixes.

In order to achieve an optimal concrete mix some conditions are required, among others that concrete aggregate mixture compactness is the maximum possible, with a proper workability in order to minimize the amount of cement paste required for aggregate bonding. Likewise, concrete components are required to meet durability, workability, and strength specifications. The compactness assessment of a granular mix is a major problem for the handling and knowledge of concrete (Andersen y Johansen, 1991), and it depends on three fundamental parameters: aggregate size and gradation, shape (morphology and texture) and compaction method of the concrete mix.



A mayor contenido de vacíos el concreto requiere más pasta de cemento. Se ha encontrado que el requerimiento de pasta de cemento se reduce alrededor de 4% a 5% cuando se utiliza agregado cúbico en vez de agregado alargado y aplanado (Hudson, 1998). Así mismo, como la forma de las partículas afecta la compacidad de la mezcla de agregado, esta tiene una alta incidencia en la demanda de pasta de cemento y por lo tanto en los costos del concreto, y afecta también la trabajabilidad y las propiedades mecánicas concreto. La forma y textura de los agregados afectan la masa unitaria compacta y por lo tanto juegan un papel importante en el desempeño del mortero y del concreto en estado fresco y puede afectar indirectamente su resistencia al afectar la colocación y compactación del concreto.

2.1.1 Efecto de la forma de los agregados en las propiedades del concreto fresco

La forma de las partículas afecta la trabajabilidad y colocación del concreto en estado fresco. El requerimiento de pasta de cemento de la mezcla de concreto está asociado a la superficie específica de los agregados. Las partículas con una superficie específica menor como las de forma cúbica o redondeada requieren menos pasta de cemento para alcanzar la misma trabajabilidad que una mezcla de concreto producida con agregados de mayor superficie específica como aquellos que contienen partículas elongadas y aplanadas (Shilstone, 1999). Adicionalmente, las partículas aplanadas, alargadas, angulares y rugosas al acomodarse tienen un alto contenido de vacíos, que hacen que la mezcla requiera de más arena para proporcionar un concreto manejable. Cuando esto sucede, la finura de la mezcla de agregados es mayor, es decir que tiene una superficie específica mayor, y por ende el requerimiento de pasta incrementa (Legg, 1998). Además de tener un efecto directo sobre la trabajabilidad de la mezcla, las partículas aplanadas, alargadas, angulares y rugosas producen mezclas que dificultan el acabado superficial del concreto, así como su compactación. Aunque la textura superficial afecta la trabajabilidad, su influencia no es tan representativa como la que tiene la gradación y la forma de los agregados (Galloway, 1994). La demanda de agua en una mezcla de concreto también está influenciada por la forma y textura de los agregados. Una demanda mayor de agua para obtener una trabajabilidad dada, reduce la resistencia y aumenta la exudación del concreto.

The higher voids content the higher amount of cement paste required. It has been found that the requirement of cement paste is reduced from 4% to 5% when a cubic aggregate is used instead of elongated and flat aggregates (Hudson, 1998). Similarly, as the shape of particles affect the aggregate mix compactness, it has a high incidence on the demand for cement paste, and therefore on concrete costs, also affecting workability and the mechanical properties of concrete. Aggregate shape and texture affect the compact unit mass, and therefore play an important role for mortar performance and fresh concrete and it may indirectly affect its strength by affecting concrete pouring and compaction.

2.1.1 Aggregates shape effect on fresh concrete properties

Particles shape affect workability and pouring of fresh concrete. The required amount of cement paste in the concrete mix is associated with the specific surface area of the aggregates. The particles having a lower specific surface area, such as cubic or rounded particles, require a lower amount of cement paste in order to achieve the same workability than a concrete mix made with higher specific surface area aggregates, such as those containing elongated and flat particles (Shilstone, 1999). In addition, flat, elongated, angular and rough particles resulting a high voids when arranging themselves, thus demanding more sand into the mix to deliver concrete workability. When this happens, the fineness of the aggregate mix is higher, i.e., it has a higher specific surface area, and therefore, paste demand increases (Legg, 1998). Apart from having a direct effect on the mix workability, flat, elongated, angular and rough particles produce mixes that make the concrete surface finishing and compactness difficult. Although surface texture affects workability, its influence is not that much representative as gradation and aggregate shapes (Galloway, 1994). Water demand into the mix is also influenced by the aggregates shape and texture. A higher demand of water to obtain a given workability reduces strength and increases concrete bleeding.

2.1.2 Efecto de la forma de los agregados en las propiedades del concreto endurecido

La forma y la textura de los agregados además de afectar significativamente la trabajabilidad del concreto en estado fresco, tienen un efecto en la resistencia y la durabilidad de concreto endurecido. La textura afecta la adherencia entre las partículas gruesas y la matriz de mortero reflejándose en la variación de la resistencia. Las partículas rugosas tienden a generar mayores resistencias que las partículas lisas (Kaplan, 1959), especialmente la resistencia a la flexión (Galloway, 1994). Sin embargo, las partículas rugosas incrementan la demanda de agua para una trabajabilidad dada reduciendo de esta forma la resistencia y la durabilidad.

La durabilidad está asociada a un contenido bajo de agua, por esta razón los agregados angulares, aplanados y alargados afectan negativamente la durabilidad del concreto ya que incrementan la demanda de agua. En el caso de concretos usados en pavimentos, las partículas aplanadas ubicadas cerca de la superficie impiden la exudación de agua del mortero ubicado bajo la partícula, causando deterioro de la superficie y por lo tanto disminución de la durabilidad del mismo (Kosmatka, 1994).

Alexander (1996) estableció que la forma y la textura de los agregados tienen un efecto directo en la resistencia influenciando las concentraciones de esfuerzo en el material compuesto y el grado de microfisuras y fisuras antes y después de la falla. Mehta y Monteiro (1993) encontraron además que la forma y la textura de los agregados afectan la forma de la curva esfuerzo – deformación del concreto ya que la morfología de los agregados influencia la generación de microfisuras en la zona de transición. La influencia de la forma de los agregados en la resistencia del concreto es controversial. A pesar de que se ha observado que concretos fabricados con agregados con diferentes formas y un contenido de cemento dado pueden alcanzar niveles de resistencia similares, algunos autores aseguran que los concretos producidos con agregados de forma redondeada y cúbica tienden a producir mayores resistencias que agregados alargados y aplanados (Shilstone, 1990).

Por lo expuesto anteriormente, existen diferentes especificaciones que limitan el contenido de partículas alargadas o aplanadas en agregados usados en la producción de concreto. Por ejemplo las normativas españolas del concreto especifican que el porcentaje en peso de partículas aplanadas debe ser menor al 35% del peso total del concreto. La norma británica estipula que este porcentaje debe ser menor a 40 %.

2.1.2 Aggregate shape effect on hardened concrete properties

Aggregates shape and texture, apart from affecting significantly fresh concrete workability, have an effect on strength and durability of hardened concrete. Texture affects adhesion between the coarse particles and the mortar matrix thus reflecting a strength variation. Rough particles tend to create higher strengths than smooth particles (Kaplan, 1959), specially flexural strength (Galloway, 1994). However, rough particles increase water demand for a given workability, thus reducing strength and durability.

Durability is associated with a low content of water, so angular, flat and elongated aggregates negatively affect concrete durability since they increase water demand. In the case of concrete pavements, flat particles located near the surface preventing bleeding of mortar water located under the particle, causing damage on the surface and consequently a decrease of pavement duration (Kosmatka, 1994).

Alexander (1996) stated that aggregates shape and texture have a direct effect on strength influencing the strength concentrations on the composite material and the micro cracks and cracks before and after the failure. Mehta and Monteiro (1993) found that, aggregates shape and texture also affect the shape of the concrete stress-strain curve, since aggregates morphology influences the appearance of micro cracks in the transition zone. The influence of aggregates shape on concrete strength is controversial. Although, it has been observed that concretes manufactured with aggregates of different shapes and with a given cement content, can reach similar strengths, some authors ensure that concrete manufactured with rounded and cubic shape aggregates tend to produce higher strengths than those with elongated and flat shapes (Shilstone, 1990).

In accordance with previous statements, there are different specifications limiting the content of elongated or flat particles aggregates used for concrete production. For example concrete specifications in Spain specify that the weight percentage of flat particles must be less than 35% of the total concrete weight. British regulation states that this percentage must be less than 40%.



Las especificaciones del Instituto de Desarrollo Urbano de Bogotá establecen que el porcentaje máximo de partículas alargadas y aplanadas debe ser del 15% al 20% dependiendo del tipo de tráfico.

Specifications by the Instituto de Desarrollo Urbano de Bogota indicate that the maximum percentage of elongated and flat particles must be from 15% to 20% depending on the kind of traffic.

2.2 Análisis de forma de partículas

La forma, la angularidad o redondez, y la textura superficial son tres conceptos relacionados con el análisis morfológico que representan las variaciones geométricas espaciales en diferentes escalas dimensionales (Figura 1). La forma representa la variación espacial en la escala de dimensión grande, la angularidad o redondez representa la variación en la escala de dimensión media, y la textura superficial representa la variación en la dimensión pequeña (Barret, 1980).

2.2 Particles shapes analysis

Shape, angularity or roundness, and surface texture are three concepts related with the morphological analysis that represent space geometrical variations at different dimension scales (Figure 1). Shape represents space variation at a large dimension scale; angularity or roundness represents variation at a medium dimension scale; and surface texture represent variation at a low dimension scale (Barret, 1980).

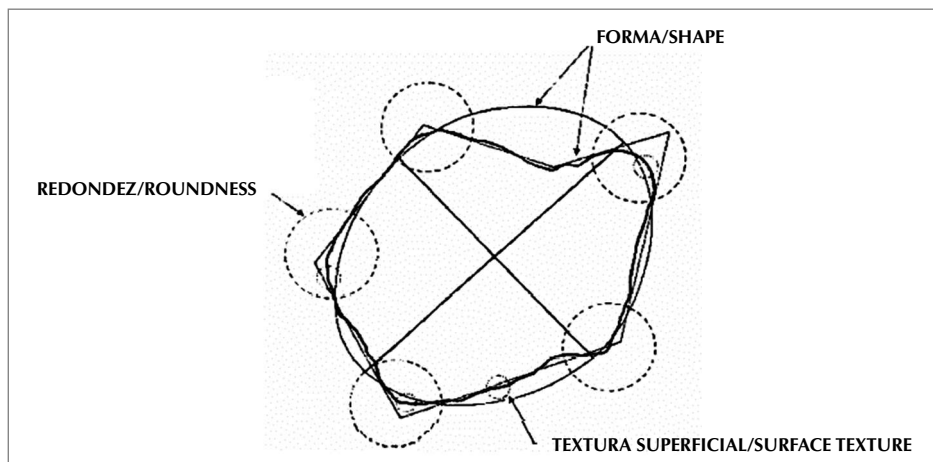


Figura 1. Terminología de forma de la partícula (Barret, 1980)
 Figure 1. Shape terminology on particles (Barret, 1980)

Las mediciones de la forma de los agregados para el concreto, han sido ampliamente realizadas por medio de métodos manuales con el uso de calibradores de alargamiento y aplanamiento. Esas medidas no sólo son demoradas, sino que también son altamente subjetivas. Debido a su ineficiencia y costo, estas mediciones tienden a no ser suficientemente representativas para obtener un resultado estadísticamente válido (Maerz y Zhou, 1999). Existen tecnologías como el procesamiento de imágenes que podrían incrementar la exactitud y la eficiencia de estas mediciones, las cuales están siendo actualmente desarrolladas para medir la forma de los agregados de manera que puedan ser implementadas para su uso común.

Shape measurements on concrete aggregates have been widely conducted by means of manual methods employing elongation and flatness gauges. Such measurements are not only time consuming, but also highly subjective. Because of their inefficiency and cost, such measurements tend not to be representative enough to achieve a statistically valid result (Maerz y Zhou, 1999). Then an technologies such as image processing that may increase the accuracy and efficiency of such measurements, which are now being developed to measure aggregates shape, so that they can be implemented for common use.

2.2.1 Métodos de medición manual

Índice de aplanamiento y alargamiento de agregados

El índice de aplanamiento de una fracción de agregado, se calcula como el porcentaje en peso de las partículas que la conforman cuya dimensión mínima es inferior a un valor dado de la dimensión media de la fracción. El índice de alargamiento de una fracción de agregado, se obtiene del porcentaje en peso de las partículas que la conforman cuya dimensión máxima (longitud) es superior a un valor dado de la dimensión media de la fracción. Por ejemplo la norma del Instituto Nacional de Vías de Colombia INV E-230 (1998), define como índice de aplanamiento de una fracción de agregado, el porcentaje en peso de las partículas que la forman cuya dimensión mínima (espesor) es inferior a 3/5 de la dimensión media de la fracción y se define como índice de alargamiento de una fracción de agregado, el porcentaje en peso de las partículas que la forman cuya dimensión máxima (longitud) es superior a 9/5 de la dimensión media de la fracción.

Contenido de vacíos de agregado fino en estado suelto

Este método describe la determinación del contenido de vacíos de una muestra de agregado en estado suelto. Al comparar el valor del contenido de vacíos de diferentes agregados con la misma gradación puede obtenerse un indicador de la angularidad, esfericidad y textura superficial de las partículas.

Índice de forma y textura de agregados

Con este método de ensayo se puede obtener un valor relativo de la forma y textura de los agregados. Este procedimiento ha sido usado para indicar los efectos de estas características en la compactación y la resistencia de mezclas de concreto. El ensayo consiste en obtener el porcentaje de vacíos de cada fracción del material con diferente grado de compactación, para después calcular el índice de forma del agregado. El valor de índice de la partícula se obtiene como:

$$I_a = 1.25V_{10} - 0.25V_{50} - 32.0 \quad (1)$$

Donde, I_a es el valor de índice de la partícula, y V_{10} y V_{50} son el porcentaje de vacíos en cada fracción del material compactadas con 10 y 50 golpes por capa respectivamente.

2.2.1 Manual measurement method

Aggregate flatness and elongation index

The flatness index of an aggregate is calculated as the weight percentage of having its fraction particles, the minimum dimension smaller than a given of the average aggregate dimension. The elongation index of an aggregate is obtained from particles weight percentage having its maximum dimension (length) higher than a given fraction of the average dimensioned. For example the regulation by the Instituto Nacional de Vías de Colombia INV E-230 (1998) defines the flatness index of an aggregate as the percentage of weight of particles, for which minimum dimension (thickness) smaller aggregate than 3/5 of the average dimension; the elongation index of an aggregate is defined as the percentage of weight of particles, for which maximum dimension (length) is higher than 9/5 of the average aggregate dimension.

Fine aggregate voids content in loose condition

This method describes the voids content determination of an aggregate sample in loose condition. By comparing the voids content of different aggregates having the same gradation, and indication of particle are for angularity, roundness and texture can be obtained.

Aggregates shape and texture index

By employing this test method a relative value can be obtained for aggregates shape and texture. This procedure has been used to estimate the effects of such characteristics on the compactness and strength of concrete mixes. The test consists in obtaining the voids content percentage for each material sample with degrees of compaction different, then calculating the aggregate shape index. The index value of a particle is obtained as follows:

Where I_a is the index value of a particle, and V_{10} and V_{50} are voids content percentages of each sample of compacted material after 10 and 50 strokes per layer, respectively.



2.2.2 Métodos de medición de la forma por medio de análisis de imágenes

El procesamiento y análisis de imágenes digitales ha venido siendo utilizado desde 1960. Con el desarrollo de tecnologías de computadores, la aplicación de técnicas de análisis digital se ha diversificado a diferentes áreas. En la ingeniería civil, se han implementado técnicas de captura y análisis de imágenes en la detección y análisis de esfuerzos de tensión, establecimiento de condiciones estructurales, transporte de sedimentos en corrientes, transporte de contaminantes en medios porosos, deformaciones de suelos, granulometrías, análisis de forma de partículas, y en la reconstrucción y simulación de estructuras granulares. Se han realizado varios intentos para caracterizar la forma de las partículas mediante el análisis de imágenes. Algunos métodos se han concentrado en medir la forma en general mientras otros han comparado la angularidad con la redondez y también la textura entre diferentes formas (Barret, 1980). Históricamente la medición de la forma de las partículas en la mecánica de suelos se ha realizado mediante cartas normalizadas contra las cuales se compara cada partícula individualmente. En la última década se han usado técnicas avanzadas de imágenes como tomografías de rayos X y resonancia magnética para el estudio de las estructuras de materiales granulares.

La caracterización de forma de los agregados y su influencia en las propiedades del concreto fresco y endurecido son el principal objetivo de esta investigación. Es por esto que el análisis de imágenes se realiza usando el método de Descriptores de Fourier el cual representa la forma de las partículas de manera adecuada.

Análisis de Fourier

El método de Fourier ($R(\theta)$) ha sido usado para la determinación de algunos parámetros relacionados con la forma de la partícula. En la teoría general del análisis morfológico de Fourier el perfil o contorno de una partícula (Figura 2) se representa mediante la Ecuación 2 en términos de series de Fourier (Bowman, E. et al., 2000).

$$R(\theta) = a_0 + \sum_{m=1}^{\infty} (a_m \cos n\theta + b_m \sin n\theta) \quad (2)$$

Siendo a_0 el radio promedio de la partícula, los términos $(a_m \cos n\theta + b_m \sin n\theta)$ describen las características de un perfil de partícula específico, donde a_m y b_m representan magnitudes y m representa la frecuencia, y $R(\theta)$ es el radio de la partícula para un ángulo θ . La forma de la partícula se describe mediante los siguientes tres parámetros:

2.2.2 Measurement methods of shape by means of image analysis

Digital image analysis and processing has been employed since 1960s. After the development of computer technologies, the application of digital analysis techniques has been diversified to different areas. In civil engineering, images analysis techniques have been implemented for detection and assessment of tensile stress, establishment of structural conditions, sediments transportation in stream flows, pollutants transportation through porous media, soil deformation, granulometry, and particles shape analysis; and for granular media reconstruction and simulation. Several attempts have been made to characterize particles shape by using image analysis. Some methods have been centered in measuring the shape in general, while others have compared angularity to roundness, and also texture among different shapes (Barret, 1980). Historically, particles shape measurement in soil mechanics has been developed by means of standard charts, useful to compare each particle individually. In the past decade advanced image techniques have been used, such as x-rays scanning and magnetic resonance imaging for the study of structures of granular materials.

Aggregates shape characterization and the influence on the properties of fresh and hardened concrete are the main purpose of this research. Therefore images analysis is conducted by using the Fourier descriptor method, which represents particle shapes properly.

Fourier analysis

Fourier method ($R(\theta)$) has been employed to determine some parameters related with the particle shape. In the general theory of Fourier morphological analysis the boundary or contour of a particle (Figure 2) is represented by equation 2, in terms of Fourier series (Bowman, E. et al., 2000).

Being a_0 the average radius of a particle; terms $(a_m \cos n\theta + b_m \sin n\theta)$ describe the characteristics of a specific particle boundary, where a_m and b_m represent magnitudes and m represents frequency; and $R(\theta)$ is the particle radius for angle θ . A θ particle shape is described by means of the following three parameters:

$$\text{Forma/Shape} = \sum_{m=1}^{m=n1} A_m \quad (3)$$

$$\text{Angularidad/Angularity} = \sum_{m=n1+1}^{m=n2} A_m \quad (4)$$

$$\text{Textura/Texture} = \sum_{m=n2+1}^{m=n3} A_m \quad (5)$$

Donde $A_m^2 = a_m^2 + b_m^2$ y $n1, n2$, y $n3$ son frecuencias límites que separan forma, angularidad, y textura respectivamente. Wang et al. (2005) reportaron para partículas con diámetro promedio de 25 mm el rango de frecuencias hasta $m=4$ definen forma, para m entre 5 y 25 definen angularidad, y para $m>25$ definen textura.

Where $A_m^2 = a_m^2 + b_m^2$ and $n1, n2$, and $n3$ are limit frequencies that separate shape, angularity and texture, respectively. Wang et al. (2005) reported that for 25 mm diameter particles, frequency ranking up to $m=4$ define shape; m between 5 and 25 define angularity and $m>25$ define texture.

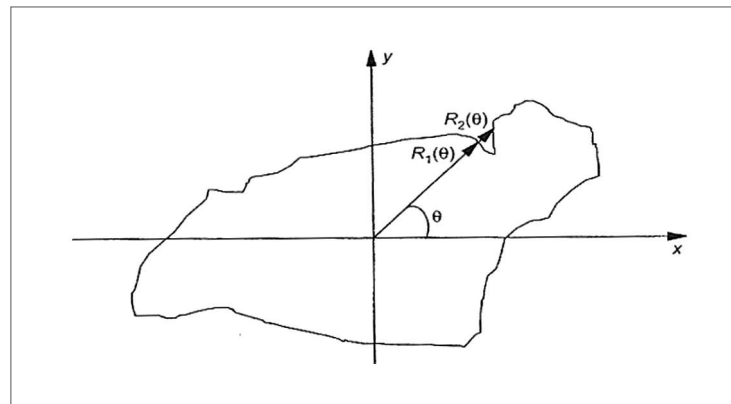


Figura 2. Partícula con dos posibles valores de radio para un mismo ángulo
 Figure 2. Particle with two possible radius values for a single θ

Una limitante que se presenta en este método son las concavidades que pueden presentarse en el contorno de una partícula y que proporcionan para un mismo ángulo dos posibles valores de $R(\theta)$ tal como se observa en la Figura 2. Clark (1981), encontró que podía usarse el método de los descriptores de Fourier para realizar un análisis cuantitativo de la forma de partículas. En este método, el contorno de la partícula es recorrido en el plano complejo a velocidad constante. Se escoge una longitud de paso de tal manera que se obtenga un recorrido completo del contorno de la partícula en un tiempo 2π con un número de pasos 2^k . La función compleja obtenida es la mostrada en la Ecuación 6.

A restriction exhibited by this method are concavities that may be present on the particle boundary, which provide two possible $R(\theta)$ values for a single angle, as depicted on Figure 2. Clark (1981) found that the Fourier descriptors method could be used to conduct a quantitative analysis of particles shapes. In this method, the boundary of the particle is run at constant speed in the complex plane. The step length is chosen in order to achieve the complete particle boundary path in time 2π with 2^k number of steps. The complex function obtained is shown in Equation 6.

$$x_m + iy_m = \sum_{n=N/2+1}^{+N/2} (a_n + ib_n) \left[\cos\left(\frac{2\pi nm}{M}\right) + i \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi nm}{M}\right) \right] \quad (6)$$

Donde x y y son las coordenadas del contorno de la partícula, N es el número total de descriptores, M es el número total de puntos que describen la partícula, n es el número del descriptor, m es el número índice de un punto de la partícula, a y b son los coeficientes para cada descriptor, i es el número imaginario. El índice de forma es calculado como la raíz cuadrada de las suma de los cuadrados de los coeficientes a y b .

El número total de puntos seleccionados para definir el perfil determina el número de descriptores que se pueden obtener del análisis de Fourier. La naturaleza compleja de la ecuación (6) implica que los descriptores de orden bajo ($n=+1$ a $+4$ y $n=-1$ a -4) pueden describir la morfología general de la partícula y normalmente tienen coeficientes mayores de acuerdo a la característica descrita. Los valores de los descriptores decaen normalmente hacia los descriptores $+64$ y -63 (Bowman et al., 2001). Por esta razón en la bibliografía encontrada se seleccionan 128 puntos para realizar el análisis de Fourier. En general se ha encontrado que los primeros 15 descriptores son usualmente suficientes para describir la forma a nivel general (Sonka et al., 1993). En el caso de arenas se ha encontrado que tres términos son suficientes para cuantificar la morfología aproximada de la partícula.

Los descriptores $n=0,-1,-2$ y -3 están relacionados con la forma del material y proporcionan características del radio, la elongación, lo triangular y lo cuadrangular de las partículas, mientras que el descriptor $n=+1$ proporciona una medida de la asimetría, y los descriptores $n=+2$ y $+3$ son descriptores de segundo orden de la elongación y de lo triangular de la partícula. Estos descriptores de segundo orden proporcionan información adicional relacionada con la redondez de las esquinas de la partícula y no acerca de la forma de la misma, por ejemplo un descriptor $+3$ alto indicaría una partícula triangular con vértices redondeados (Figura 3). Los descriptores 5 a 25 reflejan la naturaleza angular de la partícula y los mayores a 25 están relacionados con la textura superficial (Wang, et al., 2005). Los descriptores típicos de una partícula son presentados en la Figura 3.

Where x and y are the particle boundary coordinates, N is the total number of descriptors, M is the total number of points describing the particle, n is the descriptor number, m is the index number of a point in the particle, a and b are the coefficients for each descriptor, and i is the imaginary number. The shape index is calculated as the squared root of square additions of coefficients a and b .

The total number of points selected to define the boundary, determines the number of descriptors obtainable from Fourier analysis. The complex nature of equation (6) means that the low order descriptors ($n=+1$ a $+4$ and $n=-1$ a -4) describe the general morphology of a particle and normally have higher coefficients according to described characteristic. Descriptor values normally decrease towards descriptors $+64$ and -63 (Bowman et al., 2001). For this reason revised bibliography recommends 128 points to conduct the Fourier analysis. It has been found that the first 15 descriptors are usually enough to describe the particle shape at a general level (Sonka et al., 1993). In the case of sands, three terms have been found to be enough to quantify the approximate morphology of the particle.

Descriptors $n=0,-1,-2$ and -3 are related with material shape and provide radius, elongation, triangular and quadrangular characteristics, while descriptor $n=+1$ provides an asymmetry measure; and $n=+2$ and $+3$ are second descriptors order for elongation and triangularity. Such second order descriptors provide additional information related with roundness at the particle corner edge, but not about the shape of the particle, e.g., a high $+3$ descriptor would indicate a triangular particle with rounded vertexes (Figure 3). Descriptors 5 to 25 reflect the angular nature of a particle, and those higher than 25 are related with surface texture (Wang, et al., 2005). Typical descriptors of a particle are shown Figure 3.

3 Metodología

3.1 Materiales

Las fuentes de material seleccionadas para este estudio son de dos procedencias: Guasca y Tunjuelo. En ambos casos el material es triturado, proceso que influencia la morfología de las partículas. Estas fuentes fueron seleccionadas por ser las más usadas en la producción de concreto en Bogotá. Las características físicas de estos materiales fueron determinadas en el laboratorio y se presentan en la Tabla 1. En las Figuras 4 y 5 se muestran las gradaciones de los agregados gruesos y la Figura 6 corresponde a la gradación del agregado fino. Las líneas punteadas que aparecen en estas figuras indican los límites dados por las especificaciones de la ASTM C-33 para agregados utilizados en la producción de concretos.

3 Methodology

3.1 Materials

The sources of selected material in this study come from two locations: Guasca and Tunjuelo. In both cases material is crushed, such process affects the morphology of the particles. These sources were selected because they are the most common used by concrete producers in Bogota. Physical characteristics of these materials were determined at the laboratory and they are shown in Table 1. Figures 4 and 5 indicate coarse aggregates gradation and Figure 6 represent fine aggregate gradation. Dotted lines on these figures represent given limits by ASTM C-33 specifications for aggregates used in concrete production.

Forma/Shape	Descriptor	Coefficiente/Coefficient	Forma/Shape	Descriptor	Coefficiente/Coefficient
	0	0,0000		0	0,2607
	-1	0,0000		-1	0,0000
	+1	0,0000		+1	0,0000
	-2	0,0000		-2	0,0000
	+2	0,0000		+2	0,0749
	-3	0,0000		-3	0,0137
	+3	0,0000		+3	0,0000
	0	0,2680		0	0,0000
	-1	0,0000		-1	0,0000
	+1	0,0000		+1	0,0000
	-2	0,0000		-2	0,0000
	+2	0,0814		+2	0,0000
	-3	0,0814		-3	0,1113
	+3	0,0000		+3	0,0000
	0	0,0001		0	0,2314
	-1	0,0001		-1	0,0346
	+1	0,0001		+1	0,2286
	-2	0,2500		-2	0,0467
	+2	0,0001		+2	0,0281
	-3	0,0001		-3	0,0496
	+3	0,0625		+3	0,0000
	0	0,0043		0	0,0000
	-1	0,0015		-1	0,0000
	+1	0,1748		+1	0,0000
	-2	0,0019		-2	0,0000
	+2	0,0035		+2	0,0642
	-3	0,0068		-3	0,0000
	+3	0,0068		+3	0,0000
	0	0,0483		0	0,0214
	-1	0,0490		-1	0,0799
	+1	0,2170		+1	0,0279
	-2	0,0268		-2	0,0142
	+2	0,0655		+2	0,0816
	-3	0,0692		-3	0,0285
	+3	0,0692		+3	0,0285

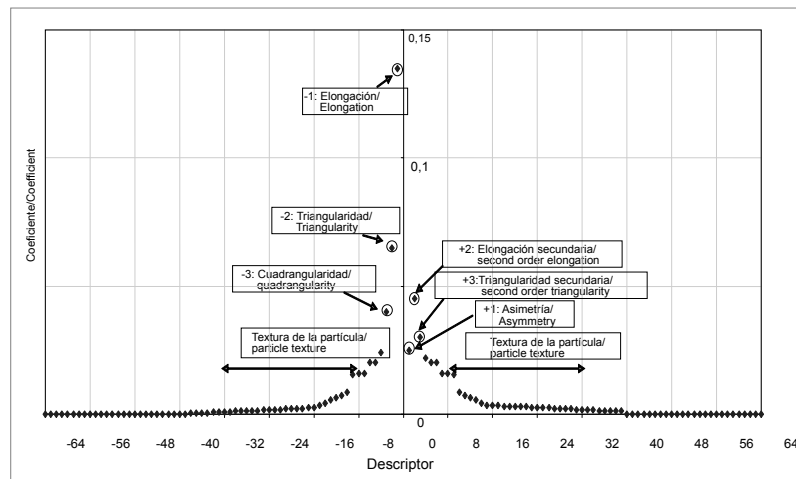


Figura 3. Descriptores de Fourier típicos de una partícula. a. Forma general de partículas de acuerdo a la descripción morfológica usando descriptores de Fourier. b. Magnitud de los descriptores para una partícula típica. (Bowman et al., 2001)

Figure 3. Typical Fourier descriptors of a particle. a) General shape of particles according to morphologic description using Fourier descriptors. b) Magnitude of descriptors for a typical particle (Bowman et al., 2001)

Tabla 1. Agregados y características físicas
Table 1. Aggregates and their physical characteristics

Ensayo/Trial	Grava Tunjuelo	Grava Guasca	Arena Tunjuelo
Peso específico aparente (g/cm ³)/Bulk density (g/cm ³)	2.620	2.372	2.564
Absorción (%)/Absorption (%)	2.10	3.80	1.28
Desgaste – Máquina de los ángeles (%)/Resistance to degradation– Los Angeles machine (%)	28.9	38.3	--
Masa Unitaria Compacta MUC (Kg/m ³)/Compact Unit Mass CMU (Kg/m ³)	1515	1496	1787
Masa Unitaria Suelta MUS (Kg/m ³)/Loose Unit Mass (Kg/m ³)	1387	1350	1575
Módulo de Finura/Fineness Modulus	--	--	3.3
Equivalente de arena/Sand equivalent	--	--	66.6

Dado que el objetivo del estudio es determinar la influencia de la forma en las propiedades del concreto, el principal obstáculo que se presenta es encontrar materiales con formas diferentes pero con propiedades físico-mecánicas similares. Para resolver este inconveniente, se manipula únicamente el agregado grueso de una de las fuentes seleccionadas, separándolo a través de las galgas de alargamiento. De esta forma se obtienen dos materiales con diferente forma pero con las mismas características físico-mecánicas: uno con 100% de partículas alargadas y otro con 0% de partículas alargadas. Adicionalmente se incluye un tercer material correspondiente al agregado sin manipular que contiene el 20% de partículas alargadas¹. Esta manipulación fue realizada en el agregado procedente de la cantera de Guasca, ya que su índice de alargamiento es mayor que el del agregado de la cantera de Tunjuelo. De acuerdo a lo anterior, la Tabla 2 presenta la clasificación de los materiales usados para este estudio.

Since the objective of this study is to determine the shape influence on concrete properties, the main problem difficulty is to find materials having different shapes but similar physico-mechanical properties. In order to overcome this inconveniency, coarse aggregate selected only from one source is manipulated and separated using elongation gauges. In this way, two materials with different shape are obtained, having both the same physico-mechanic characteristics: one has 100% of elongated particles and the other 0% of elongated particles¹. Additionally, a third material is considered from non-manipulated aggregate that contains 20% of elongated particles. This process was conducted on the aggregate coming from the Guasca quarry, since its elongation index is higher than that of the Tunjuelo quarry. Accordingly, Table 2 shows the material classification used for this study.

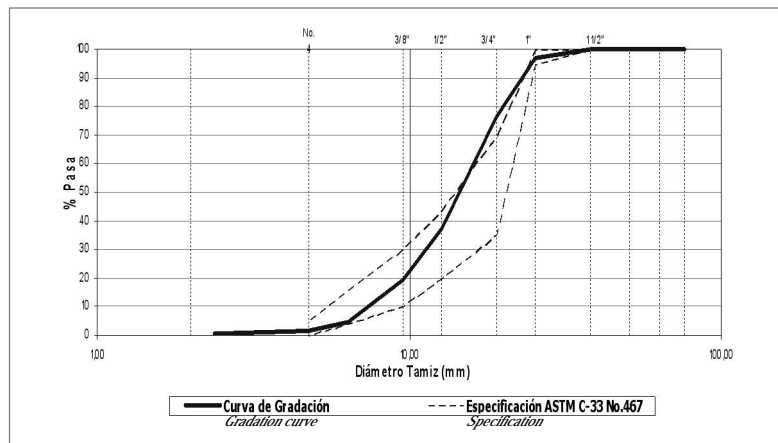


Figura 4. Gradación agregado grueso Guasca
Figure 4. Gradation of coarse aggregate from Guasca quarry

¹ De acuerdo a definición dada por el INVIAS

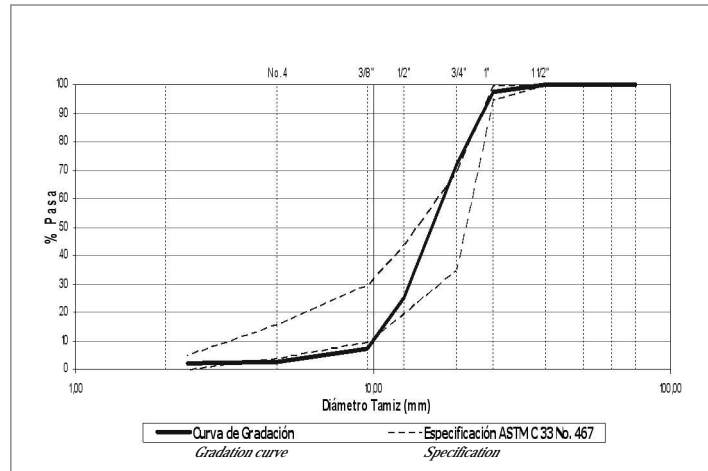


Figura 5. Gradación agregado grueso cantera Tunjuelo
 Figure 5. Gradation of coarse aggregate from Tunjuelo quarry

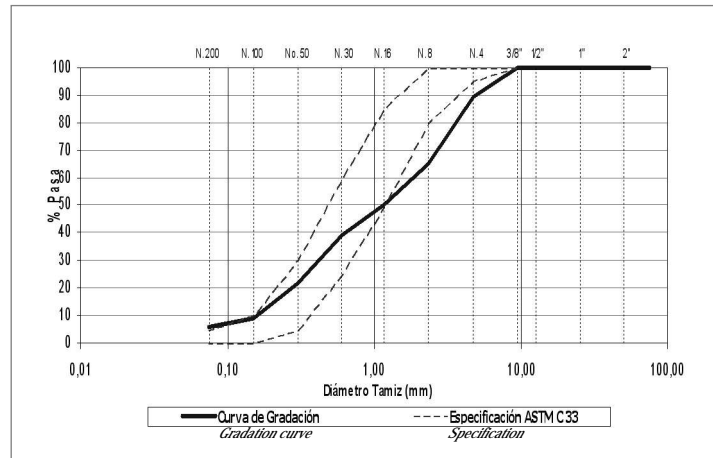


Figura 6. Gradación agregado fino cantera Tunjuelo
 Figure 6. Gradation of fine aggregate Tunjuelo quarry

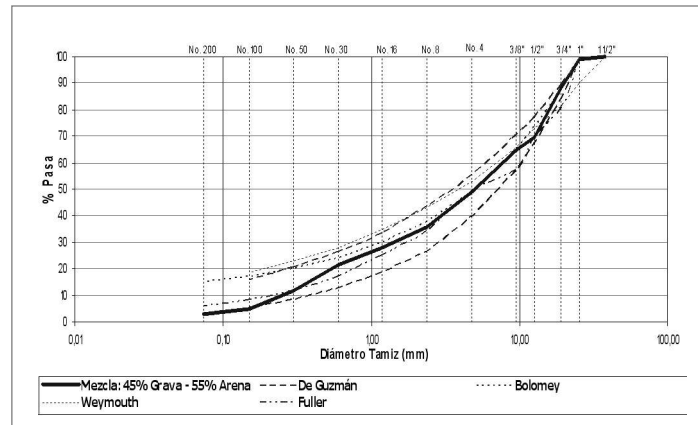


Figura 7. Combinación óptima de agregados
 Figure 7. Optimal combination of aggregates

El cemento utilizado para el desarrollo de las pruebas es cemento Argos – El Cairo Tipo I Bulto, cuyo peso específico determinado en el laboratorio usando el método de Le Chatelier es 2.97 g/cm³.

The cement used for the test is Argos–El Cairo, type I, with specific density of bulk density 2.97 g/cm³ determined at the laboratory using the Le Chaterlier method.

3.2 Diseño de mezcla

En Bogotá la mayoría de diseños de mezcla se realiza basándose en el método ACI 211.1. Sin embargo se ha encontrado que muy pocos agregados de Bogotá cumplen con las especificaciones dadas en este método. Este método proporciona los agregados de acuerdo al tamaño máximo del agregado a la masa unitaria compacta y el módulo de finura de la arena. La selección de la cantidad de agua requerida se determina de acuerdo al asentamiento de diseño, al tamaño máximo del agregado y al contenido de aire atrapado.

El método del ACI 211.1 considera la dosificación de los agregados teniendo en cuenta el módulo de finura (MF) de la arena, partiendo de la base de que los agregados utilizados en el diseño encajan dentro de las bandas granulométricas de la especificación. La arena de la cantera del Tunjuelo tiene un MF de 3.3, valor que está por encima de los máximos especificados en la ACI 211.1 y las granulometrías de la arena y de la grava utilizadas en el estudio están por fuera de esta especificación. Por esta razón la dosificación de los agregados se realiza teniendo en cuenta curvas de gradaciones ideales (Sánchez, 1996), las cuales buscan minimizar el porcentaje de vacíos de la mezcla de agregados sin afectar la trabajabilidad del concreto. La combinación de agregados resultante fue 45% grava y 55% arena. En la Figura 7 se presenta la combinación óptima de agregados junto con diferentes límites y rangos de gradaciones ideales.

3.2 Mix design

In Bogota most mix designs are based on ACI 211.1 method. However, it has been found that few aggregates in Bogota meet the specifications of this method. Such method delivers aggregates in accordance with the aggregate maximum size and compact unit mass and with the sand fineness modulus. The selection of the required water amount is determined in accordance with the design settlement, the maximum aggregate size and the content of entrapped air.

The ACI 211.1 method considers the aggregate dosification taking into account the fineness modulus (FM) of the sand, assuming that the aggregates used in the design fit the ACI specifications limits. Sand from Tunjuelo quarry has a 3.3 FM value, which is higher than the maximum values specified by ACI 211.1, and the granulometry for the sand and gravel used in this study exceeds the ACI specification. Consequently, aggregates dosification is determined considering ideal gradation curves (Sánchez, 1996), which purpose is to minimize the voids content the mix, without affecting concrete workability. The resulting aggregates combination was 45% gravel and 55% sand. Figure 7 shows the optimal aggregate combination together with different limits and ranks of ideal gradations.

Tabla 2. Clasificación del agregado grueso evaluado en el estudio
Table 2. Classification of coarse aggregate evaluated in this study

Muestra/Sample	Procedencia/Location	Forma/Shape	Índice de Alargamiento ¹ /Elongated Index ¹
G1	Guasca	Natural	20%
G2	Guasca	Alargado/Elongated	100%
G3	Guasca	No alargado/Non-elongated	0%
T	Tunjuelo	Natural	16%

Se realizaron tres diseños de mezclas de concreto, el diseño de mezclas tipo I para un concreto convencional usando agregado de Guasca con una resistencia a la compresión de diseño de 21MPa y 7,5cm de asentamiento, el diseño de mezclas tipo II usando el agregado de Guasca para un concreto con una resistencia de diseño de 21 MPa y un asentamiento de 15cm, y el diseño de mezclas tipo III usando el agregado de Tunjuelo para un concreto con resistencia de 21 MPa y un asentamiento de 15cm. Después de los procesos de diseño y ajuste de las mezclas de concreto, las dosificaciones finales de los materiales se presentan en la Tabla 3.

Three concrete mix designs were conducted, mix design type I for conventional concrete using Guasca aggregate with a design compressive strength of 21MPa and 7.5 cm of settlement; mix design type II using aggregate from Guasca, for a concrete with a design compressive strength of 21MPa and 15cm of settlement; mix design type III using aggregate from Tunjuelo, for a concrete with a design compressive strength of 21MPa and 15cm of settlement. After the design and adjustment processes on of the concrete mixes, the final material dosifications are shown in Table 3.

Tabla 3. Diseños de mezclas por m³ de concreto
Table 3. Mix design per concrete m³

Mezcla/Mix	Tipo/Type I	Tipo/Type II	Tipo/Type III
Agregado/Aggregate	Guasca	Guasca	Tunjuelo
f'c (MPa)	21	21	21
Asentamiento (cm)/Settlement (cm)	7,5	15	15
Cemento (Kg)/Cement (Kg)	356	372	372
Agua (Kg)/Water (Kg)	188	197	197
Agregado grueso (Kg)/Coarse aggregate (Kg)	765	754	790
Agregado fino (Kg)/Fine aggregate (Kg)	948	922	965
Relación A/C/Relation W/C	0.53	0.53	0.53

3.3 Caracterización morfológica de los agregados

La caracterización morfológica de los agregados se realizó usando el método de medición manual de índices de alargamiento y aplanamiento y caras fracturadas, y por medio de análisis de imágenes.

El proceso manual de medición de los índices de alargamiento y aplanamiento consiste en separar el agregado grueso a través de la serie de tamices para posteriormente hacer una selección de las partículas a través de las galgas de alargamiento y de aplanamiento. Estos índices se calculan como la suma del porcentaje ponderado del peso de partículas largas o elongadas de cada fracción. El ensayo de caras fracturadas es un ensayo subjetivo y consiste en cuantificar porcentualmente las partículas que tienen aproximadamente el 75% de caras fracturadas de cada fracción. El porcentaje de caras fracturadas se calcula como la suma del porcentaje ponderado de los resultados de cada fracción.

El análisis morfológico de las partículas por medio de imágenes se realizó usando el método de los descriptores de Fourier descrito en la Sección 2, el cual consiste en recorrer el contorno de la partícula en el plano complejo a velocidad constante. En este estudio se utilizaron 128 descriptores ($k=7$) que de acuerdo a lo reportado en la literatura es suficiente para reconstruir adecuadamente la imagen de entrada.

Las imágenes fueron obtenidas mediante fotografías tomadas a grupos de 20 partículas de agregado usando una cámara digital de 10 megapíxeles. Posteriormente, con la ayuda del software de interpretación y análisis de imágenes desarrollado durante este proyecto se estudió la geometría de una muestra de partículas pertenecientes a cada fracción de la serie gruesa de cada uno de los materiales descritos en la Tabla 2. Se analizaron un total de 200 partículas por fracción seleccionadas aleatoriamente.

3.3 Morphological characterization of the aggregates

Aggregates morphological characterization was performed using the manual measurement method for elongation, flatness, and fracture faces indexes, and by means of images analysis.

The manual process of measurement of indexes consists of separating the coarse aggregates by using a series of sieves, and then selecting particles using elong and flat gauges. Such indexes are calculated as the weighted sum of the weights of for each size of elongated or flat particles fraction. The fractured faces is subjective, and it consists of quantifying the percentage of particles that have approximately 75% of fractured faces each fraction. The percentage of fractured faces is calculated as the weighted sum of the results for each fraction.

The morphological analysis of the particles by means of images was conducted by using the Fourier descriptors method, described in section 2, which consists of running the particle boundary in the complex plane at constant speed. In the study, 128 descriptors ($k=7$) that, in accordance with the literature report, is enough to properly rebuild the input image.

Images were obtained from photographs taken from groups of 20 particles with a 10-megapixel-digital camera. Then, with the help of an interpretation and images analysis software developed for this project, the geometry of a particles sample was studied for each fraction of the coarse aggregate for each of the materials described in Table 2. A total of 200 particles per fraction, randomly selected, were analyzed.



El proceso seguido con el software desarrollado puede resumirse en dos pasos. El primero es la conversión de las imágenes tomadas a un formato binario y la determinación de las coordenadas del perímetro de las partículas. El segundo paso consiste en procesar estas coordenadas para determinar los descriptores de Fourier siguiendo el método descrito en la sección 2.2.2. De esta forma se contó con información cuantitativa de la geometría de los agregados, para la posterior correlación con las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido.

3.4 Evaluación de las propiedades del concreto

La forma de las partículas del agregado puede afectar las propiedades del concreto en estado fresco y en estado endurecido. Al dosificar concretos con diferentes agregados, puede variar la trabajabilidad del mismo y sus propiedades mecánicas. Los agregados con diferente forma tienen diferente superficie específica, por esta razón, la demanda de pasta para alcanzar una misma trabajabilidad y una misma resistencia puede variar. Las propiedades que se evalúan en este estudio para determinar la influencia de la forma en el comportamiento del concreto son: trabajabilidad, por medio del ensayo de asentamiento (NTC 396- ASTM C 143), resistencia a la compresión (NTC 673-ASTM C 39), y módulo de elasticidad (NTC 4025- ASTM C 469).

4. Resultados y discusión

4.1 Caracterización morfológica

Los resultados de la caracterización morfológica usando métodos manuales se presentan en la Tabla 4.

The process followed using the developed software can be summarized in two stages. The first stage is the images conversion into a binary format and the determination of particles perimeter coordinates. The second stage consists of processing these coordinates to determine the Fourier descriptors following the method described in section 2.2.2. In this way, quantitative information of the aggregates geometry was available for further correlation with fresh and hardened concrete properties.

3.4 Evaluation of concrete properties

Aggregate particles shape may affect the properties of fresh and hardened concrete. Dosing concretes with different aggregates, may affect its workability and also its mechanical properties. Aggregates having different shapes have different specific surface area that is why the amount of paste to achieve the same workability and strength may vary. The properties evaluated in this study to determine the shape influence on concrete behavior are: workability, by means of the settlement test (NTC 396- ASTM C 143), compressive strength (NTC 673-ASTM C 39), and elasticity modulus (NTC 4025- ASTM C 469).

4. Results and discussion

4.1 Morphologic characterization

The results of the morphologic characterization using manual methods are shown in Table 4.

Tabla 4. Caracterización morfológica
Table 4. Morphologic Characterization

Ensayo/Test	Tunjuelo (T)	Guasca (G)
Índice de aplanamiento/Flat index (%)	4	29
Índice de alargamiento/Elongated index (%)	16	20
Caras fracturadas/Cracked sides (%)	60	79



Se observa claramente que aunque los índices de alargamiento son similares para las dos fuentes, el de Guasca es ligeramente mayor. Una situación similar se presenta en el caso de las caras fracturadas, ambos agregados presentan un alto porcentaje de esta propiedad, lo cual se esperaba debido a que ambos son agregados triturados.

La caracterización de forma por medio del análisis de imágenes utilizando el análisis de Fourier, se realizó para los descriptores -1: elongación, -2: triangularidad, y -3: cuadratura. Para esto se identificaron rangos de valores de cada descriptor de forma, en los cuales se observa una variación importante de la forma. Es así como para el descriptor -1 (Elongación), al analizar las imágenes capturadas se encuentra que cuando el descriptor tiene un valor menor a 0.05 la elongación es baja, para valores entre 0.05 y 0.17 la elongación es media, y para valores mayores a 0.17 la elongación es alta. De la misma forma se analiza el descriptor -2 para el cual se observa triangularidad baja para valores menores a 0.05, media para valores entre 0.05 y 0.2, y alta para valores mayores a 2. Por último, para la cuadratura se observan partículas redondeadas cuando el descriptor -3 es menor a 0.02, y partículas cuadrangulares para valores mayores. Estos rangos de valores junto con las correspondientes variaciones de forma son ilustrados en las Figuras 8, 9 y 10 para elongación (descriptor -1), triangularidad (descriptor -2) y cuadratura (descriptor -3) respectivamente. Asimismo, en la Tablas 5, 6 y 7 se presenta el porcentaje del número de partículas que se encuentra dentro de cada rango de elongación, triangularidad y cuadratura para cada tipo de agregado.

Asumiendo que el rango alto de elongación corresponde al criterio del índice de alargamiento del método manual (Tabla 2), es decir, partículas cuya relación de largo a tamaño medio de la fracción es mayor a 9/5, los valores obtenidos en ambos métodos son comparables. Considerando los errores asociados a la medición manual y la sensibilidad asociada a la selección de los rangos en el método de descriptores de Fourier, estos resultados validan la aplicación del método de los descriptores de Fourier para el índice de alargamiento.

Para el caso de los descriptores -2 y -3 (triangularidad y cuadratura), no hay una variación significativa para los tres tipos de agregados analizados procedentes de la cantera de Guasca como era esperado ya que la manipulación de este material para obtener las muestras G1, G2, y G3 solo fue realizada en términos de elongación.

It is clear that, although elongation indexes are similar for both sources, that of Guasca is slightly higher. A similar situation occurs in the case of fractured faces, where both aggregates have a high percentage of this property as expected, since both are crushed aggregates.

Shape characterization by means of image analysis using the Fourier method, was conducted for descriptors -1: elongation, -2: triangularity, and -3: quadrature. For this purpose ranges of values were identified for each shape descriptor for which an important variation of shape. For descriptor -1 (Elongation), it is found that when this descriptor has a value lower than 0.05 the elongation is low; for values between 0.05 and 0.17 elongation is high, and for values greater than 0.17 elongation is intermediate. In the same way, descriptor -2 is analyzed, and shows low triangularity for values lower than 0.05, intermediate for values between 0.05 and 0.2, and high for values greater than 2. For quadrature, rounded particles are observed when descriptor -3 is lower than 0.02, and quadrangular particles for greater values. Such value ranges along with the corresponding shape variations are depicted in Figures 8, 9 and 10 for elongation (descriptor -1), triangularity (descriptor -2) and quadrature (descriptor -3), respectively. In the same way, Tables 5, 6 and 7 present the percentage of particles which in each elongation, triangularity and quadrature ranges for each type of aggregate.

Assuming that the high elongation range corresponds to the elongation index criteria of the manual method (Table 2), i.e., particles which length to the average size of the fraction ratio is greater than 9/5, then obtained results for both methods are comparable. Considering the errors associated to manual measurement and the sensitivity associated to the selection of ranges in the Fourier descriptors method, such results validate the application of the Fourier descriptor method for the elongation index.

In the case of descriptors -2 and -3 (triangularity and quadrature), there is no significant variation for the three types of aggregates coming from Guasca quarry, as it was expected, since such material manipulation for obtaining G1, G2 and G3 samples only was developed in terms of elongation.



Además, las diferencias en cuadratura y triangularidad entre los agregados de Guasca y Tunjuelo son mínimas ya que ambos materiales son sometidos a procesos de trituración en las respectivas canteras.

Furthermore, quadrature and triangularity differences between aggregates from Guasca and Tunjuelo are minimal, because both are crushed materials.

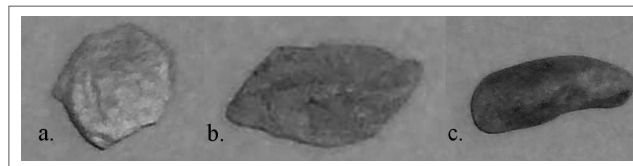


Figura 8. Geometría típica para los rangos del descriptor -1, elongación: a. Elongación baja con descriptor menor a 0.05, b. Elongación media con descriptor entre 0.05 y 0.17, y c. Elongación alta con descriptor mayor a 0.17
 Figure 8. Typical Geometry for elongation ranges of descriptor -1: a. Low elongation with descriptor lower than 0.05; b. Intermediate elongation with descriptor between 0.05 and 0.17; and c. High elongation with descriptor greater than 0.17

Tabla 5. Descripción de elongación (Descriptor -1)
 Table 5. Elongation Description (Descriptor -1)

Rango de Elongación/Elongation range	Agregado/Aggregate			
	G1	G2	G3	T
Baja/Low	9%	1%	12%	10%
Media/Intermediate	58%	24%	66%	66%
Alta/High	33%	75%	22%	24%

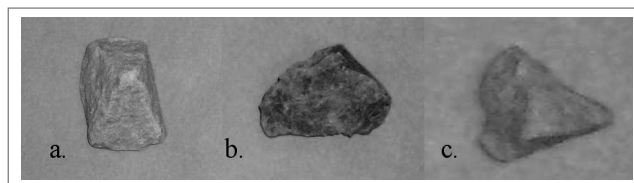


Figura 9. Geometría típica para los rangos del descriptor -2, triangularidad: a. Triangularidad baja con descriptor menor a 0.05, b. Triangularidad media con descriptor entre 0.05 y 0.2, y c. Triangularidad alta con descriptor mayor a 0.2
 Figure 9. Typical Geometry for triangularity ranges of descriptor -2: a. Low triangularity with descriptor lower than 0.05; b. Intermediate triangularity with descriptor between 0.05 and 0.2; and c. High triangularity with descriptor greater than 0.2

Tabla 6. Descripción de triangularidad (Descriptor -2)
 Table 6. Description of Triangularity (Descriptor -2)

Rango de Triangularidad/Triangularity range	Agregado/Aggregate			
	G1	G2	G3	T
Baja/Low	47%	48%	44%	53%
Media/Intermediate	42%	42%	44%	39%
Alta/High	11%	10%	12%	8%

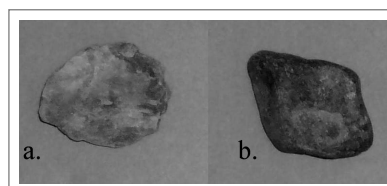


Figura 10. Geometría típica para los rangos del descriptor -3, cuadratura: a. Cuadratura baja con descriptor menor a 0.02, b. Cuadratura alta con descriptor mayor a 0.02
 Figure 10. Typical Geometry for quadrature ranges of descriptor -3: a. Low quadrature with descriptor lower than 0.02; b. High quadrature with descriptor greater than 0.02

Tabla 7. Descripción de cuadratura (Descriptor -3)
Table 7. Description of quadrature (Descriptor -3)

Rango de Cuadratura/Quadrature ranges	Agregado/Aggregate			
	G1	G2	G3	T
Baja/Low	33%	33%	35%	40%
Alta/High	67%	67%	65%	60%

4.2 Evaluación de las propiedades del concreto

Para estudiar el efecto de la forma en las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido se realizaron tres diseños de mezclas cuyas dosificaciones se presentan en la Tabla 3 para los agregados naturales. La mezcla tipo I es usada para determinar la influencia de la forma cuando se usa la misma dosificación de materiales. Con este fin y usando la dosificación correspondiente a la mezcla tipo I se prepararon 9 cilindros para cada tipo de agregado G1, G2, y G3. La mezcla tipo II es usada para evaluar el efecto de la morfología manteniendo el mismo asentamiento y relación agua-cemento para lo cual se prepararon 9 cilindros para cada tipo de agregado G1, G2, y G3. Es importante anotar que las mezclas tipo II resultan en dosificaciones diferentes para cada tipo de agregado G1, G2, y G3. Finalmente, la mezcla tipo III es empleada para comparar los materiales naturales provenientes de las dos fuentes consideradas (G1 y Tunjuelo). Los cilindros de concreto fueron ensayados para evaluar su resistencia a la compresión y su módulo de elasticidad, y los correspondientes resultados se presentan a continuación.

4.2.1 Efecto de la forma - Igual Dosificación- Mezcla tipo I

El objeto de estudiar este tipo de mezcla es observar el efecto que tienen los diferentes tipos de agregado grueso (G1, G2, y G3) en la trabajabilidad y en la resistencia del concreto cuando se utiliza la misma dosificación de los materiales de acuerdo al diseño de mezcla tipo I presentado en la Tabla 3.

El promedio de los resultados de asentamiento para cada uno de los tipos de agregado son mostrados en la Tabla 8. Puede observarse la gran influencia que la forma del agregado tiene en la trabajabilidad del concreto fresco. Para la dosificación empleada el uso de material con un índice de alargamiento del 100% (G2) resulta en una reducción del 43% en asentamiento comparado con el asentamiento obtenido para el agregado natural (G1), mientras que el uso del agregado con un índice de alargamiento de 0% (G3) resulta en un incremento en asentamiento del 32%.

4.2 Evaluation of concrete properties

In order to study the shape effect on the properties of fresh and hardened concrete, three mix designs were prepared, which dosifications are presented in Table 3 for the natural aggregates. Mix type I is used to determine the shape influence when the same material dosification is employed. With this purpose and using the dosification corresponding to mix type I, 9 cylinders were prepared for each kind of aggregate G1, G2 and G3. Mix type II is employed to evaluate the effect of morphology keeping the same settlement and water/cement ratio, 9 cylinders were prepared for each kind of aggregate G1, G2 and G3. It is important to note that mixes type II result in different dosifications for each kind of aggregate G1, G2 and G3. Finally, mix type III is used to compare natural material coming from two locations (G1 and Tunjuelo). Concrete cylinders were tested to evaluate compressive strength and elasticity modulus, and the corresponding results are presented below.

4.2.1 Shape effect – Same dosification – Mix type I

The purpose of studying this mix type is to evaluate the effect of different kinds of coarse aggregates (G1, G2 and G3) on concrete workability and strength, when the same material dosification is used in accordance with mix design type I shown in Table 3.

The average results of settlement for each kind of aggregate are shown in Table 8. It is noticeable that there is a great influence of the aggregate shape on fresh concrete workability. For this mix type, the use of material with an elongation index of 100% (G2) yields a 43% settlement reduction compared to the obtained settlement from natural aggregate (G1), while the employment of an aggregate with a 0% elongation index (G3) yields a settlement increase of 32%.



Tabla 8. Trabajabilidad de las mezclas tipo I
Table 8. Workability of mixes type I

	Agregado/Aggregate		
	G1	G2	G3
Asentamiento/Settlement (cm)	8.2 ± 1.2	4.7 ± 0.5	10.8 ± 0.4

Los resultados de resistencia a la compresión y módulo de elasticidad presentan una variabilidad importante para cada tipo de agregado debida en parte a la naturaleza misma del concreto. Sin embargo, estos valores no presentaron diferencias significativas debidas al cambio de la forma del material, tal como se muestra en las Figuras 16 y 17 y en la Tabla 9.

The results for compressive strength and elasticity modulus show an important variability for each kind of aggregate, partly due to concrete's physical constitution. However, such values did not exhibit significant variations due to change of material shape, as described in Figures 16 and 17 and in Table 9.

Tabla 9. Resistencias a la compresión y módulo de elasticidad mezclas Tipo I
Table 9. Compressive strength and elasticity modulus, mixes Type I

	Agregado/Aggregate		
	G1	G2	G3
Resistencia (MPa)/Strength (MPa)	21.7 ± 2.9	21.1 ± 3.3	20.7 ± 3.3
Módulo de elasticidad (MPa)/Elasticity modulus (MPa)	15.1 ± 2.2	14.5 ± 1.8	14.4 ± 1.4

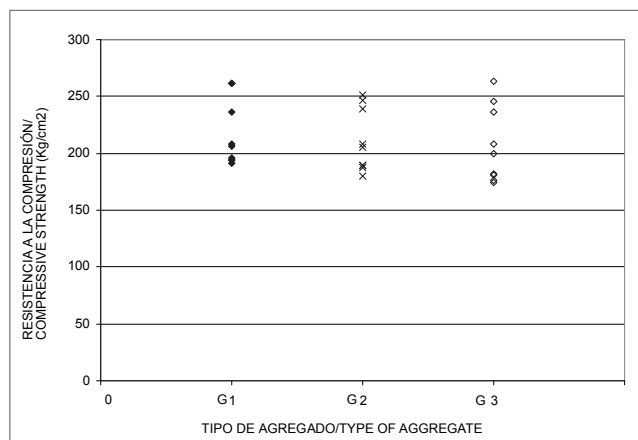


Figura 16. Resistencia a la compresión mezclas tipo I
Figure 16. Compressive strength – mixes Type I

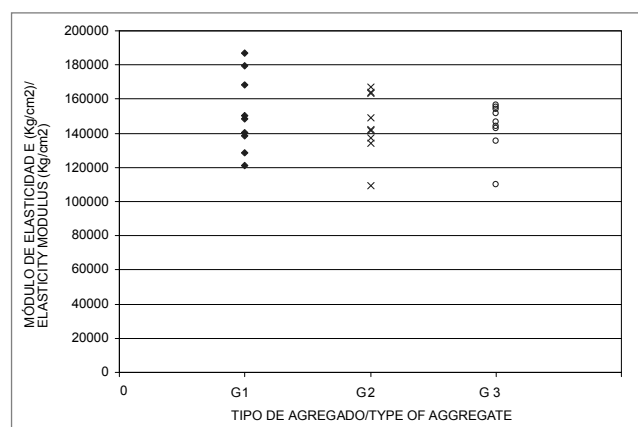


Figura 17. Módulo de elasticidad mezclas tipo I
Figure 17. Elasticity modulus – mixes Type I



4.2.2 Efecto de la forma – Igual asentamiento y relación agua-cemento – Mezcla tipo II

Con estas mezclas se pretende encontrar la variación en la demanda de pasta de cemento para mezclas de concreto con los diferentes tipos de agregado grueso G1, G2, y G3, para un asentamiento específico (15cm) y manteniendo constante la relación agua cemento. Con el fin de lograr el mismo asentamiento para los diferentes agregados se tiene como base el diseño de mezcla tipo II (Tabla 3) y se modifica el volumen del agregado grueso hasta lograr el asentamiento deseado. Este proceso resulta en dosificaciones con diferentes volúmenes de pasta de cemento. Las dosificaciones finales por peso se presentan en la Tabla 10, y los valores promedio de asentamiento para cada tipo de agregado en la Tabla 11.

4.2.2 Shape effect – Same settlement and water-cement ratio, Mix type II

Such mixes intend to find the amount variation of cement paste for concrete mixes for different kinds of coarse aggregate G1, G2 and G3, for a specific settlement (15 cm) keeping the ratio water/cement ratio constant. In order to achieve the same settlement for different aggregates, the mix design type II (Table 3) is taken as a standard, and the coarse aggregate volume is modified until achieving the desired settlement. Such process yields dosages with different cement paste volumes. Final dosages per weight are indicated in Table 10 and the average values of settlement for each kind of aggregate are shown in Table 11.

Tabla 10. Variación en la dosificación de la mezcla tipo II por m³ de concreto debidas a la forma
Table 10. Dossification variation of mix type II m³ per of concrete, due to particle shapes

Agregado/Aggregate	G1	G2	G3
f'c (MPa)	21	21	21
Asentamiento/Settlement (cm)	15	15	15
Cemento/Cement (Kg)	372	379	357
Agua/Water (Kg)	197	201	189
Agregado grueso/Coarse aggregate (Kg)	754	747	769
Agregado fino/Fine aggregate (Kg)	922	913	939
Relación/Ratio A/C	0.53	0.53	0.53

Tabla 11. Trabajabilidad de las mezclas tipo II
Table 11. Workability of mixes type II

	Agregado/Aggregate		
	G1	G2	G3
Asentamiento/Settlement (cm)	15.8 ± 0.8	17.2 ± 0.3	15.3 ± 0.4

La presencia de partículas elongadas implica un mayor contenido de vacíos y por lo tanto una mayor demanda de pasta de cemento. De acuerdo a los resultados mostrados en la Tabla 10, la mezcla preparada con agregado tipo G2 el cual tiene un índice de alargamiento del 100% requiere un 1.9% más de volumen de pasta que el agregado natural, mientras que el uso del agregado G3 con un índice de alargamiento del 0% requiere un 4.0% menos de pasta en comparación con la mezcla con el agregado sin manipular. La demanda de pasta aumenta en un 5.9% de una mezcla con agregado sin partículas alargadas (G2) a una con 100% de partículas alargadas (G3).

The presence of elongated particles involves a higher voids content, and therefore a higher amount of cement paste. Accordingly with results in Table 10, the mix prepared with aggregate type G2, which has an elongation index of 100%, requires a 1.9% paste volume increase than the natural aggregate; while the mix of G3 aggregate, with a 0% elongation index, requires 4.0% less cement paste compared to the non-manipulated aggregate mix. Demand of paste increases in 5.9% for a mix with aggregates without elongated particles (G2), compared to one with 100% elongated particles (G3).

Los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión y módulo de elasticidad se presentan en la Figuras 18 y 19 y en la Tabla 12. No se observa un cambio significativo en las resistencias del concreto fabricado con agregado G1 y con el G2. Igualmente se observa una similitud en el comportamiento de las resistencias a la compresión y de los módulos de elasticidad de los agregados G1 y G3, con una ligera disminución de la resistencia a la compresión y del módulo de elasticidad del agregado G3. De acuerdo a lo presentado en la Tabla 10, la mezcla realizada con agregado G2 contiene cerca de un 2.0% más de cantidad de pasta que la mezcla realizada con el agregado G1 mientras que la muestra G3 presenta un 4.0% menos de cantidad de pasta, lo que indica que el comportamiento de la resistencia a la compresión y del módulo de elasticidad puede estar principalmente afectado por el volumen de pasta, sin descartar el aporte de la resistencia que puede suministrar la trabazón entre partículas.

Results for compressive strength and elasticity modulus are shown in Figures 18 and 19, and Table 12. There is no significant change in strength for concrete prepared with G1 and G2 aggregates. In the same way, the compressive strength and elasticity modulus behavior for G1 and G3 aggregates is similar with a minor decrease of compressive strength and elasticity modulus for G3 aggregate. Accordingly with Table 10, the mix prepared with G2 aggregate contains about 2.0% more paste than the mix prepared with G1 aggregate; while G3 mix requires 4.0% less paste, which indicates that compressive strength and elasticity modulus behaviors can be mainly affected by the paste volume, not disregarding the influence in strength of the particles.

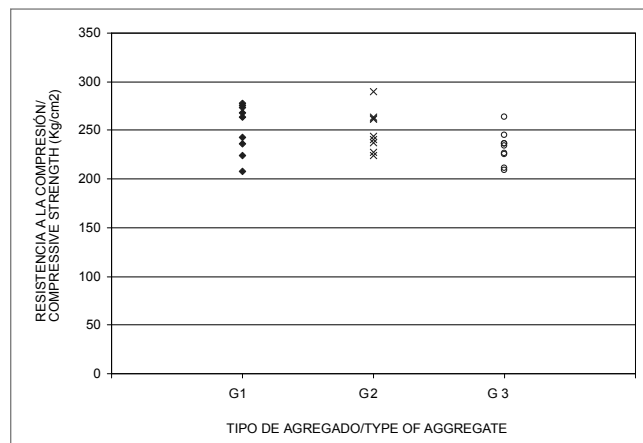


Figura 18. Resistencia a la compresión mezclas tipo II
Figure 18. Compressive strength – mixes Type II

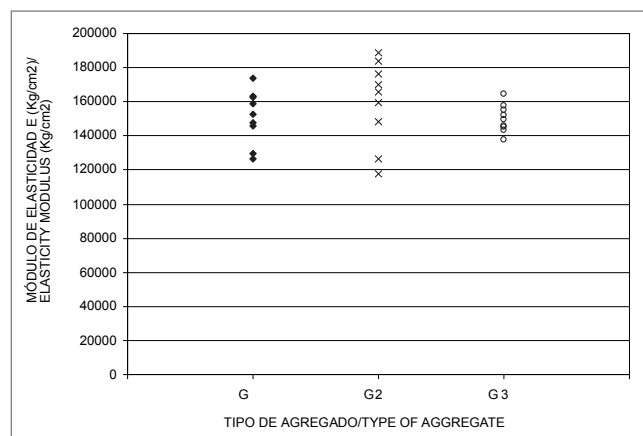


Figura 19. Módulo de elasticidad mez-clas tipo II
Figure 19. Elasticity modulus – mixes Type II



Tabla 12. Resistencias a la compresión y módulo de elasticidad mezclas Tipo II
Table 12. Compressive strength and elasticity modulus mixes Type II

	Agregado/Aggregate		
	G1	G2	G3
Resistencia/Strength (MPa)	25.2 ± 2.5	25.0 ± 2.1	23.2 ± 1.7
Módulo de elasticidad/Elasticity modulus (MPa)	15.1 ± 1.6	15.9 ± 2.4	15.0 ± 0.8

4.2.3 Influencia de los agregados – Procedencia
Este tipo de mezcla busca comparar las propiedades del concreto utilizando agregados de diferentes fuentes (G y T).

Los diseños de mezcla utilizados para esta comparación son el tipo I y el tipo III descritos en la Tabla 3 correspondientes a los dos agregados anteriormente mencionados. Los resultados de asentamiento mostrados en la Tabla 13 son consistentes con lo reportado en la literatura, ya que el índice de alargamiento del agregado de Tunjuelo (T) es menor que aquel del agregado de Guasca (G1).

4.2.3 Aggregates Influences
This type of mix intends to compare concrete properties by using aggregates from different locations (G and T).

Mix designs in this comparison are type I and type III described in Table 3, corresponding to the two previously mentioned aggregates. Settlement results shown in Table 13 are consistent to literature reports, since the elongation index for Tunjuelo aggregate (T) is minor than that of Guasca aggregate (G1).

Tabla 13. Trabajabilidad de las mezclas tipo I y tipo III
Table 13. Workability of mixes type I and type III

	Agregado/Aggregate	
	G1	T
Asentamiento/Settlement (cm)	15.8 ± 0.5	18.7 ± 0.7

En las Figuras 20 y 21 y en la Tabla 14 se presentan los resultados de resistencia a la compresión y módulo de elasticidad correspondientes a las mezclas tipo I y tipo III. Se puede observar que la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad del concreto realizado con el agregado T tiene mayores resistencias que el agregado G debido a que el primero tiene mejores características físico-mecánicas según lo indica su mayor peso específico y menor porcentaje de desgaste (Tabla 1).

Figure 20, Figure 21, and Table 14 show the results for compressive strength and elasticity modulus in mixes type I and type III. It can be seen that compressive strength and elasticity modulus for T aggregate are greater than for G aggregate, because T has better physico-mechanical characteristics as proven by its higher specific weight and minor resistance to degradation percentage (Table 1).

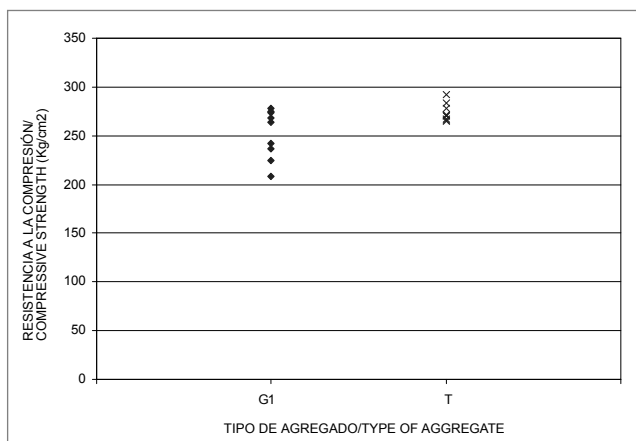


Figura 20. Resistencia a la compresión mezclas tipo 3
Figure 20. Compressive strength – mixes Type III

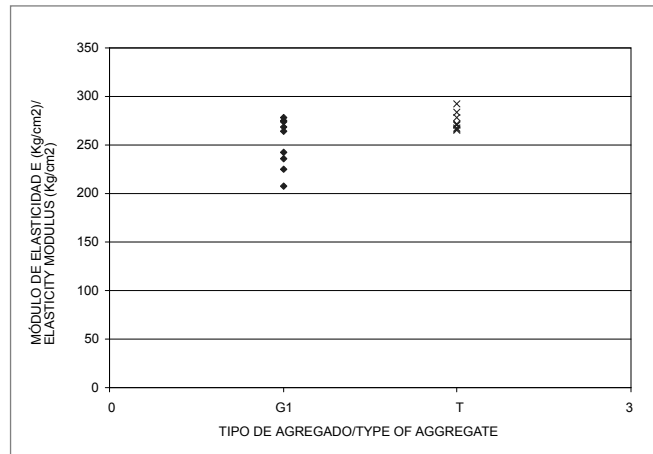


Figura 21. Módulo de elasticidad mezclas tipo 3
 Figure 21. Elasticity modulus – mixes Type III

Tabla 14. Resistencias a la compresión y módulo de elasticidad mezclas Tipo I y Tipo III
 Table 14. Compressive strength and elasticity modulus mixes Type I and Type III

	Agregado/Aggregate	
	G1	T
Resistencia/Strength (MPa)	25.2 ± 2.5	27.4 ± 0.9
Módulo de elasticidad/Elasticity modulus (MPa)	15.1 ± 1.6	18.2 ± 1.7

5. Conclusiones

La morfología de los agregados influye en las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido, con una mayor influencia en la manejabilidad que en las propiedades mecánicas. La medición de la forma por los métodos tradicionales es subjetiva, por esta razón en los últimos años se han utilizado tecnologías de análisis de imágenes para determinar las características de forma de las partículas. En este estudio se determinaron las características morfológicas de diferentes agregados usando los métodos tradicionales y el método de análisis de imágenes por medio de los descriptores de Fourier, para luego evaluar la influencia de la elongación de las partículas en las propiedades del concreto: asentamiento, resistencia a la compresión y módulos de elasticidad. Con base en la investigación realizada, y para los materiales, número de muestras, y análisis considerados se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- a. Los valores obtenidos de alargamiento con el método manual y el de análisis de imágenes con descriptores de Fourier presentan pequeñas diferencias. Estas diferencias son causadas por los errores asociados con la medición manual y con la sensibilidad en la selección de los rangos en el método de Fourier.

5. Conclusions

Aggregates morphology affects the properties of fresh and hardened concrete, with a higher influence on workability than on mechanical properties. Shape measurements by means of traditional methods is subjective, therefore during recent years image analysis technologies have been employed in order to determine the particles shape characteristics. In this study the morphologic characteristics of different kinds of aggregates were determined using traditional methods, and image analysis by means of Fourier descriptors, in order to evaluate the influence of the elongation of the particles on the concrete properties: settlement, compressive strength and elasticity modulus. Based on this research, materials, number of samples and analyses considered, the following conclusions can be obtained:

- a. The values obtained for elongation from manual methods and Fourier description analysis, yield minor differences. Such differences are originated by errors associated with manual measurements and the sensitivity in the selection of ranges in the Fourier method.

- b. Las mezclas con igual dosificación presentan variaciones significativas en el asentamiento para los diferentes tipos de agregado. Las partículas alargadas disminuyen el asentamiento del concreto y por lo tanto reducen su trabajabilidad. Esto implica ajustes en los diseños de mezclas de concreto para obtener la trabajabilidad deseada.
- c. La resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad de las mezclas con igual dosificación pero con agregados con diferentes contenidos de partículas alargadas no presentan diferencias significativas, por lo tanto la forma no representa un factor que influya en las propiedades mecánicas del concreto.
- d. Al ajustar los diseños de mezclas utilizando agregados de diferentes formas para un asentamiento dado se obtuvo que los volúmenes de pasta varían en un 5,9% entre agregados con índices de elongación baja (G2) y alta (G3). Las mezclas presentaron comportamientos de resistencia a la compresión similares.
- e. Comparando los resultados de resistencia a la compresión y módulo de elasticidad de los concretos realizados con el agregado T y G1, se observa que T tiene mayores resistencias que el agregado G1 debido a que el primero tiene mejores características físico-mecánicas según lo indica su mayor peso específico y menor porcentaje de desgaste.
- b. Mixes prepared with the same mix dosification show significant settlement variations for different kinds of aggregates. Elongated particles decrease concrete settlement and, therefore, reduce its workability. This implies that adjustments must be made on the concrete mix design in order to obtain a desired workability.
- c. Compressive strength and elasticity modulus of mixes prepared with the same dosification, but different content of elongated particles, do not show significant differences, therefore, shape is not an important factor on concrete mechanical properties.
- d. For mix designs using different shapes aggregates for a given settlement, it was found that the paste volume vary from 5.9% between aggregates with low elongation index (G2) and high elongation index (G3). Such mixes showed similar behaviors for compressive strength and elasticity modulus.
- e. By comparing the results of compressive strength and elasticity modulus on concretes prepared with aggregate T and G1, it is noticeable that T has higher strengths than aggregate G1, because T has better physico-mechanical characteristics as proven by its higher specific weight and minor resistance to degradation percentage.

7. Referencias / References

- Alexander M. (1996), "Aggregates and the deformation properties of concrete". ACI Materials journal, Vol. 6, 93 p. 576.
- Andersen P.J y Johansen V. (1991), "Packing Handbook, a Guide to Determine the Optimal Gradation of Concrete Aggregates" Report to Strategic Highway Research Program, SHRP C-206, USA, GMIC No. 901001
- ASTM (2003), "ASTM C-33. Standard Specification for Concrete Aggregates", American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA.
- Barret P.J. (1980), "The shape of rock particle, a critical review". Sedimentology. Vol. 27, pp. 291-303.
- Bowman E., Soga K. y Drummond T. (2001), "Particle shape characterization using Fourier descriptor analysis". Géotechnique 51 No. 6.
- Clark M. (1981), "Quantitative shape analysis: a review". Mathematical Geology. Vol. 13 No.4, pp. 303-320.
- De Larrard F. (1999), "Concrete Mixture Proportioning: a Scientific Approach", Editado por Taylor & Francis, Primera Edición
- Galloway J. (1994), "Grading, Shape, and Surface Properties". ASTM Special Technical Publication No. 169C, Philadelphia, pp. 401-410.
- Hudson B. (1998), "Aggregate Shape Affects Concrete Cost", Quarry, Noviembre 1998, pp 1-4
- INVIAS (1998), "Norma técnica de referencia INV E 230. Índice de alargamiento y aplanamiento de los agregados para carreteras.", Instituto Nacional de Vías – Colombia
- Kaplan M. F. (1959), "Flexural and Compressive Strength of Concrete as Affected by the Properties of Coarse Aggregates". American Concrete Institute Journal, Vol. 55, pp. 1193-1208.
- Kosmatka S. (1994), "Bleeding" ASTM Special Technical Publication No. 169C, Philadelphia, pp 89-111..
- Legg F. (1998), "Aggregates: Chapter 2" Concrete Construction Handbook. Cuarta edición, Editado por McGraw-Hill: New York, NY, USA.



- Maerz N. y Zhou W. (1999), "Calibration of optical digital fragmentation measuring systems". FRAGBLAST 6 - The Sixth International Symposium for Rock Fragmentation by Blasting, Johannesburg, South Africa.
- Mehta K. y Monteiro P. (1993), "Concrete: Structure, Properties, and materials" 2da Edición Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- Quiroga P. (2003), "The Effect of the Aggregates Characteristics on the Performance of Portland Cement", Austin: Universidad de Texas. Documento de defensa de tesis doctoral.
- Sánchez D. (1996), (3ª ed.) "Tecnología del concreto y del mortero". Bogotá: Bhandar
- Shilstone J. (1990), "Concrete Mixture Optimization". Concrete International, Vol. 12 Issue 6, pp 33-39.
- Shilstone J. (1999), "The Aggregate: The Most Important Value-Adding Component in Concrete". International Center for Aggregates Research; Memorias del Simposio Internacional Austin, Texas
- Sonka M., Hlavac V. y Boyle R. (1993), "Image Proceedings analysis and machine vision". Editado por Chapman&Hall, Londres, UK.
- Wang L.B., Lai J.S. y Frost J.D. (1997), Fourier Morphological Descriptors of Aggregate Profiles. 2nd International Conference on Image Technology Applications in Civil Engineering, pp76-85, Sweden.
- Wang, L. Wang, X., Mohammad, M. y Abadie, C. (2005), "Unified Method to Quantify Aggregate Shape Angularity and Texture Using Fourier Analysis" Journal of Materials in Civil Engineering, Vol 17 Issue 5, pp 498 - 504

