

Caracterización físico-mecánica de agregados pétreos de la formación geológica Toluviejo (Sucre) para producción de concreto

Physico-mechanical rock aggregates Toluviejo geological formation (Sucre) for concrete production.

Alex José Bracamonte Miranda¹, Melba Liliana Vertel Morinson², Jesús Antonio Cepeda Coronado^{3*}

Matemáticas, Universidad de Sucre, Sucre, Colombia

alex.bracamonte@unisucre.edu.co

melba.vertel@unisucre.edu.co

jesus.cepeda@unisucre.edu.co

Resumen— Este artículo presenta una caracterización físico-mecánica de los productos extraídos de la formación geológica de Toluviejo (Sucre) y optimización en la resistencia de los materiales explotados frente a la producción de concreto. Los resultados obtenidos con técnicas multivariadas permiten establecer ventajas y limitaciones del agregado que se produce para producción de concreto de mediana y alta resistencia. La sutil influencia de algunas variables en el comportamiento total de los componentes a medida que se incrementa la resistencia, así como la necesidad de acudir a adiciones para aumentar la trabajabilidad de concreto de altas resistencia que plantean relaciones agua/cemento < 0.4 .

Palabras clave— agregados, concreto, fluencia y porosidad.

Abstract— This article presents a physical-mechanical characterization of the products extracted from the geological formation of Toluviejo (Sucre) and optimization in the resistance of the exploited against the production of concrete materials. The results obtained with multivariate techniques allow establishing advantages and limitations of aggregate produced for production of medium and high strength concrete. The subtle influence of some variables in overall behavior of components to increase the resistance, as well as the need to add to additives to increase the workability of concrete of high resistance posed by water/cement ratios < 0.4 .

Key Word— aggregates, concrete, creep and porosity.

I. INTRODUCCIÓN

Se hace evidente la existencia de grandes problemas en materia de calidad en producción de concretos en el departamento de Sucre [1], por ejemplo: poca evidencias de Investigaciones sobre caracterización de materiales en la región para la producción de concreto; difícil comunicación terrestre entre las regiones del departamento; bajo dinamismo del sector constructor, y, el estado actual de la tecnología de

producción de concreto no permite garantizar calidad en términos de resistencia, durabilidad y libertad en usos.

De la *formación geológica de Toluviejo (Sucre)* se tomaran los agregados pétreos, una fuente apropiada de materia prima para industrias de cemento y la elaboración de agregado grueso para concreto. Esta formación presenta un a alta tasa de extracción que sustenta la economía de la zona (cooperativas de baja producción manual y empresas particulares con mayor nivel de tecnificación).

La necesidad de contar con un concreto de calidad hace indispensable conocer a detalle sus componentes, ya que tanto la resistencia como la durabilidad dependen de las propiedades físicas y químicas de ellos. Este trabajo tiene como objetivo estudiar la variabilidad de las características físico-mecánicas de los agregados que se producen en la formación geológica Toluviejo (Sucre) y definir un marco de comportamiento (confiabilidad estadística) entre variables físico-mecánicas de estos agregados y su influencia en las características del concreto que se produce en el departamento de Sucre.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

La formación geológica Toluviejo, es una de las más explotadas en los últimos años en el departamento de Sucre (Colombia), aflora en el área de la Plancha 44- Sincelajo [2], con 16 km de longitud y anchura variable de 2 km en el sureste a 6 km en el noreste, la cual ocupa parte de la mitad centro-occidental de la plancha, con un rumbo regional de N45°E [3]. Hacia el sureste, rocas de esta unidad afloran en dos áreas menores en el cerro Escobar.

En general, se trata de una sucesión de carbonatos con un conglomerado cuarzoso hacia la base, con intercalaciones de

areniscas hacia la parte media y baja. Las secciones más completas se encuentran en el arroyo Chalán y en alrededores de Varsovia, así como en cerro Mena.

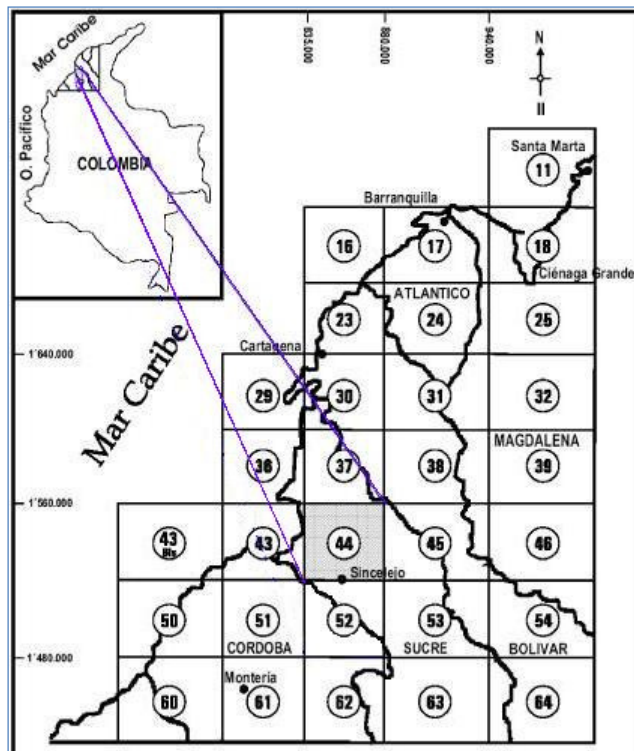


Figura 1. Localización de la plancha 44-Sincelejo [3].

Un alto porcentaje de los concretos que se elaboran en Sucre ocupan para su fabricación agregados que pueden ser obtenidos de dos fuentes: en depósitos de origen natural (ríos, playas, etc.) y como productos de trituración de roca.

Desde el punto de vista de su tamaño, los agregados se dividen en dos grupos: los agregados finos y los agregados gruesos. Los primeros consisten en arenas naturales o manufacturadas con tamaños de partícula que van desde 5 mm hasta mayores de 60 μm ; los segundos son aquellos cuyas partículas son mayores a 5 mm y hasta 125 mm [4].

Depósito aluvial de agregado fino: el de mayor importancia en la región y de mayor utilización por los constructores se encuentra localizada en la plancha 44-Sincelejo [3], corresponde a márgenes del arroyo El Piñal y el municipio de Ovejas (Sucre). El material se extrae en forma manual. La arena extraída de este sitio constituye una fuente para la elaboración de concreto.

Depósitos de agregado grueso: Los principales recursos minerales del área de estudio corresponden a calizas y margas. Algunas de las trituradoras de mayor actividad minera en la zona de influencia son: Jomeve y Coomulpropical.

La roca obtenida de la roca madre por medio de explotación manual o dinamita adquiere formas regulares con diámetros

que oscilan entre 30-40 cm y pesos promedios desde 5-10 kg. Estas canteras producen un promedio diario de 25-30 metros cúbicos de material triturado.

Esta investigación se encuentra enfocada principalmente hacia el agregado grueso de la formación geológica en estudio, la cual fue visitada por el equipo de investigación, caracterizada y muestreada durante un período de 6 meses.

Para aumentar la confiabilidad en las mezclas de concreto y teniendo en cuenta la poca variabilidad que debe presentar respecto a sus propiedades, el agregado fino fue caracterizado para seleccionar muestras que presenten propiedad módulo de finura apta para la elaboración de concreto.

Como base para la caracterización de los agregados (finos y gruesos) se determinaron propiedades físico-mecánicas de mayor importancia (tabla 1) y para la consecución de los cilindros de concreto se realizan pruebas respectivas sobre cemento y concreto, basados en procedimientos descritos en ICONTEC[5] y normas técnicas INV.E del Instituto Nacional de Vías y Transporte [6]. La ejecución de ensayos se realizó en 18 meses (Abril de 2008-Diciembre 2009). En la tabla 1, se describe los ensayos realizados y su respectiva norma.

La parte correspondiente a resistencia mecánica del concreto, fue trabajada para lograr 2 niveles básicos. Una etapa inicial de 280 kg/cm^2 , y un segundo nivel de 350 kg/cm^2 en cada agregado. Para ello, se desarrollaron 30 diseños de mezcla con igual número de optimizaciones granulométricas. Una dosificación para cada muestra de agregado grueso, en ambas resistencias.

Se define el método para el diseño de mezcla y dosificación de concreto para las resistencias establecidas a 280 y 350 Kg/cm^2 para la elaboración de cilindros de 6"x15", apoyados por la Norma Sismo Resistente NSR-98, posteriormente NSR-10 [7] para determinar la resistencia promedio requerida a la compresión. En ausencia de datos previos de resistencias con estos agregados se siguió lo determinado por la NSR-10, Tabla C.5-3.2, en la cual se establecen las resistencias de diseño para cuando no existen datos que permitan determinar la desviación estándar.

En la primera etapa de resistencia promedio requerida de 280 Kg/cm^2 se consiguen niveles de $f'c$ desde 229,1-308,7 kg/cm^2 [1]. En este nivel se manejan mezclas con una relación A/C de 0.45.

En la segunda etapa, las resistencias a compresión se localizan dentro del intervalo 230,6-290,9 kg/cm^2 . En esta etapa la relación A/C toma valor de 0.375, situación de dificultad para el adecuado desarrollo de la trabajabilidad. Jaramillo [8], encuentra relación agua/cemento mínima de 0,35 para concretos de peso normal.

Tabla 1. Ensayos realizados y normas técnicas empleadas.

| Ensayos para determinar propiedades físicas en agregados | |
|---|-------------------------------------|
| Tamaño | NORMA |
| Granulometría para agregado fino y grueso | INV E 213 - NTC 77 |
| Peso específico en agregado fino | |
| Peso específico: aparente, aparente (s.s.s.) y nominal. | INV E 222 |
| Absorción (%) | |
| Peso específico en agregado grueso | |
| Peso específico: aparente, aparente (s.s.s.) y nominal. | INV E 223-NTC 176 |
| Absorción (%) | |
| Índice de aplanamiento (%). Sólo en agregado grueso | INV E 230 |
| Índice de alargamiento (%). Sólo en agregado grueso | |
| Peso unitario | |
| Peso unitario (kg/m ³): suelto y compacto | INV E 217 - NTC 92 |
| % Vacíos de los agregados: sueltos y compactos | |
| Contenido de materia orgánica | INV E 212 |
| Ensayos para determinar propiedades mecánicas en agregado grueso | |
| Coefficiente de friabilidad (%) | UNE 83115. INV E 229 (edición 2002) |
| Ensayos para determinar propiedades físicas en el cemento | |
| Peso específico del cemento hidráulico | INV E 307 |
| Ensayos para determinar propiedades físicas en concreto | |
| Asentamiento | INVE 404 |
| Elaboración y curado en el laboratorio de muestras de concreto para ensayos de compresión | INVE 402 |
| Refrendado de cilindros de concreto | INVE 403 |
| Ensayos para determinar propiedades mecánicas en concreto | |
| Resistencia a la compresión | INVE 410-NTC 673 |

Fuente: [5] y [6].

A. Procesamiento y análisis de la Información

La información recolectada de las muestras de agregado fino y grueso, cemento y concreto fue codificada y tabulada en una hoja de cálculo. Los datos y variables objeto de estudio fueron exportados al programa estadístico INFOSTAT [8] y R [9] para su descripción y análisis.

B. Análisis Estadístico

Primero, se realizó análisis univariado [10], a partir de los datos se realizaron estadísticas descriptivas (medidas de tendencia central y dispersión) y estadística inferencial (intervalos de confianza y prueba de hipótesis) de parámetros físico-mecánicos, y curva granulométrica en agregados finos y gruesos.

Segundo, se hicieron análisis descriptivos multivariados para: Relacionar variables físico-mecánicas de agregados gruesos (Análisis en componentes principales, clasificación jerárquica; [11], [12] y [13]); Y, marco de comportamiento entre variables físico-mecánicas de los agregados y su influencia en las características del concreto que se produce en el departamento de Sucre (Análisis de regresión logística; [14]).

Para ejecutar el análisis estadístico se utilizó software R [9], los paquetes *ade4* [15] y *FactoClass*[12].

III. RESULTADOS

La forma de extracción influye principalmente en la granulometría, la forma y la limpieza de los áridos y por consiguiente en los resultados de algunos ensayos de caracterización física y mecánica.

A. Resultados físicos

Análisis de curvas granulométricas y propiedades físicas en agregado fino. Haciendo referencia a la granulometría recomendada para agregado fino de la norma ICONTEC 174 (ASTM 33), se presentan las gráficas granulométricas de las 4 muestras de las muestras obtenidas en una sola fuente que cumplen los parámetros de módulo de finura de manera conjunto con los requisitos granulométricos (Figura 2).

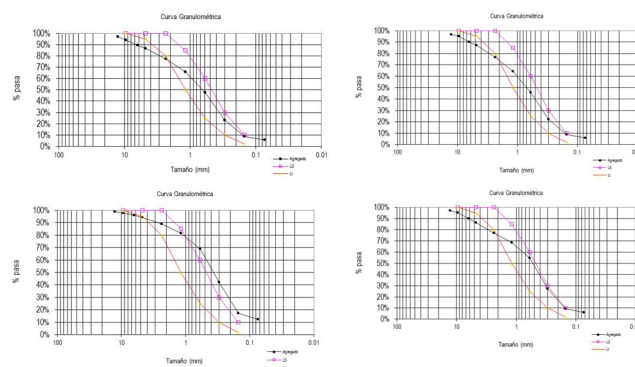


Figura 2. Granulometría de las muestras de arena que cumplieron parcialmente la norma: A01, A02, A04 y A05.

El análisis granulométrico realizado a las muestras de arena seleccionadas, registra una pequeña porción de partículas con tamaño máximo de 1/2” y 3/4”, las cuales son catalogadas como partículas de agregado grueso; ésta situación altera un poco los máximos límites granulométricos para agregado fino.

En los resultados se registra un pasa 200 con media de 6.2%, valor superior al recomendado por la norma ICONTEC177 (no debe superar 5%). El peso específico de la arena tuvo media de 2.6 y absorción 1.7%, aceptables para su uso en concreto (La norma NTC 237 especifica rangos aceptables, 0-3 para peso específico y 0-10 para absorción).

Los datos de peso unitario suelto deben presentar un valor alrededor de 1600kg/m³, el valor encontrado fue por debajo (1531.4 kg/m³). Los resultados de materia orgánica para la arena fueron negativos, demostrándose una arena limpia, libre de impurezas y apta para la producción de concreto.

Curva granulométrica para agregado grueso. Se presenta la curva granulométrica respecto a tamaños medios, de acuerdo con tamaños nominales de la norma ICONTEC-174 (ASTM 33), incluyendo límites superior e inferior (Figura 3). La granulometría y el tamaño máximo del agregado (TMA) para las gravas, afectan las porciones relativas de los agregados, así como los requisitos de agua y cemento, la trabajabilidad, la economía y la durabilidad del concreto [16].

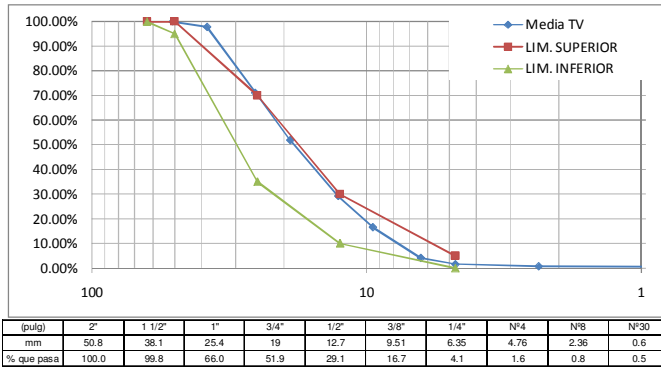


Figura 3. Granulometría Media. Formación geológica Toluvejo Vs Norma NTC 174.

Lo más destacable de la granulometría de agregado grueso, es la diferencia que existe en los tamaños de 3/4" en adelante, respecto al porcentaje pasa, la muy baja proporción de tamaños de 1/2" y 1" en la piedra triturada, con uno de los valores más altos de desviación estándar (8.6 en tamaño 1"). El agregado no tiende a encajar a la granulometría recomendada por la norma ICONTEC-174. Nuestro objetivo, no es encontrar la granulometría ideal, sino obtenerla mediante análisis y optimización acorde a requerimientos granulométricos para concreto.

B. Caracterización físico-mecánica en agregado grueso.

La roca de la formación geológica Toluvejo es una caliza más blanca, el agregado presenta mayor número de caras y forma más redondeada; estos aspectos son subjetivos por proceder de la simple observación (Figura 4).



Figura 4. Agregados de la formación geológica Toluvejo.

Análisis de datos univariado

Se calcularon sobre los datos de las muestras seleccionadas de agregados gruesos extraídos de la formación geológica Toluvejo, las medidas estadísticas resumen (Tabla 2) que permitieron detectar, en principio, las tendencias centrales y de dispersión de cada una de las variables físico-mecánicas evaluadas: Peso Específico Aparente (PEA), Peso Específico Aparente Saturado Superficialmente Seco (PEA SSS), Peso Específico Nominal (PEN), porcentaje de Absorción (ABS), Índice de Aplanamiento (I.APL), Índice de Alargamiento (I.ALARG), Peso Unitario Suelto (PUS), Peso Unitario Compacto (PUC), porcentaje de vacíos suelto (%VS), porcentaje de vacíos compacto (%VC) y coeficiente de Friabilidad (FRIAB).

Tabla 2. Resultado estadísticos descriptivos e Intervalos de Confianza del 95% para propiedades físico-mecánicas.

| Variable | Media | D.E. | CV | Rango | As | K | IC 95% |
|------------|-------|-------|-------|------------|-------|-------|-----------|
| PEA | 2.48 | 0.07 | 2.96 | 2.26- 2.57 | -1.89 | 5.51 | 2.44-2.52 |
| PEA.S | 2.55 | 0.07 | 2.61 | 2.33-2.61 | -2.62 | 8.53 | 2.51-2.58 |
| PEN | 2.66 | 0.06 | 2.40 | 2.43- 2.70 | -3.59 | 13.40 | 2.62-2.69 |
| ABS | 0.03 | 0.01 | 20.06 | 0.02- 0.04 | -0.86 | 0.20 | 0.02-0.03 |
| I.APL | 0.25 | 0.04 | 14.62 | 0.21- 0.33 | 0.47 | -0.71 | 0.23-0.27 |
| I.ALARG | 0.47 | 0.04 | 8.72 | 0.39- 0.52 | -0.79 | -0.43 | 0.45-0.49 |
| PUS | 1327 | 33.88 | 2.55 | 1281-1388 | 0.35 | -1.08 | 1308-1345 |
| PUC | 1470 | 29.77 | 2.03 | 1407-1533 | 0.23 | 1.43 | 1453-1486 |
| %VS | 0.46 | 0.02 | 3.53 | 0.43-0.49 | -0.40 | 0.06 | 0.46-0.47 |
| %VC | 0.41 | 0.02 | 4.22 | 0.35-0.43 | -2.37 | 7.81 | 0.40-0.42 |
| FRIAB. (%) | 0.32 | 0.02 | 6.80 | 0.29- 0.36 | 0.26 | -0.78 | 0.31-0.33 |

La forma de las partículas de la trituradora muestra un valor alto (47% promedio) para el índice de alargamiento (I.ALARG.); el índice de aplanamiento (I.APL) es mucho menor de lo reportado (25).

La densidad presente en el agregado se encuentra evaluada por las propiedades del Peso Específico: Aparente (PEA), Aparente Saturado Superficialmente Seco (PEA SSS) y Nominal (PEN). Estas propiedades muestran aceptabilidad para valores propios de densidad en calizas (2.5-2.8).

Es claro que mientras más denso sea el agregado tendrá menos vacíos en su interior, haciéndolo más compacto, macizo y resistente, reflejado en el ensayo de absorción (ABS).

El peso unitario para agregados calizos tiene un rango de 1300-1600 kg/m³. Los valores obtenidos en el ensayo, con peso unitario suelto (PUS) de 1327 kg/m³ y peso unitario compacto (PUC) de 1470 kg/m³, encajan dentro del rango establecido; por tal razón, nos encontramos frente a un agregado de peso normal para la producción de concreto.

La prueba de resistencia mecánica del agregado en el ensayo de coeficiente de friabilidad (%FRIAB.) es una base para tener un estimativo del comportamiento mecánico del agregado en el concreto, el agregado desarrolla la resistencia a la compresión como lo haría en el concreto en condiciones de uso. El resultado de friabilidad obtenido es de 32% para el agregado de la formación Toluvejo.

Análisis de datos multivariado

En un análisis multivariado se intenta comprender las relaciones entre las variables con el objetivo de describir la formación geológica Toluviejo a través de la información proporcionada por todas las variables físico-mecánicas.

Por las características y por la cantidad de variables relevadas se considera adecuado, a los fines descriptivos, realizar los siguientes análisis: Análisis de Clúster Jerárquico (Figura 5) y Análisis en Componentes Principales (Figura 6).

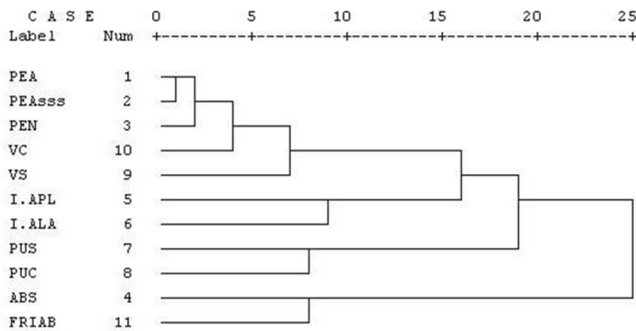


Figura 5. Dendograma (agrupamiento inter-grupos y distancia de Pearson).

El método de medición de distancias de Pearson (Figura 5), muestra que PEA y PEA SSS mantienen una estrecha correlación entre ellas, su similitud es 0,989 y en un segundo nivel de agrupación las dos variables anteriores con la variable PEN presentan una similitud de 0,895; la fluctuación de las variables PEA, PEA SSS y PEN está íntimamente relacionada, sin embargo se debe evaluar en qué grado estas se relacionan con las demás propiedades y el conjunto de estas con la resistencia a la compresión del concreto.

En el análisis en componentes principales (Figura 6), el primer plano explica el 71.7% del total (primer eje, 44.7%; segundo eje, 27,0%). Los valores propios sugieren una buena síntesis con dos ejes. Por esta razón, podemos concentrar la atención en el análisis del primer plano factorial: *El primer eje*. Tiene una correlación fuerte con Peso Específico Aparente (-0.99), Peso Específico Aparente Saturado Superficialmente Seco (-0.97), Peso Específico Nominal (-0.79) y correlación menos fuerte con porcentaje de vacío suelto (-0.61); *El segundo eje*. Tiene una correlación no muy fuerte con Peso Unitario Suelto (0.56), Peso Unitario Compacto (0.50) y coeficiente de Friabilidad (-0,43).

Según el primer componente, en la medida en que los pesos específicos aumentan la absorción y la friabilidad disminuyen, y aunque estos principios son por todos conocidos, también expresan la ratificación matemática del comportamiento entre las propiedades físicas del agregado expuesto en el modelo planteado por esta primera componente.

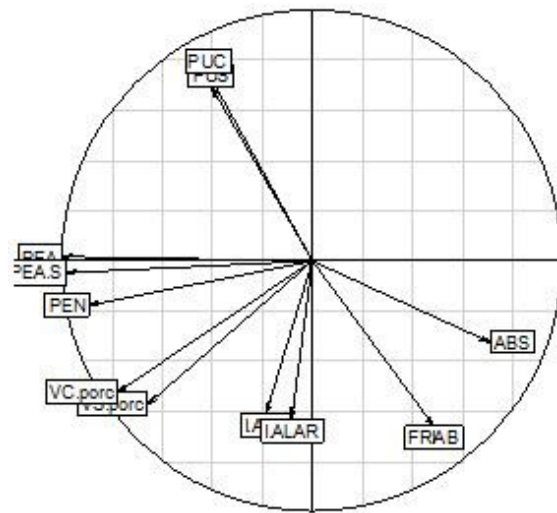


Figura 6. Plano factorial 1-2: Análisis en componentes principales de variables físico-mecánicas.

Los agrupamientos de las variables nos concluyen sobre el efecto combinatorio entre las más cercanas y su influencia sobre la variación del componente principal. De esta manera es necesario tomar como mínimo 2 variables a fin de obtener ubicación de cada una respecto de cada componente, tomando sólo los dos primeros. Para este análisis se toman las propiedades Peso Específico Aparente (PEA) y Peso Específico Nominal (PEN).

C. Influencia de los agregados pétreos en las propiedades del concreto

Después de realizar los ensayos para caracterizar los agregados de la formación geológicas Toluviejo, y el agregado fino procedente del arroyo el Piñal, se procede a efectuar los diseños de mezcla.

Diseño de mezclas y resistencia a la compresión de cilindros.

Dado que las granulometrías del agregado grueso y fino no cumplieron los requerimientos de la norma ICONTEC 174 (ASTM-C33), se utilizan parámetros correspondientes a la optimización granulométrica analítica, teniendo en cuenta los rangos granulométricos recomendados por el Road Note Laboratory. Para esto se tomaron 4 muestras (Figura 2) de arena que cumplieron la norma, se procedió a realizar diseños de mezcla y elaboración de cilindros de concreto. Las optimizaciones granulométricas dadas presentan una media de 60% en agregado grueso y 40% en fino para la formación Toluviejo.

En el momento de la fabricación de los cilindros se implementa el procedimiento para determinar el asentamiento de la masa de concreto fresco (Norma INVE 404). Ninguna muestra logra un asentamiento adecuado, registrando valores alrededor de 2 cm.

Para la Compresión de cilindros de concreto, se muestran los resultados estadístico descriptivos para las resistencias a compresión obtenida para 280 y 350 kg/cm².

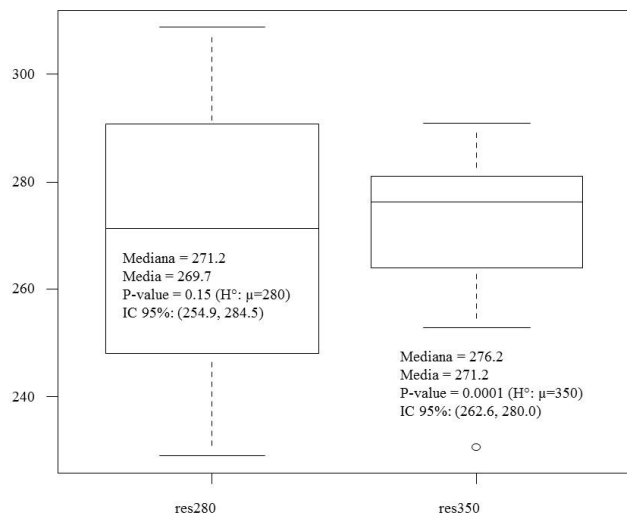


Figura6. Estadística descriptiva, boxplot y prueba de hipótesis para la resistencia a la compresión.

Los boxplot permiten ver claramente el comportamiento estadístico de las resistencias alcanzadas; los valores máximos y mínimos, los percentiles y la mediana. Para la resistencia de 280 kg/cm² no se presenta casos en los que toman valores que se desplacen de forma vertical respecto a la mediana de forma extraña, mientras que para la resistencia de 350 kg/cm² sí se presentan como se puede notar en la figura 6. Es definitivo el hecho de que para 350 kg/cm² no se presentan casos exitosos de resistencia.

Con las pruebas de compresión de cilindros de concreto concluye la parte descriptiva de esta investigación. La mezclas de concreto realizadas presentaron un bajo grado de trabajabilidad, más para los diseños de 350 kg/cm², dada la baja relación agua/cemento presente, se recuerda que para diseños de 280 kg/cm² es de 0.4 y para diseños de 350 kg/cm² de 0.375.

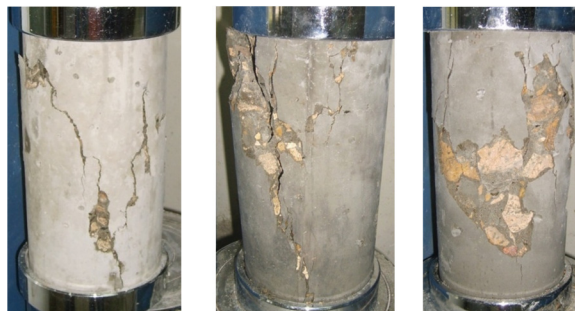
En la figura 7, se muestran los cilindros de concreto y los ensayos a compresión realizados.

A pesar de las dificultades en la preparación de las mezclas, de los 15 casos ensayados para diseños a 280 kg/cm² el 33.3% son exitosos.

Las dosificaciones promedios requeridas para la obtención de estas resistencias presentan en la tabla 6.



Cilindros de concreto



Cilindros de concreto ensayados a compresión

Figura 7. Cilindros de concreto para el presente estudio.

Tabla 6. Dosificación para producir 1m³ de concreto en diseños de 280 y 350 kg/cm²

| | Masa W (kg) | | Densidad D (kg/m ³) | | Volumen V (m ³) | |
|---------|----------------|--------|------------------------------------|--------|--------------------------------|------|
| Cemento | 437.5 | 437.6 | 3046.7 | 3061.7 | 0.14 | 0.14 |
| Grava | 1000.9 | 1029.7 | 2479.5 | 2546.6 | 0.40 | 0.40 |
| Arena | 687.3 | 688.8 | 2567.2 | 2566.5 | 0.27 | 0.27 |
| Agua | 175.0 | 174.7 | 1000.0 | 1000.0 | 0.18 | 0.18 |
| Aire | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.01 | 0.01 |
| Total | 2300.7 | 2330.8 | | | 1.0 | 1.0 |

Fuente: desarrollada por autores.

Resistencia a compresión de los cilindros de concreto medida a los 28 días, RESCC.

Para realizar el análisis de regresión se hace necesaria la incorporación de la resistencia a compresión de los cilindros de concreto medida a los 28 días (RESCC). Se considera que las variables influirán de manera efectiva en la resistencia del concreto cuando el valor de la variable RESCC tome valor de éxito por encima de un valor de referencia dado.

Los resultados estadísticos descriptivos presentes anteriormente en la compresión de cilindros de concreto indican que solo los diseños para 280 kg/cm² lograron acercarse y superar la resistencia propuesta, de tal manera que presentan probabilidad de evento resistente.

Se crea una variable categórica a partir de la resistencia. De producirse el evento resistente, la nueva variable cualitativa de tipo dependiente, EXIT, tomará valor 1 si supera 280 kg/cm², caso contrario toma valor cero (0).

Las propiedades que hacen parte del proceso de regresión logística son: peso específico (aparente, saturado superficialmente seco, nominal), absorción, índice de aplanamiento y de alargamiento, peso unitario suelto y compacto, porcentaje de vacíos suelto y compacto, coeficiente de friabilidad FRIAB y pasa doscientos P200. Se incluye P200, según Sánchez (2001) ésta, como las demás, incide en la resistencia a la compresión del concreto.

La regresión se modelará mediante el procedimiento de Wald [14], hacia delante usando la herramienta de regresión logística binaria en la que se descartaran variables que no contribuyen al resultado de evento exitoso.

El siguiente es el modelo definitivo de la regresión logística:

$$P(f'_c > 280 \frac{kg}{cm^2}) = \frac{e^{(23,584 - 22,428 * I.APL - 58,601 * FRIAB)}}{1 + e^{(23,584 - 22,428 * I.APL - 58,601 * FRIAB)}}$$

Las variables que tienen incidencia en el evento exitoso de resistencia son I.APL y FRIAB. Es interesante detallar las variables predictores en este modelo, la propiedad índice de aplanamiento hace parte de las características en cuanto a forma del agregado, mientras que el coeficiente de friabilidad recopila las características en cuanto a estructura interna del mismo como lo son peso específico y absorción, determinando la dureza y resistencia del material, destacándose en los Análisis de Clúster Jerárquico (Figura 5) y Análisis de Componentes Principales (Figura 6).

A partir de esta modelaciones fueron determinadas las variaciones de probabilidad de evento exitoso de resistencia frente a la variabilidad del índice de aplanamiento IAP y del valor de la friabilidad FRIAB

Para el caso del índice de aplanamiento se relaciona la siguiente construcción, con valores de máxima probabilidad en valores de IAP menores al 20%.

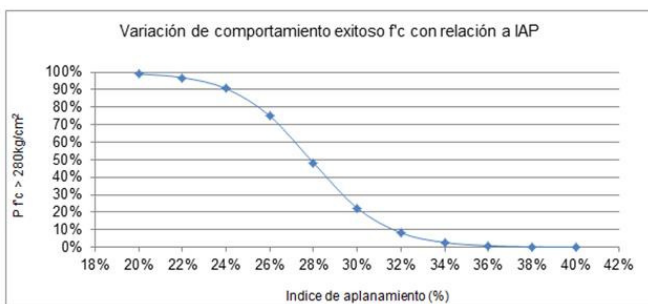


Figura8. Variación de comportamiento exitoso con relación a Índice de aplanamiento.

Para el caso de friabilidad se relaciona la figura 9, con valores de máxima probabilidad en valores de FRIAB menores al 15%.

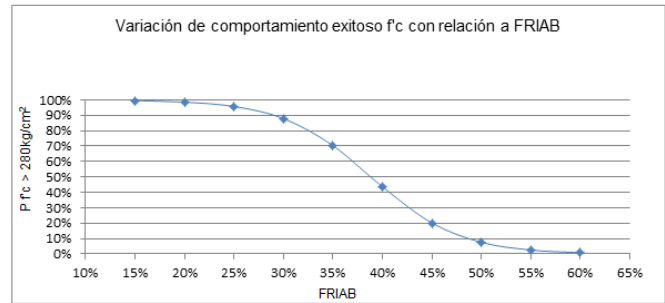


Figura9. Variación de comportamiento exitoso con relación a friabilidad

IV. CONCLUSIONES

- ✓ El agregado producido en la formación Tolviejo utilizado en esta investigación y su granulometría promedio no está dentro de los límites granulométricos establecidos por la norma NTC. 174 especificaciones para los agregados para hormigón.
- ✓ Existe cercanía dimensional entre variables que conforman las componentes principales de la formación Tolviejo. Los pesos específicos (aparente, saturado superficialmente seco, nominal) mantienen una alta similitud respecto a las demás variables del grupo.
- ✓ Bajo las condiciones de diseño de mezclas de concreto de forma normal, evaluando las características de los agregados usados, sin adiciones que alteraran sus propiedades, solo fue posible alcanzar la resistencia propuesta para los diseños de 280 kg/cm². Para los diseños de 350 kg/cm² no se logró en ninguno de los casos la resistencia propuesta.
- ✓ Concretos producidos con agregados procedentes de las trituradora en estudio en los que se utilicen relaciones agua/cemento menores a 0.4 presentan baja trabajabilidad afectando la colocación y por consiguiente una disminución en el grado de compactación de la mezcla, manifestando porosidad en el concreto.
- ✓ Las variables predictores para la producción exitosa de concreto de 280Kg/cm² fabricado en condiciones normales son: coeficiente de friabilidad e índice de aplanamiento.
- ✓ La producción de concreto con agregados gruesos de la formación Tolviejo, con valores de Índice de aplanamiento menores a 25% y coeficiente de friabilidad menores a 30% garantizan probabilidades superiores a 85% para la producción de concreto para 280Kg/cm² sin uso de aditivos.

REFERENCIAS

- [1]. A. J. Bracamonte, "Técnicas y análisis para la caracterización físico-mecánica de agregados gruesos, estudio de las formaciones geológicas Tolúviejo y San Cayetano", Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Master's dissertation, 2007.
- [2]. R. Barrera and J. Calvijo, "Geología de las planchas 44 Sincelejo y 52 Sahagún", Instituto de Geología y Mineralogía de Colombia (INGEOMINAS), Bogotá, 2001.
- [3]. R. Barrera, "Geología del Departamento de Sucre. Mapa 25", Instituto de Geología y Mineralogía de Colombia (INGEOMINAS), Bogotá, 1999.
- [4]. A. M. Neville, "Tecnología del concreto," Instituto Mexicano del cemento y del concreto, México, p. 163, 1999.
- [5]. Normas NTC del Instituto Colombiano de Normas Técnicas ICONTEC, NTC 77, 92, 174, 176, 473, UNE 83115. 2012.
- [6]. Normas técnicas INV.E del Instituto Nacional de Vías y Transporte INVIAS, INV. E-201,213, 217, 222,223, 229,230, 307, 402, 403, 404,410. 2012.
- [7]. Norma colombiana de diseño y construcción sismo resistente NSR-98. "Reglamento Colombiano de Construcción Sismo - Resistente *NSR-10*", Colombia, 1998.
- [8]. Di Rienzo, J.A., et al., *InfoStat versión 2011*. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. , 2011.
- [9]. R Development Core Team. *R: A language and environment for statistical computing*, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, 2012.*<http://www.R-project.org>.
- [10]. R. Walpole and R.H. Myers, "Probabilidad y Estadística". Editorial Mc. Graw Hill, 1997.
- [11]. L. Lebart, A. Morineau and M.Piron, "Statistique exploratoire multidimensionnelle", Dunod, Paris, 1995.
- [12]. C. E. Pardo and P.C. Del Campo, "Combinación de métodos factoriales y de análisis de conglomerados en R: el paquete FactoClass", Revista Colombiana de Estadística, Vol. 30, 2007.
- [13]. M. Vertel and C.-E. Pardo, 'Comparación entre el análisis canónico de correspondencias y el análisis factorial múltiple en tablas de frecuencias-variables continuas', Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, Master's dissertation, 2010.
- [14]. L.G. Díaz and M. Morales, *Análisis Estadístico de Datos Categóricos*. Editorial Universidad Nacional de Colombia, 2009.
- [15]. D. Chessel, J.Thioulouse and A. Dufour, "ADE4: Analysis of Environmental Data: Exploratory and Euclidean method Multivariate data analysis and graphical display", Lyon, France, 2005.
- [16]. J. L. Chan, R. Solís and E. I. Moreno, "Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto", *Rev. Ingeniería*, Vol. 7 (2), p. 39-46, México, 2003.