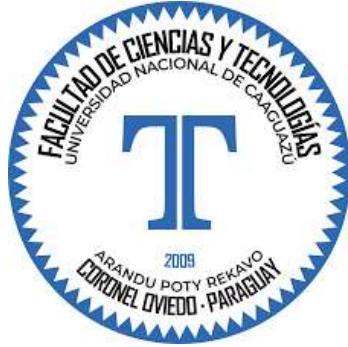


**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAAGUAZÚ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIAS**  
**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**



**“ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA DEL HORMIGÓN A  
COMPRESIÓN MEDIANTE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES”**

**Elaborado por**

**FRANCO EMANUEL GONZÁLEZ BARRETO**  
**AILTON ALEXIS ZEVALLOS CHAPARRO**

**Tutor**

**Prof. Msc. Ing. Fredy Gabriel Ramírez Villanueva**  
Coronel Oviedo - Paraguay

Año 2022

## PÁGINA DE APROBACIÓN

Trabajo de fin de grado para la obtención del Título de Ingeniera Civil aprobado en representación de la Facultad de Ciencias y Tecnologías de la Universidad Nacional de Caaguazú, por el tribunal Examinador constituido por los siguientes profesores:

---

Prof. Ing.

---

Prof. Ing.

---

Prof. Ing.

Acta N.º: \_\_\_\_\_

Fecha: \_\_\_\_\_

Calificación Obtenida: \_\_\_\_\_

## **DEDICATORIA:**

A Dios todo poderoso, por regalarme el milagro de la vida y permitirme disfrutar de estos logros que con sin su bendición, no lo podría lograr.

A mis padres, Vicente y Elsi, que me apoyaron durante todo el proceso de mi formación en la facultad, económicamente y emocionalmente, aconsejándome sobre las decisiones correctas que debo tomar, pero principalmente sobre los valores que debo tener como ser humano.

A mis hermanos, Juan, Belén, e Iván, que me apoyaron y acompañaron en todo momento para lograr este objetivo en mi vida.

**Franco Emanuel González Barreto**

## **DEDICATORIA**

A Dios por permitirme llegar hasta este punto brindándome la perseverancia, inteligencia, salud y todo lo que fuese necesario en todo este proceso.

A mis padres, Cipriano y Norma, por el apoyo en todo, comprensión, ayuda y guía dentro y fuera de la carrera, sin dudas, sin ellos hubiese sido imposible.

A mi hermana, Milagro, por tenerme paciencia y ayudarme en todo lo que ella podía.

**Ailton Alexis Zevallos Chaparro**

## **AGRADECIMIENTOS:**

A Dios todo poderoso por darnos la inteligencia suficiente, salud y perseverancia para lograr este proyecto.

A nuestros Padres por acompañarnos y brindarnos la oportunidad de estudiar esta carrera

A la Facultad de Ciencias y Tecnologías de la Universidad Nacional de Caaguazú, por ofrecer la opción de estudiar la maravillosa carrera de Ingeniería Civil, juntos con sus directivos y excelentes docentes.

Al Ingeniero Fredy Gabriel Ramírez Villanueva, quien fue nuestro mentor para realizar este proyecto, y por el acompañamiento constante desde el día 0 con sus consejos y conocimientos.

A nuestros compañeros de la Facultad, Fabio, Marcos, Madeleine, Esteban y Osmar, por brindarnos su ayuda en los momentos necesarios.

# “ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA DEL HORMIGÓN A COMPRESIÓN MEDIANTE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES”

FRANCO EMANUEL GONZÁLEZ BARRETO  
AILTON ALEXIS ZEVALLOS CHAPARRO

## RESUMEN

En el presente proyecto se analiza los valores de la resistencia a compresión axial del hormigón con diferentes dosificaciones y la correlación que esta tiene con una imagen correspondiente a su sección transversal utilizando la técnica de procesamiento de imágenes. Para ello se realizaron doce dosificaciones donde varía la relación agua/cemento y la proporción del cemento, manteniendo constante la proporción de áridos gruesos y áridos finos. Para cada dosificación se prepararon 3 muestras cilíndricas (probetas), superando el mínimo de dos especímenes establecidos en la norma ACI 318-19, con el objetivo de obtener un resultado más confiable.

Las muestras fueron curadas en agua por 28 días, al alcanzar esa edad, se ha realizado un corte transversal a una distancia de 2cm de la cara inferior de la muestra, a dicho corte se le ha capturado una imagen mediante una cámara fotográfica profesional, luego la misma muestra fue trasladada hasta el laboratorio para realizar el ensayo de compresión axial con la prensa hidráulica, para la determinación de su resistencia.

De esta manera se obtuvieron todos los datos para iniciar con el procesamiento de imágenes, análisis y finalmente definir el nivel de correlación de las misma con respecto a su resistencia de compresión axial.

### Palabras claves:

- Hormigón
- Dosificación
- Ensayo
- Imagen

# **“ANALYSIS OF THE CONCRETE RESISTANCE TO COMPRESSION THROUGH IMAGE PROCESSING”**

**FRANCO EMANUEL GONZÁLEZ BARRETO  
AILTON ALEXIS ZEVALLOS CHAPARRO**

## **ABSTRACT**

In the present project, the values of the resistance to axial compression of the concrete with different dosages and the correlation that this has with an image corresponding to its transversal section using the image processing technique are analyzed. For this, twelve dosages were made where the water/cement ratio and the cement varied, keeping the proportion of coarse aggregates and fine aggregates constant. For each dosage, 3 cylindrical samples (test tubes) were prepared, exceeding the minimum of two specimens established in the ACI 318-19, in order to obtain a more reliable result. The samples were cured in water for 28 days, upon reaching that, a cross section has been made at a distance of 2cm from the underside of the old sample, an image has been captured of said cut using a professional camera, then the same sample was transferred to the laboratory to carry out the axial compression test with the hydraulic press, to determine its resistance.

In this way, all the data was obtained to start with the image processing, analyze and finally define the level of their connection with respect to their axial compression resistance.

### **Keywords:**

- Concrete
- Dosage
- test
- Image

## INDICE

<b>1. CAPITULO I: GENERALIDADES</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 INTRODUCCION</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b> .....	<b>2</b>
<b>1.3 JUSTIFICACIÓN</b> .....	<b>3</b>
<b>1.4 OBJETIVOS</b> .....	<b>4</b>
<b>1.4.1 Objetivo General</b> .....	<b>4</b>
<b>1.4.2 Objetivo Especifico</b> .....	<b>4</b>
<b>2. CAPITULO II: MARCO TEORICO</b> .....	<b>5</b>
<b>2.1 CONCEPTO DE HORMIGÓN</b> .....	<b>5</b>
<b>2.2 COMPONENTES DEL HORMIGÓN</b> .....	<b>5</b>
<b>2.2.1 Cementos</b> .....	<b>5</b>
<b>2.2.2 Agregados para el Hormigón</b> .....	<b>6</b>
<b>2.2.3 Aditivos</b> .....	<b>8</b>
<b>2.2.4 Agua</b> .....	<b>8</b>
<b>2.3 Ensayos del Hormigón</b> .....	<b>9</b>
<b>2.3.1 Preparación de especímenes:</b> .....	<b>9</b>
<b>2.3.2 Método de Ensayo para revenimiento del concreto de cemento                 hidráulico - cono de Abrams</b> .....	<b>10</b>
<b>2.3.3 Ensayo de resistencia a compresión</b> .....	<b>11</b>
<b>2.4 Procesamiento de Imágenes</b> .....	<b>13</b>
<b>2.4.1 Concepto de procesamiento de imágenes</b> .....	<b>13</b>
<b>2.4.2 Pixel o Pixeles</b> .....	<b>13</b>
<b>2.4.3 Tamaño de una Imagen</b> .....	<b>13</b>
<b>2.4.4 Sistema de Coordenadas de una Imagen</b> .....	<b>13</b>
<b>2.4.5 Valores de un Pixel</b> .....	<b>13</b>
<b>2.4.6 Imágenes en Escala de Grises</b> .....	<b>15</b>
<b>2.4.7 Imágenes Binarias</b> .....	<b>15</b>
<b>2.4.8 Imagen a Colores</b> .....	<b>15</b>
<b>2.4.9 Formato de archivo de Imágenes</b> .....	<b>16</b>

2.5	Regresión Lineal.....	16
2.6	Análisis de Componente Principales (PCA).....	17
2.6.1	Definiciones importantes del Algebra lineal.....	17
2.6.2	Definiciones importantes de la Probabilidad y estadística .....	19
2.6.3	Análisis de Componentes Principales .....	20
2.7	Redes neuronales artificiales .....	21
2.7.1	Concepto .....	21
2.7.2	Perceptrón .....	21
2.7.3	Perceptrón multicapa .....	22
3	CAPITULO III: ANALISIS DE MATERIALES.....	27
3.1	Materiales Utilizados .....	27
3.2	Cemento .....	27
3.3	Agregado fino .....	27
3.4	Agregado Grueso .....	29
4	CAPÍTULO IV: PREPARACIÓN DEL HORMIGÓN.....	33
5	CAPITULO V: FOTOGRAFÍAS .....	36
6	CAPITULO VI: ENSAYOS.....	38
7	CAPÍTULO VII: PROCESAMIENTO DE IMÁGENES.....	39
7.1	Tratamientos previos .....	39
7.2	Datos de la Imagen.....	40
7.2.1	Área de la triturada .....	40
7.2.2	Histogramas .....	41
7.2.3	Ubicación del tono con más frecuencia en el espacio RGB .....	47
8	CAPÍTULO VIII: ANÁLISIS DE DATOS Y ECUACIONES DE APROXIMACIÓN .....	49
8.1	Datos extraídos de la imagen .....	49
8.1.1	Correlación entre datos de la imagen .....	50
8.1.2	Resistencias Estimadas con dos Componente Principales con los datos filtrados de la imagen.....	52
8.1.3	Resistencias Estimadas sin utilizar componentes principales.....	53
8.2	Datos filtrados de la imagen y datos externos a la imagen .....	54
8.2.1	Correlación entre los datos de la imagen y los datos externos a la imagen .....	55

8.2.2	Resistencia Estimadas con cuatro componentes principales con los datos de la imagen y los datos externos a la imagen.....	57
8.2.3	Resistencia Estimadas sin componentes principales con los datos de la imagen y los datos externos a la imagen .....	58
8.3	Diagrama de Flujo para determinar la mejor correlación muestral.....	60
8.4	Análisis de datos mediante redes neuronales .....	62
8.4.1	Regresión Lineal entre la resistencia predicha y la resistencia correcta mediante redes neuronales.....	62
9	CAPITULO IX: CONCLUSIONES .....	64
10	CAPITULO X: RECOMENDACIONES .....	65
11	CAPITULO XI: ANEXOS .....	66
11.1	Imagen sin fondo de las probetas.....	66
11.2	Imágenes binarias de las muestras para determinar el área de la triturada .....	69
12	CAPITULO XII: BIBLIOGRAFÍA .....	72

## Índice de Ilustraciones

<b>Ilustración 1</b> - RGB como cubo unitario. Fuente: Digital Image Processing segunda edición.....	15
<b>Ilustración 2</b> - Arquitectura de un perceptrón con dos entradas y una salida. Fuente: Elaboración propia.....	22
<b>Ilustración 3</b> - Arquitectura de Perceptrón Multicapa. Fuente Elaboración propia .....	23
<b>Ilustración 4</b> - Cemento Portland IV Vallemi. Fuente: inc.gov.py.....	27
<b>Ilustración 5</b> - <i>Recolección de agregado fino</i> .....	28
<b>Ilustración 6</b> - Secado de agregado fino .....	28
<b>Ilustración 7</b> - Limpieza del agregado fino .....	28
<b>Ilustración 8</b> - Tamizado del agregado fino.....	28
<b>Ilustración 9</b> - Curva granulométrica de agregado fino.Fuente: Elaboración propia .....	29
<b>Ilustración 10</b> – Recolección de agregado grueso en la Cantera 8a de coronel Oviedo.....	30
<b>Ilustración 11</b> - Curva granulométrica de agregado grueso sin compensar. Fuente Elaboración propia.....	31
<b>Ilustración 12</b> - Curva granulométrica de agregado grueso compensada. Fuente Elaboración propia.....	32
<b>Ilustración 13</b> - Ensayo de asentamiento por cono de Abrams. ....	33
<b>Ilustración 14</b> - Hormigón fresco en el molde.....	34
<b>Ilustración 15</b> - Curado del Hormigón por 28 días.....	35
<b>Ilustración 16</b> - Corte de probetas y proceso de pulido. ....	36
<b>Ilustración 17</b> - Cámara canon t7i con su configuración. Fuente: Canon.es .....	36
<b>Ilustración 18</b> - Esquema representativo para capturar la imagen del hormigón. Fuente Elaboración propia.....	37
<b>Ilustración 19</b> - Captura de Imagen de la muestra. ....	37
<b>Ilustración 20</b> - Resultado de la Captura de Imagen de una de las muestras. Fuente: Elaboración propia.....	37
<b>Ilustración 21</b> - Prensa Hidráulica Controls.....	38
<b>Ilustración 22</b> - Resultado de la Resistencia a Compresión por probeta. Fuente propia .....	38
<b>Ilustración 23</b> - Imagen Original en formato .jpeg. Fuente: Elaboración propia .....	40
<b>Ilustración 24</b> - Imagen sin fondo en formato .png. Fuente: Elaboración propia.....	40
<b>Ilustración 25</b> - Imagen reducida en Escala de Grises. Fuente: Elaboración propia.....	40
<b>Ilustración 26</b> - Imagen binaria con $r = 4$ . Fuente: Elaboración propia .....	41
<b>Ilustración 27</b> – Imagen binaria con $r = 11$ . Fuente: Elaboración propia .....	41
<b>Ilustración 28</b> - Imagen binaria con $r=15$ . Fuente: Elaboración propia .....	41
<b>Ilustración 29</b> - Histograma de la triturada en RGB. Fuente: Elaboración propia .....	42
<b>Ilustración 30</b> - Histograma de la triturada en 8 bits. Fuente: Elaboración propia .....	43
<b>Ilustración 31</b> - Histograma de la triturada en 8 bits. Fuente: Elaboración propia .....	44

<b>Ilustración 32</b> - Histograma de la imagen en RGB. Fuente: Elaboración propia.....	45
<b>Ilustración 33</b> - Histograma de la imagen completa. Fuente: Elaboración propia .....	47
<b>Ilustración 34</b> - Valores Característicos vs cantidad de valores característicos. Fuente: Elaboración propia .....	51
<b>Ilustración 36</b> - Valores Característicos de los datos de la imagen y los datos externos a la imagen .....	56
<b>Ilustración 37</b> - Resistencia predicha por el método de la regresión lineal vs Resistencia real. Fuente: Elaboración propia .....	60
<b>Ilustración 38</b> - Diagrama de Flujo para determinar la mejor correlación muestral. Fuente: Elaboración propia .....	60
<b>Ilustración 39</b> - Resistencia (Mpa) vs cada variable de estudio. Fuente: Elaboración propia .....	61
<b>Ilustración 40</b> - Resistencia predicha por el método de las redes neuronales vs Resistencia real. Fuente: Elaboración propia .....	63

## Índice de tablas

<b>Tabla 1</b> - Clasificación comercial de los agregados. Fuente: Mario Servín (2019) .....	7
<b>Tabla 2</b> - Tamaño de tamiz para agregados finos. Fuente: Norma IRAM 1627:1997 .....	7
<b>Tabla 3</b> - Tamaño de tamiz para agregados gruesos. Fuente: norma IRAM 1627:1997 .....	8
<b>Tabla 4</b> - Análisis del agua de amasado y curado. Fuente: Jiménez Montoya (2009) .....	9
<b>Tabla 5</b> - Numero de capas necesarias para la probeta. Fuente: ASTM C 1902 -02.....	10
<b>Tabla 6</b> - Diámetro del pisón y número de golpes que se usan para moldear las probetas de ensayo. Fuentes: ASTM C 1902 -02 .....	10
<b>Tabla 7</b> - Tolerancia de tiempo para realizar rotura según la edad del hormigón. Fuente: ASTM C39/C39 M-01.....	12
<b>Tabla 8</b> - Factor de corrección para relaciones menores a 1.8 entre la altura y el diámetro. Fuente: ASTM C39/C39 M-01 .....	12
<b>Tabla 9</b> - Propiedades de Imágenes en Escala de Grises. Fuente: Digital Image Processing segunda edición (2016).....	14
<b>Tabla 10</b> - Propiedades de Imágenes a Color. Fuente: Digital Image Processing segunda edición (2016) .....	14
<b>Tabla 11</b> - Propiedades de Imágenes Especiales. Fuente: Digital Image Processing segunda edición (2016) .....	14
<b>Tabla 12</b> - pasante agregado fino. Fuente: Elaboración propia.....	29
<b>Tabla 13</b> - pasante agregado grueso, basalto de tamaño Quinta. Fuente: Elaboración propia ...	30
<b>Tabla 14</b> - Pasante de agregado grueso, basalto de tamaño cuarta. Fuente Elaboración propia	32
<b>Tabla 15</b> – valores del asentamiento del cono con su respectiva temperatura ambiente. Fuente Elaboración propia .....	34
<b>Tabla 16</b> - Datos de la triturada en el canal B. Fuente: Elaboración propia .....	42
<b>Tabla 17</b> - Datos de la triturada en 8 bits. Fuente: Elaboración propia .....	43
<b>Tabla 18</b> - Datos de la pasta en 8 bits. Fuente: Elaboración propia .....	44
<b>Tabla 19</b> - Datos de la imagen en 8 bits. Fuente: Elaboración propia .....	45
<b>Tabla 20</b> - Datos de la imagen en 8 RGB. Fuente: Elaboración Propia.....	46
<b>Tabla 21</b> - Datos del area de la triturada, su respectivo radio y posicion del tono con mas frecuencia en RGB. Fuente: Elaboración propia .....	48
<b>Tabla 22</b> - Correlación entre variables iniciales de la imagen. Fuente: Elaboración propia .....	50
<b>Tabla 23</b> - Valores de la Resistencia Estimada y la Resistencia Real.....	52
<b>Tabla 24</b> - Resistencia real y resistencia estimada .....	54
<b>Tabla 25</b> - Correlación entre los datos de la imagen y los datos externos a la imagen .....	55
<b>Tabla 26</b> - Resistencia Real y Resistencia Estimada con componentes principales de los datos externos a la imagen.....	57
<b>Tabla 27</b> - Resistencia real y resistencia estimada .....	59

## 1. CAPITULO I: GENERALIDADES

### 1.1 INTRODUCCION

El hormigón es un material heterogéneo utilizado en obras civiles, obtenido por la mezcla de áridos gruesos y finos, cemento, agua y ciertos aditivos, según se requiera. A pesar de que el hormigón se inventó hace tiempo, su uso en la Ingeniería Civil sigue siendo la principal. Algunos de los factores por el cual se sigue ampliando su uso es por ser un material económico y fácil de producir, en comparación a otros materiales utilizados en la construcción.

En toda obra civil, la calidad del hormigón debe ser comprobada, debido a su importante papel dentro de la misma. Una de las pruebas más realizadas al Hormigón es el ensayo a compresión axial, la cual nos proporciona el límite de la carga aplicable para que se produzca una ruptura en la misma. Desde la perspectiva del diseño estructural, este dato es crucial, de ahí la importancia de obtener dicho límite.

También existen ensayos no destructivos, económicos y que consumen menos tiempo, como la velocidad ultrasónica, resistencias a la penetración del concreto, esclerómetro, sin embargo, estos ensayos dejan resultados menos precisos comparándolos con el ensayo destructivo.

De igual manera, cada uno de estos ensayos nos provee una información aproximada de la resistencia del hormigón, mientras más fácil sea acceder a esta información con un nivel de precisión suficiente se logrará agilizar en cierto grado todo el proceso constructivo, de ahí la importancia de proveer una alternativa para lograr esto.

## 1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Una de las causas principales por el cual no se consigue el mayor rendimiento del hormigón es que el encargado de una obra opta por culminar el proyecto en el menor tiempo posible, por lo que evita la realización de ensayos al hormigón para comprobar su resistencia, ya que estos ensayos tienen un proceso que requieren de un tiempo considerable.

Otra causa importante es el factor económico, ya que para realizar estos ensayos requieren de varios elementos como Herramientas de Laboratorios, y en algunos casos un recinto especial para practicar estos ensayos.

De acuerdo a todo lo expuesto, se lleva a cabo las siguientes preguntas de investigación.

- ¿Se puede determinar la Resistencia a compresión del Hormigón con métodos más económicos de lo habitual?
- ¿Cuál es la importancia del Hormigón?
- ¿Existe una relación entre la Resistencia a compresión del Hormigón y su Color?
- ¿Cómo se realizan los ensayos a los Hormigones actualmente?

### **1.3 JUSTIFICACIÓN**

El Hormigón es uno de los elementos más importante en la Construcción, debido a varias características, como su fácil maleabilidad, adaptándose a múltiples construcciones, su resistencia al fuego y por ser económica, de esta manera, se busca obtener su mayor rendimiento, sin dejar ningún detalle por el camino, de lo contrario podríamos experimentar problemas de diferentes escalas, ya sean consecuencias económicas, hasta inclusive mortales.

Existen varios motivos por el cual no se logra obtener el mayor rendimiento del hormigón como se comentó anteriormente, es así donde se propone el nuevo método para realizar los ensayos a este elemento fundamental, asegurando su rendimiento y eficiencia.

Con este nuevo método, se realizará un aporte al ámbito laboral de las construcciones civiles, por, sobre todo, se realizará un aporte teórico a los laboratoristas, demostrando que la verificación de la calidad de nuestro Hormigón pueda ser económica y segura.

## **1.4 OBJETIVOS**

### **1.4.1 Objetivo General**

Ajustar un modelo cuya función sea determinar la resistencia del hormigón mediante procesamiento de imágenes

### **1.4.2 Objetivo Especifico**

- Identificar las Características que debe presentar un hormigón con distintas resistencias.
- Establecer la relación entre la resistencia del hormigón y el color que presenta.
- Recopilar los datos obtenidos en una base de datos

## 2. CAPITULO II: MARCO TEORICO

### 2.1 CONCEPTO DE HORMIGÓN

El Hormigón “Fresco” es un material heterogéneo debido a que en ella encontramos tres fases: sólida, mezcla de los áridos (fino y grueso) y cemento; líquida, debido al agua; y la fase gaseosa, debido al aire ocluido ya sea por el proceso del amasado o por el uso de aditivos. [1]

La misma inicialmente en su estado “Fresco” presenta una estructura plástica y moldeable, pero esta sufre una transición a una consistencia rígida debido al proceso de fraguado propio del Hormigón. [2]

### 2.2 COMPONENTES DEL HORMIGÓN

#### 2.2.1 Cementos

Los cementos son conglomerantes hidráulicos más conocidos y utilizados actualmente, es decir, el cemento es un producto que, amasado con el agua, esta fragua y se endurece ya sea al aire libre o sumergidos en agua, debido a que es estable sus componentes una vez hidratados. [3]

##### 2.2.1.1 Tipos de cemento

- Tipo I: Para uso general, es decir, cuando no se requiera que el cemento aporte características especiales.
- Tipo IA: Prácticamente con las mismas características que el cemento de Tipo I, con la diferencia que ésta es un cemento incorporador de aire.
- Tipo II: Para situaciones en donde se requiera que el hormigón tenga resistencia moderada al ataque de sulfatos o cuando se necesita un calor de hidratación moderada.
- TIPO IIA: Prácticamente con las mismas características que el cemento de Tipo II, con la diferencia que ésta es un cemento incorporador de aire.
- Tipo III: Para uso donde se busca una alta resistencia a una edad temprana.
- Tipo IIIA: Prácticamente con las mismas características que el cemento de Tipo III,

con la diferencia que ésta es un cemento incorporador de aire.

- Tipo IV: Para situaciones en donde se requiera que el hormigón tenga un bajo calor de hidratación.
- Tipo V: Para situaciones en donde se requiera que el hormigón tenga alta resistencia a los ataques de sulfatos. [4]

### **2.2.2 Agregados para el Hormigón**

Para la realización de hormigón pueden utilizarse arenas y gravas, pueden ser en su forma natural o machacadas, siempre y cuando reúnan mínimamente las necesidades o características de resistencia, durabilidad y tamaño, para lograr el resultado deseado.

Estos agregados bajo ninguna situación deben contener sustancias que reaccionen químicamente con el cemento, por ello, si fuese necesario, deben ser sometidos a un proceso de acondicionamiento antes de su utilización. [3]

#### **2.2.2.1 Agregado Fino**

Se entiende como agregado fino aquellos que posean un diámetro menor al tamiz N°4 (4.76mm), pero a su vez no sea mayor que 74  $\mu\text{m}$  (tamiz N°200), es decir, para su clasificación de forma práctica son aquellos que mínimamente sean retenidos en el tamiz N° 200 y como máximo pasantes del tamiz N°4. [3]

#### **2.2.2.2 Agregado Grueso**

Se entiende como agregado grueso aquellos que posean un diámetro mayor al tamiz N°4 (4.76mm), pero para definir su tamaño máximo debe considerarse varios factores como los elementos estructurales, el amasado, la separación entre barras, paquetes de barras, etc. [3]

### 2.2.2.3 Clasificación comercial de los agregados, según su tamaño en Paraguay

Tipo de Agregado	Clasificación Comercial	Componentes	Tamaño Máximo(mm)
Agregados Finos	6ta	Piedra triturada	4,8
Agregados Gruesos	5ta	Piedra triturada	19 o 12,7
	4ta	Piedra triturada	25,4

**Tabla 1** - Clasificación comercial de los agregados. Fuente: Mario Servín (2019)

### 2.2.2.4 Granulometría de los agregados para hormigones

#### Agregado Fino:

Esta deberá tener una granulometría comprendida dentro de los límites definidos por la granulometría A y B de la siguiente tabla:

Tamices	Máximo en masa, acumulado, que pasa (%)		
	Granulometría A	Granulometría B	Granulometría C
IRAM 9,5 mm	100	100	100
IRAM 4,75 mm	95	100	100
IRAM 2,36 mm	80	100	100
IRAM 1,18 mm	50	85	100
IRAM 600 µm	25	60	95
IRAM 300 µm	10	30	50
IRAM 150 µm	2	10	10

**Tabla 2**- Tamaño de tamiz para agregados finos. Fuente: Norma IRAM 1627:1997

En obras donde el control de la calidad del hormigón se realice in situ, podrá ser aceptado de igual forma arenas naturales cuyas granulometrías excedan la granulometría B, pero no la granulometría C.

#### Agregado Grueso:

Esta deberá tener una granulometría comprendida dentro de los límites definidos, para cada tamaño nominal, según la siguiente tabla:

Tamaño nominal (mm)	Acumulados en masa, que pasa por los tamices IRAM									
	63 mm	53 mm	37,5 mm	26,5 mm	19 mm	13,2 mm	9,5 mm	4,75 mm	2,36 mm	1,18 mm
53 a 4,75	-	95 a 100	-	35 a 70	-	15 a 30	-	0 a 5	-	-
37,5 a 4,75	-	100	95 a 100	-	35 a 70	-	10 a 30	0 a 5	-	-
26,5 a 4,75	-	-	100	95 a 100	-	25 a 60	-	0 a 10	0 a 5	-
19 a 4,75	-	-	-	100	90 a 100	-	20 a 60	0 a 10	0 a 5	-
13,2 a 4,75	-	-	-	-	100	90 a 100	-	0 a 15	0 a 5	-
53 a 26,5	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	-	0 a 5	90 a 100	-	-	-
37,5 a 19	-	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	-	0 a 5	-	-	-
9,5 a 2,36	-	-	-	-	-	100	85 a 100	0 a 10	0 a 10	0 a 5

**Tabla 3** - Tamaño de tamiz para agregados gruesos. Fuente: norma IRAM 1627:1997

### 2.2.3 Aditivos

Se considera aditivos a aquellos productos que son agregados al hormigón con el fin de mejorar ciertas características que la misma posee. Debido a su creciente uso en el hormigón ya ha sido denominado un componente más de la misma.

### 2.2.4 Agua

El agua dentro del proceso de amasado cumple con dos papeles importantes, por una parte, provee la hidratación del cemento, y por otra parte genera en el hormigón una trabajabilidad necesaria para su puesta en obra.

También cumple un rol importante en el proceso de curado, siendo esta una etapa en la que el agua de curado es crucial debido a su influencia más amplia y duradera que en el proceso de amasado.

Entonces, para los papeles mencionados, el agua debe reunir las condiciones necesarias de pureza, es decir, deben estar libres de sustancias como aceites, ácidos, sales, etc. En líneas generales un agua potable es aceptable para su empleo en la técnica del hormigón.

Determinación	Limitación impuesta por la Instrucción española	Riesgos que se corren si no se cumple la limitación	Observaciones
pH (UNE 7234:1971)	MÍNIMO 5	– alteraciones en el fraguado y endurecimiento – disminución de resistencias y de durabilidad	– la norma soviética admite hasta un pH igual a 4 – con cemento aluminoso no deben usarse aguas de pH superior a 8
Sustancias disueltas totales (UNE 7130:1958)	MÁXIMO 15 gramos por litro	– aparición de eflorescencias u otro tipo de manchas – pérdida de resistencias mecánicas – fenómenos expansivos a largo plazo	– por sustancias disueltas se entiende el residuo salino seco que se obtiene por evaporación del agua – en zonas sujetas a fluctuaciones de nivel de agua, conviene rebajar el límite a 5 g/l
Contenido en sulfatos, expresados en ión SO <sub>4</sub> (UNE 7131:1958)	MÁXIMO 1 gramo por litro	– alteraciones en el fraguado y endurecimiento; pérdidas de resistencia – puede resultar gravemente afectada la durabilidad del hormigón	– con cemento SR puede llegarse a 5 g/l – la norma soviética admite hasta 2,7 g/l con portland normal y 10 g/l con SR – atención al contenido en sulfatos del cemento y los áridos, cuando se está cerca del límite – se debe ser más estricto con el agua de curado
Contenido en ión cloro (UNE 7178:1960)	MÁXIMO 3 gramos por litro	– corrosión de armaduras u otros elementos metálicos – otras alteraciones del hormigón	– para hormigón en masa puede elevarse el límite de tres a cuatro veces – para hormigón pretensado debe rebajarse el límite a 1 g/l
Hidratos de carbono (UNE 7132:1958)	No deben apreciarse	– el hormigón no fragua – otras alteraciones en el fraguado y endurecimiento	– La sacarosa, glucosa y sustancias análogas alteran profundamente el mecanismo de fraguado de los cementos
Sustancias orgánicas solubles en éter (UNE 7235:1971)	MÁXIMO 15 gramos por litro	– graves alteraciones en el fraguado y/o endurecimiento – fuertes caídas de resistencia	– el ensayo pone de manifiesto la presencia de aceites y grasas de cualquier origen, humus y otras sustancias orgánicas vegetales, que muestran una interacción con la cal liberada del cemento – atención a la materia orgánica de la arena, cuando se está cerca del límite

**Tabla 4** - Análisis del agua de amasado y curado. Fuente: Jiménez Montoya (2009)

## 2.3 Ensayos del Hormigón

### 2.3.1 Preparación de especímenes:

Las probetas deberán ser confeccionadas siguiendo el número de capas necesarias y números de golpes determinados por la ASTM C 192-02 en las siguientes tablas:

Tipo y tamaño de la probetas,	Modo de compactación	Nº de capas de aprox. igual altura
Cilindros: Diám. pulg [mm]		
3 ó 4 [75 a 100]	apisonado	2
6 [150]	apisonado	3
9 [225]	apisonado	4
Sobre 9 [225]	vibración	2
Prismas y cilindros horizontales para fluencia: Altura, pulg [mm]		
Hasta 8 [200]	apisonado	2
Sobre 8 [200]	apisonado	3 ó más
Hasta 8 [200]	vibración	1
Sobre 8 [200]	vibración	2 ó más

**Tabla 5** - Numero de capas necesarias para la probeta. Fuente: ASTM C 1902 -02

<b>Cilindros</b>		
Diámetro del cilindro pulg. (mm)	Diámetro del pisón pulg. (mm)	Nº de golpes/capa
2(50) a < 6(150)	3/8 (10)	25
6(150)	5/8 (10)	25
8(200)	5/8 (16)	50
10(250)	5/8 (16)	75
<b>Vigas y prismas</b>		
Área superficial de la probeta pulg.2 (cm2)	Diámetro del pisón pulg. (mm)	Nº de golpes/capa
25 (160) o menos	3/8 (10)	25
26 a 49 (165 a 310)	3/8 (10)	1 por cada 1 pulg.2(7cm2) de superficie
50 (320) o mas	5/8(16)	1 por cada 2 pulg.2(14 cm2) de superficie
<b>Cilindros horizontales para fluencia</b>		
Diámetro del Cilindro pulg. (mm)	Diámetro del pisón pulg. (mm)	Nº de golpes/capa
6 (150)	5/8 (16)	50 en total, 25 en ambos lados del eje

**Tabla 6** - Diámetro del pisón y número de golpes que se usan para moldear las probetas de ensayo. Fuentes: ASTM C 1902 -02

Una vez consolidado las probetas, la superficie de hormigón será alisado o aplanado con la menor manipulación posible como lo determina la ASTM C 192-02.

El curado del hormigón se realiza por vía húmeda, dicha condición se logra con agua almacenada en estanques o con una habitación húmeda, según lo determina la ASTM C 192-02.

### 2.3.2 Método de Ensayo para revenimiento del concreto de cemento hidráulico - cono de Abrams.

**Aparatos necesarios:**

- Molde
- Varilla apisonadora
- Dispositivo de medición
- Cuchara

### **Procedimiento:**

Una vez humedecido el molde y colocado en una superficie rígida, plana, húmeda y no absorbente, la muestra debe ser vertido con ayuda de la cuchara en 3 capas de un volumen igual del 1/3 del volumen total cada una. Varillar cada capa 25 veces en total de forma uniforme y transversal a cada una.

Luego de llenar el molde, el concreto debe ser emparejado mediante el enrase y rodamiento de la varilla apisonadora.

Remover el concreto que rodea la base del molde y posterior a dicha acción levantar el molde de forma vertical y cuidadosamente sin movimientos horizontales o de torsión.

Posteriormente medir de forma instantánea el asentamiento por medio de la diferencia vertical entre la parte superior del molde y el centro original que quedo desplazado de la superficie superior de la muestra con una precisión en milímetros con aproximación de 5mm. [5]

### **2.3.3 Ensayo de resistencia a compresión**

Este método consiste básicamente en la aplicación de una carga de forma axial y de compresión al espécimen moldeado o núcleo a una razón que se encuentra dentro del rango prescrito con anterioridad de que la falla suceda. El esfuerzo de la muestra es calculado de la siguiente manera: Dividiendo la carga máxima obtenida durante la realización del ensayo por la superficie de la sección transversal de la muestra.

Los resultados arrojados por este método estarán condicionados por muchos factores previos como lo son tamaño y forma de las probetas, procedimiento de mezclado, moldeo, etc. Por eso en todo el proceso de preparación previa de las probetas deberá tenerse mucho cuidado para obtener los resultados más favorables posibles según sea la necesidad.

La misma es utilizado como base para el control de calidad, ya sea de las operaciones de proporcionamiento, mezclado y colocación de concreto, evaluación de efectividad de los aditivos, etc. [6]

#### **2.3.3.1 Aparatos necesarios**

- Máquina de Ensayo
- La máquina de ensayo deberá estar equipada con dos bloques de carga de

acero con caras endurecidas.

- Indicador de carga

### 2.3.3.2 Procedimiento

El ensayo a compresión deberá ser hecho tan pronto sea posible luego de ser retirados de su almacenamiento húmedo.

Los especímenes serán ensayados en condición húmeda.

A continuación, se presenta la tolerancia de tiempo permisible para realizar la rotura de los especímenes según su edad:

Edad de Ensayo	Tolerancia	
24 horas	±0.5 horas	2.1%
3 días	2 horas	2.8%
7 días	6 horas	3.6%
28 días	20 horas	3.0%
90 días	2 días	2.2%

**Tabla 7** - Tolerancia de tiempo para realizar rotura según la edad del hormigón. Fuente: ASTM C39/C39 M-01

Aplicar la carga continuamente y sin impacto, hasta que la probeta falle y anote la carga máxima soportada durante el ensayo.

### 2.3.3.3 Cálculos

Calcular el esfuerzo de compresión de la probeta de la siguiente manera: Dividiendo la carga máxima soportada por la misma durante el ensayo por el área de la sección transversal promedio y exprese el resultado obtenido con una aproximación de 0.1 MPa.

En el caso de que la longitud a diámetro de la probeta sea menor que 1.8, corrija el resultado multiplicando por el factor de corrección proveído en la siguiente tabla:

L/D	FACTOR
1.75	0.98
1.50	0.96
1.25	0.93
1.00	0.87

**Tabla 8** - Factor de corrección para relaciones menores a 1.8 entre la altura y el diámetro. Fuente: ASTM C39/C39 M-01

Los valores no proveídos en la anterior tabla deberán ser determinados por interpolación.

### 2.3.3.4 Cantidad de especímenes necesarios

La norma ACI 318-19 establece que: el ensayo de resistencia a compresión es válido siempre que se promedie la resistencia de al menos dos probetas individuales de 150mm por 300mm.

## 2.4 Procesamiento de Imágenes

### 2.4.1 Concepto de procesamiento de imágenes

El procesamiento de imagen digital es la concepción, diseño, desarrollo y mejora de las mismas.

### 2.4.2 Pixel o Píxeles

Las imágenes son construidas a partir de unos elementos llamados “Pixel” o en plural “Píxeles”, los cuales básicamente están dispuestos en una cuadrícula rectangular regular que contienen valores de un rango finito de números enteros.

Imagen como una función discreta. [7]

Una imagen digital puede ser expresada por una matriz ordenada 2D de números enteros, dicho de una manera más formal, una imagen digital  $I$  es una función 2D que mapea desde el dominio de coordenadas enteras  $\mathbb{N} \times \mathbb{N}$  a un rango de valores de píxeles posibles tal que:

$$I(u, v) \in \mathbb{P} \text{ y } u, v \in \mathbb{N} \times \mathbb{N}$$

### 2.4.3 Tamaño de una Imagen

Asumiendo que una imagen es rectangular, el tamaño de una imagen puede ser determinado directamente a partir del ancho  $M$  (cantidad de columnas) y la altura  $N$  (cantidad de filas) de la matriz de la Imagen  $I$ . [7]

### 2.4.4 Sistema de Coordenadas de una Imagen

Para poder ubicar la posición de un elemento de la imagen (pixel), se necesita de un sistema de coordenadas, para ello en el procesamiento de imágenes el sistema de coordenadas utilizado es aquella en donde su origen se ubica en la esquina superior izquierda y va de arriba hacia abajo y de izquierda hacia la derecha. [7]

### 2.4.5 Valores de un Pixel

La información o valores dentro de un elemento de la imagen dependerá del tipo de datos usado para representarlo. Estos valores son prácticamente siempre palabras

binarias de longitud  $k$  tal que un pixel pueda representar cualquiera de  $2^k$  valores distintos. El valor  $k$  se denomina profundidad de bits de la imagen.

La profundidad de bits dependerá del tipo de imagen como por ejemplo pueden ser: Binario, Escalera de Grises o RGB<sup>3</sup>.

La profundidad de bits generalmente se refiere a la cantidad de bits que es necesario para la representación de un componente de un determinado color, es decir, no es la cantidad de bits necesarios para representar un pixel de un determinado color. Por ejemplo, una imagen a color RGB con una profundidad de 8 bits necesitaría una cantidad de 8 bits por cada canal, siendo así un total de 24 bits. [7]

Las propiedades de algunos tipos de imágenes más comunes se resumen en las siguientes tablas:

Escala de Gris (Imágenes de Intesidad)			
Canal	Bits/Pix.	Rango	Uso
1	1	[0,1]	Imagen Binaria: documentos, ilustraciones, fax
1	8	[0,255]	Universal: fotos, escaneos, impresiones
1	12	[0,4095]	Alta calidad: fotos, escaneos, impresiones
1	14	[0,16383]	Profesional: fotos, escaneos, impresiones
1	16	[0,65535]	Muy alta calidad: Medicina, astronomia

**Tabla 9** - Propiedades de Imágenes en Escala de Grises. Fuente: Digital Image Processing segunda edición (2016)

Imágenes a Color			
Canal	Bits/Pix.	Rango	Uso
3	24	$[0,255]^3$	RGB, universal: fotos, escaneos, impresiones
3	36	$[0,4095]^3$	RGB, alta calidad: fotos, escaneos, impresiones
3	42	$[0,16383]^3$	RGB, profesional: fotos, escaneos, impresiones
4	32	$[0,255]^4$	CMYK, preparación digital

**Tabla 10** - Propiedades de Imágenes a Color. Fuente: Digital Image Processing segunda edición (2016)

Imágenes Especiales			
Canal	Bits/Pix.	Rango	Uso
1	16	[-32768, 32767]	Valores enteros pos./neg. rango aumentado
1	32	$\pm 3.4 \cdot 10^{38}$	Valores floating-point: medicina, astronomia
1	64	$\pm 1.8 \cdot 10^{308}$	Valores floating-point: procesamiento interno

**Tabla 11** - Propiedades de Imágenes Especiales. Fuente: Digital Image Processing segunda edición (2016)

### 2.4.6 Imágenes en Escala de Grises

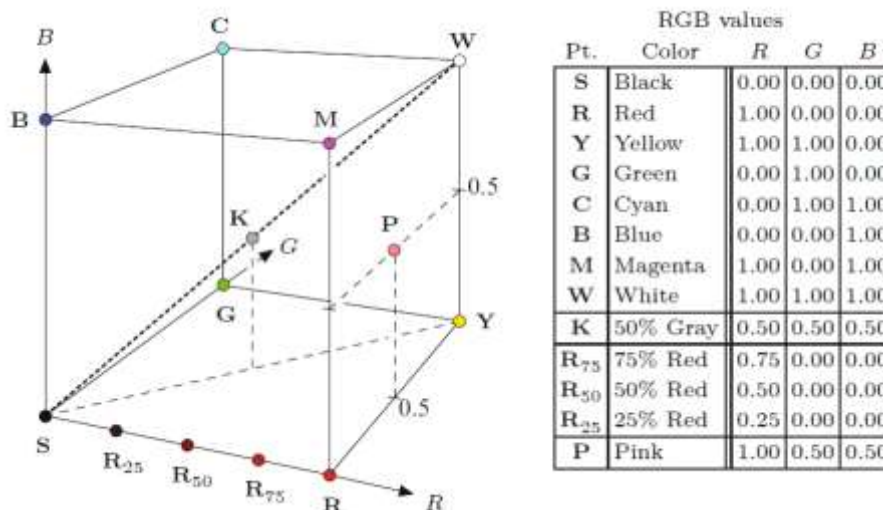
Los datos pertenecientes a una imagen en escala de grises son representados en un solo canal que a su vez representa la intensidad, el brillo o la densidad de la imagen. Por lo general, son empleados números enteros en el rango  $0, \dots, 2^k - 1$ . Por ejemplo, una imagen en escala de grises típica utiliza  $k = 8$  bits (1 byte) por pixel y una intensidad con valores en el rango  $0, \dots, 255$ , donde el valor representa 0 representa el brillo mínimo (negro) y el valor 255 representa el brillo máximo (blanco). [7]

### 2.4.7 Imágenes Binarias

Es un tipo de imagen en donde los pixeles pueden tomar solo uno de dos valores, negro o blanco, las mismas son normalmente codificados usando un solo bit (0/1). [7]

### 2.4.8 Imagen a Colores

Generalmente las imágenes a color se basan en los colores primarios rojo, verde y azul (RGB), usualmente utilizan 8 bits para cada componente de color (canal). En este tipo de imágenes en cada color de cada pixel requiere  $3 \times 8 = 24$  bits para su codificación, en donde el rango de valores para cada componente varia en el rango  $0, \dots, 255$ . [7]



**Ilustración 1** - RGB como cubo unitario. Fuente: *Digital Image Processing segunda edición*

Los valores del color gris se pueden obtener cuando los valores de R, G y B son iguales, de esta manera podemos decir que la recta de colores grises, en el Cubo RGB, tiene pendiente 1, es decir, es una recta con inclinación de  $45^\circ$  en relación a cada plano.

## 2.4.9 Formato de archivo de Imágenes

### 2.4.9.1 Portable Network Graphics (PNG)

La misma fue diseñada como un formato de imagen universal, especialmente para su uso en Internet. PNG admite tres distintos tipos de imágenes [7]:

- Imágenes de color verdadero (con un máximo de 3x16 bits/pixel)
- Imágenes en escala de grises (con un máximo de 16 bits/pixel)
- Imágenes indexadas a color (con un máximo de 256 colores)

### 2.4.9.2 JPEG

Define un método de compresión para imágenes continuas, imágenes en escala de grises e imágenes a color. La misma fue desarrollo por el Joint Photographic Experts Group (JPEG) con la finalidad de lograr un promedio de reducción datos de un factor de 1:16 y fue establecido en 1990 dentro de la norma ISO IS-10918.

En la práctica, JPEG logra, según la aplicación, una compresión en el orden de 1 bit por pixel (un factor de compresión alrededor de 1:25) al comprimir imágenes de color de 24 bits con una calidad aceptable para ver.

## 2.5 Regresión Lineal

Cuando una serie de datos siguen una tendencia de línea recta, es posible ajustar una recta o un hiperplano con el método de mínimos cuadrados, la cual es presentada a continuación:

Suponiendo que se cuenta con  $k$  variables independientes  $x_1 + x_2 + \dots + x_k$  y  $n$  observaciones  $y_1 + y_2 + \dots + y_n$ , en donde cada observación puede ser aproximada con la siguiente ecuación [8]:

$$\hat{y}_i = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k$$

De lo anterior también se determina el error  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = y_i - \hat{y}_i \quad \text{siendo } y \text{ la observación real}$$

A su vez, utilizando las notaciones matriciales podemos expresar las variables de la siguiente manera:

$$\hat{y} = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{kn} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{1n} & \dots & x_{kn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} = \hat{x}\beta$$

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}$$

$$\varepsilon = \|y - \hat{x}\beta\|$$

El error  $\varepsilon$  es la distancia de  $y$  al punto  $\hat{x}\beta$  en el espacio columna. Al buscar la solución por mínimos cuadrados que logra minimizar  $\varepsilon$ , es buscar un punto que este más cerca a  $y$  que cualquier otro punto en el espacio columna. Es decir, el vector  $\varepsilon$  debe ser perpendicular a dicho espacio.

Según uno de los teoremas fundamentales del Algebra Lineal, Todos los vectores perpendiculares al espacio columna se encuentran en el espacio nulo izquierdo, a lo que nos lleva a lo siguiente [9]:

$$\hat{x}^T(y - \hat{x}\beta) = 0 \quad \text{o también} \quad \hat{x}^T \hat{x}\beta = \hat{x}^T y \quad \text{o también} \quad \beta = (\hat{x}^T \hat{x})^{-1} \hat{x}^T y$$

## 2.6 Análisis de Componente Principales (PCA)

### 2.6.1 Definiciones importantes del Algebra lineal

#### 2.6.1.1 Matriz ortogonal

Es aquella matriz cuadrada con columnas ortonormales. Por ende  $A^T = A^{-1}$ , por ser una matriz cuadrada. [9]

#### 2.6.1.2 Valores característicos y Vectores característicos:

El número  $\lambda$  es un valor característico de  $A$  si y solo si  $A - \lambda I$  es singular:

$$\det(A - \lambda I) = 0$$

A su vez cada  $\lambda$  está asociada con vectores característicos  $x$ :

$$(A - \lambda I)x = 0 \quad \text{o bien,} \quad Ax = \lambda x$$

También es importante añadir que si los vectores característicos  $x_1, \dots, x_n$  corresponde a valores característicos distintos  $\lambda_1, \dots, \lambda_n$ , entonces dichos vectores característicos son linealmente independientes. [7]

#### 2.6.1.3 Diagonalización de una matriz

Suponiendo una matriz  $A$  de  $n \times n$  tiene  $n$  vectores característico linealmente independientes. A su vez si estos vectores son las columnas de la matriz  $S$ , entonces [7]:

$$S^{-1}AS = \Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_n \end{bmatrix}$$

#### 2.6.1.4 Matrices complejas

Toda matriz simétrica tiene valores característicos reales

A su vez sus vectores característicos pueden ser seleccionarse de modo a que sean ortonormales.

Una matriz simétrica real puede factorizarse en  $A = Q \Lambda Q^T$ . Sus vectores característicos ortonormales están en la matriz ortogonal  $Q$ , y sus valores característicos están en  $\Lambda$ . [7]

#### 2.6.1.5 Teorema espectral

Toda  $A$  simétrica real puede diagonalizarse por una matriz ortogonal  $Q$

$Q^{-1}AQ = \Lambda$  o también,  $A = Q\Lambda Q^T$  [7]

#### 2.6.1.6 Matrices semidefinidas

Las siguientes pruebas constituyen una prueba necesaria y suficiente para que una matriz simétrica real  $A$  sea positiva semidefinida [7]:

- $x^T Ax \geq 0$  para todos los vectores  $x$  (definición de las matrices positivas semidefinidas)
- Todos los valores característicos de  $A$  satisfacen  $\lambda_1 \geq 0$
- Ninguna submatriz principal tiene determinantes negativos
- Ningunos pivotes son negativos
- Existe una matriz  $R$ , quizá con columnas dependientes tal que  $A = R^T R$

#### 2.6.1.7 Elipsoides en $n$ dimensiones

Suponiendo que  $A = Q\Lambda Q^T$  con  $\lambda_1 \geq 0$ . Al hacer girar  $y = Q^T x$  se simplifica  $x^T Ax = 1$ :  
 $x^T Q\Lambda Q^T x = 1$ ,  $y^T \Lambda y = 1$ , y  $\lambda_1 y_1^2 + \dots + \lambda_n y_n^2 = 1$

Esto es una ecuación de un elipsoide. Sus ejes tienen longitudes  $1/\sqrt{\lambda_1}, \dots, 1/\sqrt{\lambda_n}$  desde el centro. Mientras en el espacio  $x$  original apuntan a lo largo de los vectores característicos de  $A$ . [7]

## 2.6.2 Definiciones importantes de la Probabilidad y estadística

### 2.6.2.1 Media Muestral

Suponiendo una muestra de  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , la media muestral ( $\bar{x}$ ), es igual [8]:

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n}$$

### 2.6.2.2 Moda muestral

Es aquel valor que ocurre con más frecuencia [8]

### 2.6.2.3 Histograma

Un histograma es la representación gráfica de las frecuencias, frecuencias relativas, probabilidades, etc. [8]

### 2.6.2.4 Esperanza matemática

$$E(X) = \sum_x xf(x)$$

Nótese que si  $f(x)$  es igual para todas las muestras, la Esperanza matemática es igual a la media ( $\bar{x}$ ). [8]

$$\bar{x} = E(X) = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n}$$

### 2.6.2.5 Medidas de la variabilidad

La variabilidad o dispersión de cualquier muestra es muy importante para el análisis de datos, las formas de medir estas dispersiones son [8]:

- **Varianza de la muestra**

$$s^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$$

- **Desviación estándar de la muestra**

$$s = \sqrt{s^2}$$

- **Covarianza**

La covarianza entre dos variables aleatorias es una manera de medir la naturaleza de la asociación entre ambas y definida de la siguiente manera [8]:

$$\sigma_{XY} = E(XY) - \bar{x}\bar{y}$$

### 2.6.2.6 Coeficiente de correlación muestral

La asociación lineal existente entre dos variables  $X$  y  $Y$ , se estima a través del

Coefficiente de Correlación Muestral, cc [8]:

$$cc = \frac{\sigma_{XY}}{\sqrt{\sigma_{XX} \sigma_{YY}}}$$

### 2.6.2.7 Coeficiente de determinación:

Es una manera de medir la proporción de la variabilidad explicada por el modelo ajustado

$$R^2 = 1 - \frac{SCE}{STCC}$$
$$SCE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$
$$STCC = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$$

### 2.6.3 Análisis de Componentes Principales

Debido a que se estará trabajando con una cantidad importante de variables sería bueno reducir estas en termino de sus “componentes principales”, o también cuál de estas variables proveen información importante para las estimaciones o caso contrario descartarlas, es decir, estas “simplificaciones” nos provee el método de “Análisis de Componentes Principales” (PCA, por sus siglas en ingles). [10]

A continuación, se presenta dicho Análisis:

Teniendo N observaciones de las variables  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , entonces la matriz de datos es:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \cdots \\ x_{N1} & \cdots & x_{Nn} \end{bmatrix}_{N \times n}$$

En adelante se supone que la matriz  $X$  es una matriz centrada, es decir, con promedios de cada variable es igual a cero, caso contrario, la transformación  $HX$  logra el centrado [10]:

$$H = I - \frac{1}{N} \mathbf{1}_v \mathbf{1}_v^T$$

Entonces, si  $X = [X_1, X_2, \dots, X_n]^T$  es el vector de variables aleatorias, con sus medias iguales a cero. Se desea encontrar una matriz ortogonal  $Q$  de tal forma que,  $Z = Q^T X$  posea una matriz de covarianzas diagonal, entonces [10]:

$$\begin{aligned} cov(Q^T X) &= E[(Q^T X)(Q^T X)^T] \\ &= E[Q^T X X^T Q] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= Q^T E[XX^T]Q \\ &= Q^T cov(X)Q \\ &= Q^T SQ \\ &= \Lambda \end{aligned}$$

Como  $S$  es simétrica real, con valores no negativos, entonces  $S$  es una matriz semidefinida positiva, con eso,  $Q^T = Q^{-1}$  es una matriz ortogonal y  $\Lambda$  es una matriz diagonal [10].

Entonces:

$$S = Q\Lambda Q^T$$

es la descomposición espectral de la matriz de covarianzas. En las columnas de  $Q = [q_1, q_2, \dots, q_n]$  se encuentran los vectores característicos de  $S$  y en la diagonal de  $\Lambda = diag(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$  sus valores característicos [10].

Entonces las componentes principales son:

$$Z = Q^T X$$

o, cada componente principal sería:

$$Z_i = q_i^T X$$

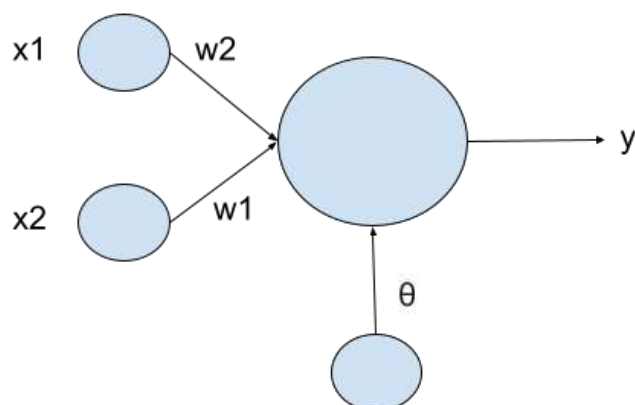
## 2.7 Redes neuronales artificiales

### 2.7.1 Concepto

Las redes neuronales artificiales están relacionada o inspiradas en las neuronas o células nerviosas de los seres vivos. A su vez estas redes neuronales se diferencian de los programas convencionales en que no se trata de una aplicación ciega de un algoritmo, el tratamiento de la información dependerá de distintas características, como puede ser estructurales o funcionales, de la red.

### 2.7.2 Perceptrón

La arquitectura de red se basa en una estructura monocapa, en la que las “células” de entradas son tantas como fuese necesario, a su vez las “células” de salida son tantas como fuese necesarias. Todas la “células” de entrada tiene conexiones con todas las “células” de salida, en estas conexiones las que determinan las superficies de discriminación de todo el sistema. [11]



**Ilustración 2** - Arquitectura de un perceptrón con dos entradas y una salida. Fuente: Elaboración propia

En la ilustración 2 las entradas son  $x_1$  y  $x_2$ , la salida  $y$  y los pesos son  $w_1$  y  $w_2$ . Además, el parámetro  $\theta$ , llamado umbral. El umbral es utilizado como comparación para producir la salida, la cantidad de la misma depende de la cantidad de células de salida, es decir, una por cada una.

Para obtener la función de salida primeramente se obtiene la activación de la célula de salida mediante la suma ponderada por los pesos de todas las entradas:

$$\hat{y} = \sum_{i=1}^n w_i x_i + \theta$$

La salida definitiva se produce al aplicar una función de salida al nivel de activación de la célula. En Perceptrón la función de salida es una función escalón que depende del umbral:

$$y = F \left( \sum_{i=1}^n w_i x_i + \theta \right)$$

Esta función de salida es a la que se denomina función de activación. [11]

### 2.7.3 Perceptrón multicapa

El Perceptrón Multicapa es una generalización del Perceptrón, en este método se presenta una manera de retropropagar los errores medidos en la salida de la red hacia las neuronas ocultas, regla delta generalizada, para las funciones de activación no lineales y redes multicapa.

Su arquitectura se caracteriza porque tiene sus neuronas agrupadas en “capas” de diferentes niveles. Se distinguen tres tipos de capas: la capa de entrada, las capas ocultas y la capa de salida.

La capa de entrada tiene la función de recibir las “señales” que proceden del exterior y emitir esas señales a todas las neuronas de la siguiente capa, las neuronas de las capas ocultas realizan un procesamiento no lineal de las señales recibidas, la capa de salida, como indica su nombre, actúa como salida de la red. [11]

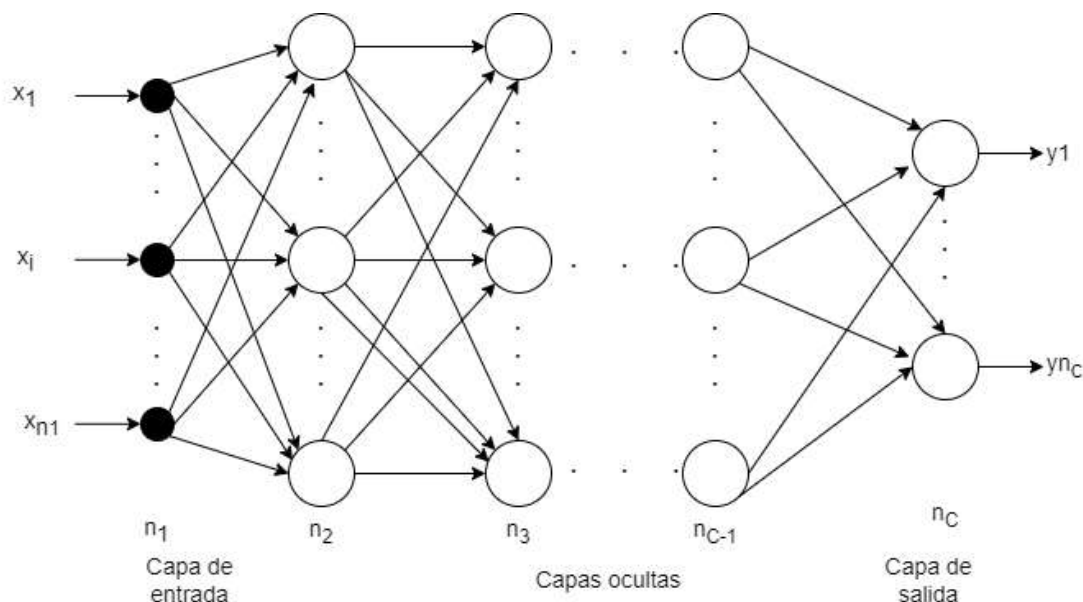
Sea  $\{(X(n), S(n)), n = 1, \dots, N\}$  el conjunto de muestras que representa el problema a resolver, donde:

$X(n) = (x_1(n), \dots, x_{n_1}(n))$  son los patrones de entrada

$S(n) = (s_1(n), \dots, s_{n_c}(n))$  son las salidas deseadas

$N$  es el número de patrones disponibles

Es frecuente encontrar los patrones de entrada y salida normalizados mediante una transformación lineal, según la función de activación utilizada.



**Ilustración 3** - Arquitectura de Perceptrón Multicapa. Fuente Elaboración propia

### 2.7.3.1 Funciones de activación:

- **Función sigmoideal:**

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$$

- **Función tangente hiperbólica:**

$$f(x) = \frac{1 - e^{-x}}{1 + e^{-x}}$$

### 2.7.3.2 Pasos del proceso de aprendizaje

1. Se inicializan los pesos y umbrales de la red. Generalmente, esta inicialización es de forma aleatoria y con valores alrededor del cero.

2. Se toma un patrón  $n$  del conjunto de entrenamiento,  $(X(n), S(n))$ , se propaga hacia la salida el vector  $X(n)$  utilizando las siguientes ecuaciones:

Activación de las neuronas de la capa de entrada

$$a_i^1 = x_i \text{ para } i = 1, 2, \dots, n_1$$

donde  $X = (x_1, x_2, \dots, x_{n_1})$  representa el patrón de entrada a la red

Activación de las neuronas de la capa oculta  $c(a_i^c)$

$$a_i^c = f \left( \sum_{j=1}^{n_{c-1}} w_{ji}^{c-1} a_j^{c-1} + u_i^c \right) \text{ para } i = 1, 2, \dots, n_c \text{ y } c = 2, 3, \dots, C - 1$$

$a_j^{c-1}$  son las activaciones de las neuronas de la capa  $c-1$ ,  $C$  son las capas de la red y  $U^c = (u_i^c)$  es el vector de umbrales de las neuronas de la capa  $c$

$$y_i = a_i^c = f \left( \sum_{j=1}^{n_{c-1}} w_{ji}^{c-1} a_j^{c-1} + u_i^c \right) \text{ para } i = 1, 2, \dots, n_c$$

donde  $Y = (y_1, y_2, \dots, y_{n_c})$  es el vector salida de la red

3. Se evalúa el error cuadrático cometido por la red para el patrón  $n$ :

$$e(n) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n_c} (s_i(n) - y_i(n))^2$$

siendo  $Y(n) = (y_1(n), \dots, y_{n_c}(n))$  y  $S(n) = (s_1(n), \dots, s_{n_c}(n))$  son los vectores de salidas de la red y salidas deseadas para el patrón  $n$ , respectivamente.

4. Se aplica la regla delta generalizada para modificar los pesos y umbrales de la red:

a. Se calculan los valores de  $\delta$  para todas las neuronas de la capa de salida:

$$\delta_i^c(n) = -(s_i(n) - y_i(n))f' \left( \sum_{j=1}^{n_{c-1}} w_{ji}^{c-1} a_j^{c-1} + u_i^c \right)$$

b. Se calculan los valores  $\delta$  para el resto de las neuronas utilizando:

$$\delta_j^{c+1}(n) = f' \left( \sum_{k=1}^{n_c} w_{kj}^c a_k^c + u_j^c \right) \sum_{i=1}^{n_{c+1}} \delta_i^{c+2}(n) w_{ji}^c$$

empezando desde la última capa oculta y retro propagando dichos valores hacia la capa de entrada

c. Se modifican los pesos y umbrales de la red utilizando:

$$w_{ji}^{c-1}(n) = w_{ji}^{c-1}(n-1) + \alpha \delta_i^c(n) a_j^{c-1}(n) \text{ para } j = 1, 2, \dots, n_{c-1} \text{ } i = 1, 2, \dots, n_c$$

donde  $\alpha$  es la razón o tasa de aprendizaje, la cual influye en la magnitud del desplazamiento en la superficie del error

$$u_i^c(n) = u_i^c(n-1) + \alpha \delta_i^c(n) \text{ para } i = 1, 2, \dots, n_c$$

para los pesos y umbrales de la capa de salida se utilizan:

$$w_{kj}^c(n) = w_{kj}^c(n-1) + \alpha \delta_j^{c+1}(n) a_k^c(n) \text{ para } k = 1, 2, \dots, n_c,$$

$$j = 1, 2, \dots, n_{c+1} \text{ y } c = 1, 2, \dots, C - 2$$

$$u_j^{c+1}(n) = u_j^{c+1}(n-1) + \alpha \delta_j^{c+1}(n) \text{ para } j = 1, 2, \dots, n_{c+1} \text{ y } c = 1, 2, \dots, C - 2$$

5. Se repinten los puntos 2,3,4 para todos los patrones de entrenamiento, completando así un ciclo de aprendizaje

6. Se evalúa el error total cometido por la red:

$$E = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N e(n)$$

Dicho error también es conocido como error de entrenamiento, debido a que se calcula utilizando los patrones de entrenamiento

7. Se repiten los pasos 2,3,4,5 y 6 hasta obtener un mínimo del error de entrenamiento, para lograrlo se realizan  $m$  ciclos de aprendizaje [11]

### 3 CAPITULO III: ANALISIS DE MATERIALES

#### 3.1 Materiales Utilizados

La primera etapa consiste en recolectar los 3 componentes principales del hormigón, el cemento, el agregado grueso, y el agregado fino. En el caso del agua, utilizamos la corriente que distribuye la ESSAP.

Cabe mencionar que, los tipos de materiales recolectados fueron seleccionados de acuerdo a lo más utilizado en la ciudad de coronel Oviedo, esto se pudo determinar gracias al proyecto “Estudio de la Calidad del Hormigón Utilizado en Construcciones Civiles de la ciudad de coronel Oviedo” realizado por el Ing. Mario Servín.

#### 3.2 Cemento

El cemento que utilizamos fue el Cemento Puzolánico Vallemi CP IV – 32 de la Industria Nacional del Cemento

Tipo 2 según la norma ASTM 150-07



*Ilustración 4 - Cemento Portland IV Vallemi. Fuente: inc.gov.py*

#### 3.3 Agregado fino

Según en el proyecto mencionado anteriormente, el agregado fino utilizada en la mayoría de las obras en coronel Oviedo, es la arena lavada del arroyo Tebicuary, sin compensación de otro agregado fino, que generalmente suele ser la triturada sexta. Recolectamos la arena lavada que proviene del arroyo Tebicuary y lo primero que realizamos fue eliminar la humedad del material. Lo realizamos con dos métodos para acelerar el proceso, la primera fue exponiendo a los rayos del sol y la segunda, colocándolo en el horno.



**Ilustración 5** - Recolección de agregado fino



**Ilustración 6** - Secado de agregado fino

Observamos que la arena contenía bastante material orgánico, podría deberse a los transportes que tuvo, o por ser extraído del arroyo por un tiempo elevado, por lo que, luego del secado tuvimos que realizar una serie de limpiezas para evitar cualquier material orgánico o arcilla que afecte a la calidad del hormigón, utilizando unos tamices estándares para retener los materiales orgánicos como se observa en la ilustración 7. De esta manera nuestro material ya se encontraba en buenas condiciones y procedimos a realizar el ensayo de granulometría para determinar si no necesita compensarse con triturada sexta para mejorar su granulometría.



**Ilustración 7** - Limpieza del agregado fino



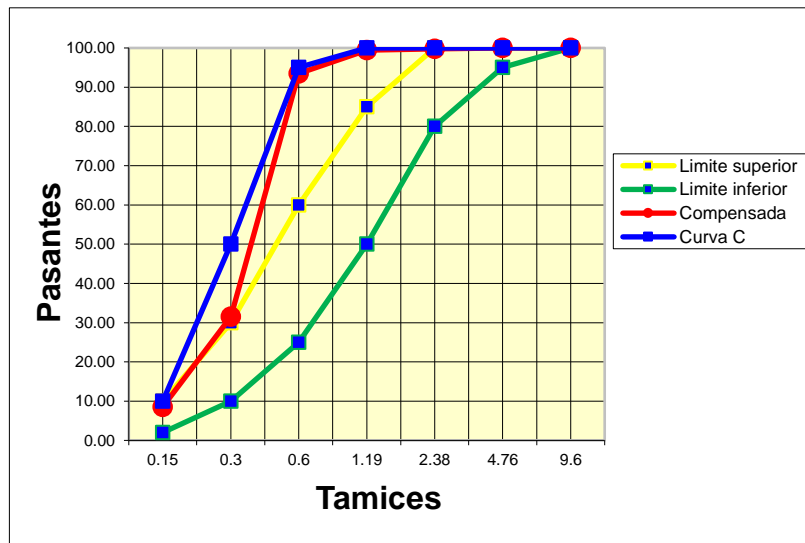
**Ilustración 8** - Tamizado del agregado fino

En la tabla 12 se puede observar los pasantes y retenidos en los tamices, y en la figura 6

se puede observar la curva granulométrica respecto a los límites A y C, según la norma IRAM.

Material	Arena lavada			
Abert(mm)	Retenido g	retenido %	Reten acum%	pasante%
4,8	0	0	0	100
2,4	10	0,25	0,25	99,75
1,2	10,8	0,27	0,52	99,48
0,6	239,2	5,98	6,5	93,5
0,3	2478	61,95	68,45	31,55
0,15	920	23	91,45	8,55
fondo	342	8,55	100	0
total	4000	MF	167,17	1,6717

**Tabla 12** - pasante agregado fino. Fuente: Elaboración propia



**Ilustración 9** - Curva granulométrica de agregado fino. Fuente: Elaboración propia

Observamos que la curva compensada(roja) se encuentra entre los límites de la Curva C(azul) y la curva B (amarillo), de manera que cumple con la norma IRAM y no necesita ser compensada por otro agregado fino como la triturada sexta.

### 3.4 Agregado Grueso

Para determinar el tipo de agregado grueso, nuevamente se verifica que el más utilizado es la denominada comercialmente “Quinta fina”, de modo que inicialmente recolectamos triturada de basalto de tamaño “Quinta”, de la Cantera de la Empresa 8A ubicada en la

ciudad de coronel Oviedo

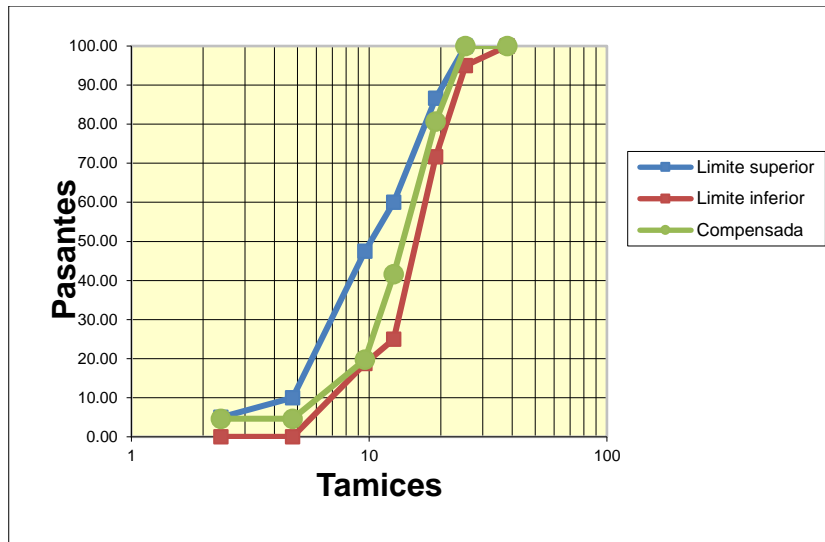


**Ilustración 10** – Recolección de agregado grueso en la Cantera 8a de coronel Oviedo.

Para determinar si el tamaño del árido cumple con las normas de la IRAM, realizamos el ensayo de granulometría. En la tabla 13 se observa los retenidos y los pasantes, y en la figura 9 se observa la curva granulométrica y los respectivos límites.

Material	5ta			
Abert mm	retenido g	Retenido%	Reten acum%	pasante%
50,9	0	0	0	100
38,1	0	0	0	100
25,4	0	0	0	100
19,1	0	0	0	100
12,7	1779,2	44,48	44,48	55,52
9,6	1168	29,2	73,68	26,32
4,8	805,6	20,14	93,82	6,18
2,4	0	0	93,82	6,18
1,2	247,2	6,18	100	0
0,6	0	0	100	0
0,3	0	0	100	0
0,15	0	0	100	0
fondo	0	0	100	0
total	4000	MF	661,32	6,6132
DM mm			19,1	

**Tabla 13** - pasante agregado grueso, basalto de tamaño Quinta. Fuente: Elaboración propia



**Ilustración 11** - Curva granulométrica de agregado grueso sin compensar. Fuente Elaboración propia

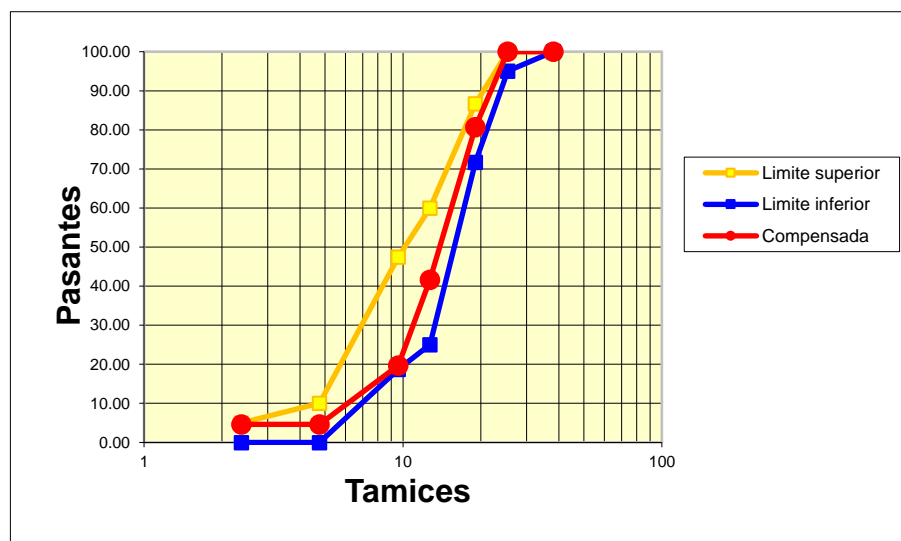
Obs.: Los límites superior e inferior se determinan de acuerdo al tamaño máximo de los áridos determinados en la tabla anterior

Se observa que la curva compensada está fuera del límite inferior y superior, por lo que se tuvo que compensar con un agregado más grueso. Utilizamos la triturada cuarta para compensar la triturada quinta y para determinar el porcentaje de compensación, también realizamos el ensayo granulométrico de la triturada cuarta que se puede observar en la tabla siguiente.

Material	4ta			
Abert mm	retenido g	retenido %	reten acum%	pasante%
50,9	0	0	0	100,00
38,1	0	0,00	0,00	100,00
25,4	0	0,00	0,00	100,00
19,1	3088	77,20	77,20	22,80
12,7	912	22,80	100,00	0,00
9,6	0	0,00	100,00	0,00
4,8	0	0,00	100,00	0,00
2,4	0	0,00	100,00	0,00
1,2	0	0,00	100,00	0,00
0,6	0	0,00	100,00	0,00
0,3	0	0,00	100,00	0,00
0,15	0	0,00	100,00	0,00
fondo	0	0,00	100,00	0,00
total	4000	MF	777,20	7,772
DM mm			25,40	

**Tabla 14** - Pasante de agregado grueso, basalto de tamaño cuarta. Fuente Elaboración propia

De acuerdo a esta granulometría, se determina que, para que la compensación se encuentre dentro de la curva, el porcentaje de triturada cuarta debe ser 25 % y de la triturada quinta deber ser 75 %. En el siguiente grafico se puede observar que la curva compensada se encuentra dentro del límite inferior y el límite superior



**Ilustración 12** - Curva granulométrica de agregado grueso compensada. Fuente Elaboración propia

#### 4 CAPÍTULO IV: PREPARACIÓN DEL HORMIGÓN

En esta etapa nos encargamos de preparar las mezclas del hormigón en el laboratorio de hormigón/suelo de la Facultad de Ciencias y tecnologías.

Iniciamos humedeciendo toda la superficie de la maquina mezcladora, colocamos la primera mitad de cada material, iniciando con los agregados gruesos 4ta y 5ta, seguido del agregado fino, luego el cemento y finalmente vertimos el agua lentamente, dejamos que se mezcle por 2 minutos y luego repetimos el mismo paso para la otra mitad.

Al mismo tiempo del mezclado, se aceitaron 3 moldes cilíndricos de 30 cm de alto y 15 cm de diámetro, colocando una base de goma para evitar la pérdida de agua del hormigón.

Al acabar el mezclado, se procedió al ensayo de cono de Abrams para determinar la trabajabilidad, siguiendo las normas del IRAM



*Ilustración 13 - Ensayo de asentamiento por cono de Abrams.*

En la tabla 15 se encuentran los valores del asentamiento mediante el cono de Abrams en centímetros(cm) cada uno con la temperatura ambiente en el que se realizó el ensayo

Muestra	Asentamiento en cm	Temperatura en grados Celsius
A	0,5	22
B	8	21
C	25	22
D	10	14
E	0	14
F	3	15
G	18	24
H	27	24
I	7,5	26
J	23,5	23
K	5,5	20
L	18	17

**Tabla 15** – valores del asentamiento del cono con su respectiva temperatura ambiente. Fuente Elaboración propia

Luego vertimos el hormigón en los moldes, en 3 capas, realizando 25 golpes por capa con varilla, retirando lo sobrante con el enrazado y moldeando con una cuchara plana, todo según la norma IRAM.



**Ilustración 14** - Hormigón fresco en el molde.

Luego de 24 hs retiramos los moldes, enumeramos cada muestra y lo sumergimos en agua para su correspondiente curado. El curado culmina a los 28 días y se retiran las muestras.



**Ilustración 15** - Curado del Hormigón por 28 días.

## 5 CAPITULO V: FOTOGRAFÍAS

En esta etapa iniciamos con el proceso de captura de imagen de las muestras. Para que los elementos del hormigón sean visibles se realizó un corte transversal inferior al hormigón a 2cm del extremo, con discos metálicos y pulidoras y posteriormente limpiamos con una tela húmeda la superficie cortada y luego pasamos una tela seca.



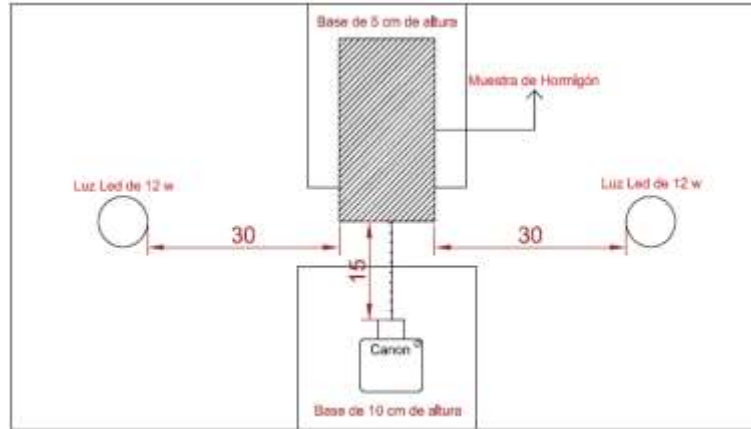
*Ilustración 16 - Corte de probetas y proceso de pulido.*

La cámara utilizada es la Canon t7i y la configuración de la cámara fue manual, sin utilizar zoom ni flash y utilizando la ISO 1600 como se muestra en la siguiente figura:



*Ilustración 17 - Cámara canon t7i con su configuración. Fuente: Canon.es*

En el siguiente esquema se observa las cotas utilizadas para realizar la captura de imagen, se utilizaron dos luces led de 15 watts a 30 cm de la muestra, y la cámara fotográfica fue colocada a 15 cm de la muestra. También se colocó un fondo negro para que el enfoque de la cámara a la muestra sea más preciso.



**Ilustración 18** - Esquema representativo para capturar la imagen del hormigón. Fuente: Elaboración propia



**Ilustración 19** - Captura de Imagen de la muestra.



**Ilustración 20** - Resultado de la Captura de Imagen de una de las muestras. Fuente: Elaboración propia

## 6 CAPITULO VI: ENSAYOS

Se utilizó la prensa hidráulica de la Marca CONTROLS de la Empresa Intercontrol, con capacidad máxima de 2000 KN.



*Ilustración 21 - Prensa Hidráulica CONTROLS.*

En la siguiente tabla se puede observar la dosificación utilizada con su respectiva relación agua/cemento, luego se tiene el valor de las resistencias a compresión en Mega Pascales, promediando los tres ensayos de cada dosificación, luego colocamos el valor del asentamiento mediante el cono de Abrams para determinar su trabajabilidad y la temperatura en que fue preparada la mezcla.

Identificación de Probetas	Dosificación	Relación Agua/Cemento	Resistencia (Mpa)			Promedio
			1	2	3	
A	(1:2:3)	0,5	13,40	15,098	14,15	14,22
B	(1:2:3)	0,6	17,30	17,65	21,31	18,75
C	(1:2:3)	0,7	9,56	10,60	10,14	10,10
D	(0,8:2:3)	0,7	9,67	11,28	9,37	10,10
E	(0,8:2:3)	0,6	9,27	0,00	10,64	9,96
F	(1,1:2:3)	0,5	14,81	15,83	14,24	14,96
G	(1,1:2:3)	0,6	16,76	14,93	15,58	15,76
H	(1,1:2:3)	0,7	6,83	7,96	7,92	7,57
I	(1,2:2:3)	0,5	14,35	16,11	17,14	15,87
J	(1,2:2:3)	0,6	10,38	12,99	13,12	12,16
K	(0,9:2:3)	0,6	19,85	21,24	14,14	18,41
L	(0,9:2:3)	0,7	10,73	10,75	11,49	10,99

*Ilustración 22 - Resultado de la Resistencia a Compresión por probeta. Fuente propia*

## 7 CAPÍTULO VII: PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

Al realizar el corte del hormigón, se puede observar tres elementos, la pasta, las trituradas y los vacíos o poros. Inicialmente se consideró las siguientes hipótesis relacionadas a los factores que afectan a la resistencia del hormigón:

- Si la mezcla del hormigón, tiene una elevada relación de agua y cemento, se espera que la mezcla sufra de segregación, lo que hará que los agregados gruesos se sumerjan hasta el fondo del molde. De esta manera, si el corte de la muestra se realiza en la cara inferior de la probeta, consideramos que, a mayor área de triturada, menor será la resistencia del hormigón
- Si al realizar el vertido del hormigón en los moldes, no se realizan correctamente los golpes por capas, según la norma IRAM o no se realiza una vibración si se requiere, se podrían generar vacíos que afectará a la resistencia del hormigón, por lo que consideramos que, a mayor cantidad de vacíos, menor será la resistencia del hormigón.
- Si a la dosificación se le agrega mayor cantidad de cemento, esto hará que la mezcla sea más oscura y se espera que el hormigón sea más resistente, por lo que, al ser más oscuro el color de la pasta, más resistente será el hormigón.

De acuerdo a esas hipótesis, iniciamos con el procesamiento de imágenes, cuyo objetivo es determinar el área que ocupa cada elemento en la fotografía, de la misma manera, buscamos obtener más información sobre el color de la pasta. Para obtener estos resultados se realizaron varios procesos mediante el lenguaje de programación Python.

### 7.1 Tratamientos previos

Antes de obtener datos de la imagen, realizamos dos pasos previos para iniciar con el análisis de las fotografías.

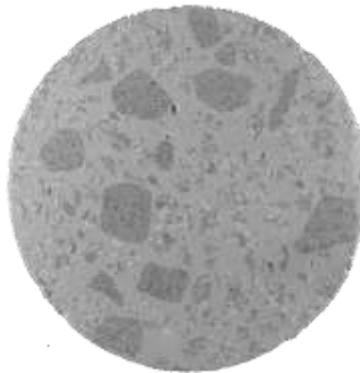
- 1- Extraer el fondo de la imagen mediante un programa externo, en este caso utilizamos Photoshop. La imagen queda en formato png.
- 2- Redimensionar la imagen de 6000 pixeles de ancho y 4000 pixeles de Alto, a 1000 pixeles de ancho y 667 pixeles de Alto
- 3- Conversión de la imagen a Escala de Grises



**Ilustración 23** - Imagen Original en formato .jpeg. Fuente: Elaboración propia



**Ilustración 24** - Imagen sin fondo en formato .png. Fuente: Elaboración propia



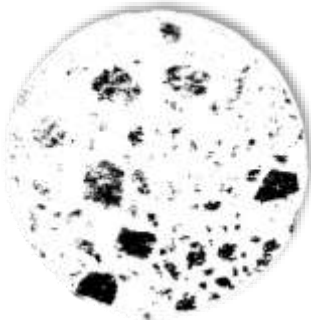
**Ilustración 25** - Imagen reducida en Escala de Grises. Fuente: Elaboración propia

## 7.2 Datos de la Imagen

### 7.2.1 Área de la triturada

Para determinar el área de las trituradas iniciamos con la hipótesis de que el tono del pixel que se ubica en la triturada tiende al negro y al blanco, es decir, cada tono de la triturada se encuentra a una distancia menor a la recta de grises, en comparación con los tonos de la pasta. A esta distancia máxima la denominaremos “r”.

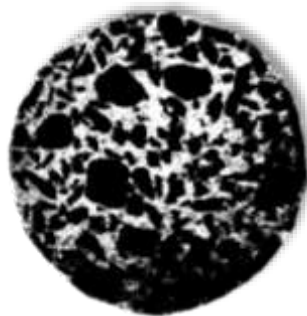
Para poder determinar que la “r” de cada imagen sea adecuada, convertimos la imagen en una escala binaria para una mejor visualización gráfica, donde cada tono del pixel que se encuentre a una distancia menor o igual a la “r”, la convertimos a negro, y si se encuentra una distancia mayor lo convertimos en blanco



**Ilustración 26** - Imagen binaria con  $r = 4$ . Fuente: Elaboración propia



**Ilustración 27** – Imagen binaria con  $r = 11$ . Fuente: Elaboración propia



**Ilustración 28** - Imagen binaria con  $r=15$ . Fuente: Elaboración propia

Con estas 3 pruebas, podemos observar que para un  $r= 11$  obtenemos una mejor distribución de tonos para la triturada

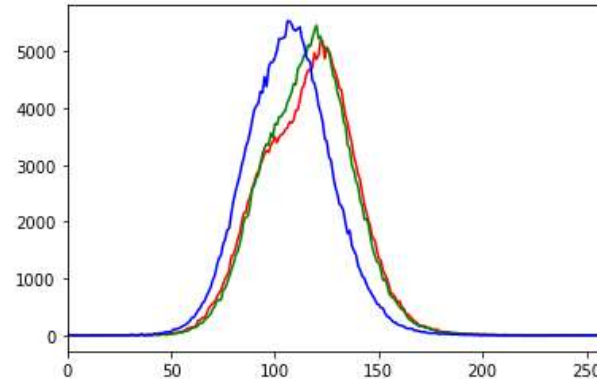
### 7.2.2 Histogramas

Inicialmente, consideramos que el color de la pasta podría influir a la resistencia del Hormigón. Una manera de obtener datos del comportamiento de los tonos de los pixeles, en escalas RGB y escala de grises, es realizando histogramas, donde obtendremos datos como el tono con más frecuencia(modal), el promedio de los tonos y la Desviación estándar del Histograma. A continuación ilustraremos el histograma de cada elemento que consideramos que tiene una relación con la resistencia del Hormigón y sus respectivos valores estadísticos.

### 7.2.2.1 Histograma de los valores de la triturada en los canales de R, G y B.

En este caso solo determinamos los valores del histograma en el canal B, debido a que sufre un desfase en relación a los canales R y G

Muestra	MTB	PTB	DETB
A1	95	94,96	19,25
A2	101	108,25	23,93
A3	103	107,17	20,93
B1	65	72,97	19,13
B2	65	73,4	16,33
B3	63	69,28	16,15
C1	65	74,22	18,95
C2	92	100,84	26,23
C3	85	89,76	20,03
D1	61	71,38	23,92
D2	79	86,73	24,1
D3	71	82,99	25,11
E1	59	74,75	23,21
E2	59,50	76,19	25,35
E3	60	77,63	27,49
F1	79	89,72	23,77
F2	80	88,03	24,06
F3	78	88,67	20,64
G1	90	101,86	23,54
G2	90	98,72	22,67
G3	85	95,75	21,22
H1	69	81,6	23,87
H2	79	86,19	21
H3	70	82,03	22,11
I1	82	93,02	23,79
I2	83	98,76	25,1
I3	84	98,48	25,89
J1	89	101,59	23,67
J2	85	98,46	21,79
J3	86	94,89	24,09
K1	86	97,13	22,82
K2	77	90,42	22,59
K3	87	97,11	22,97
L1	94	106,93	22,88
L2	92	103,26	22,94
L3	95	103,62	21,12

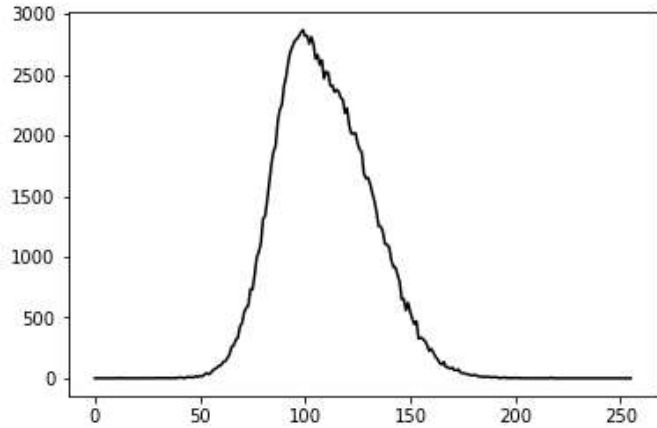


**Ilustración 29** - Histograma de la triturada en RGB. Fuente: Elaboración propia

**Tabla 16** - Datos de la triturada en el canal B. Fuente: Elaboración propia

### 7.2.2.2 Histograma de la Triturada en escala de Grises (8 bits)

Muestra	MT8	PT8	DET8
A1	100	100,17	19,33
A2	109	112,99	23,95
A3	109	112,77	20,97
B1	66	76,77	19,02
B2	67	76,21	16,27
B3	65	71,77	16,13
C1	69	76,88	19,3
C2	102	107,03	26,28
C3	87	93,77	20,13
D1	65	76,66	24,03
D2	79	91,52	24,04
D3	74	87,06	25,1
E1	68	80,67	23,36
E2	69,00	81,87	25,48
E3	70	83,06	27,59
F1	90	95,69	23,84
F2	86	92,96	24,09
F3	83	93,63	20,89
G1	99	110,78	23,83
G2	92	106,31	23,24
G3	94	102,48	21,56
H1	74	86,96	24,1
H2	87	92,09	21,15
H3	79	87,4	22,2
I1	87	98,02	24,2
I2	110	104,04	25,57
I3	88	104,29	26,07
J1	96	109,39	24,2
J2	89	104,33	22,16
J3	88	100,32	24,59
K1	93	104,12	23,22
K2	82	95,59	22,93
K3	89	102,29	23,25
L1	100	114,86	23,27
L2	97	109,77	23,32
L3	99	109,03	21,61

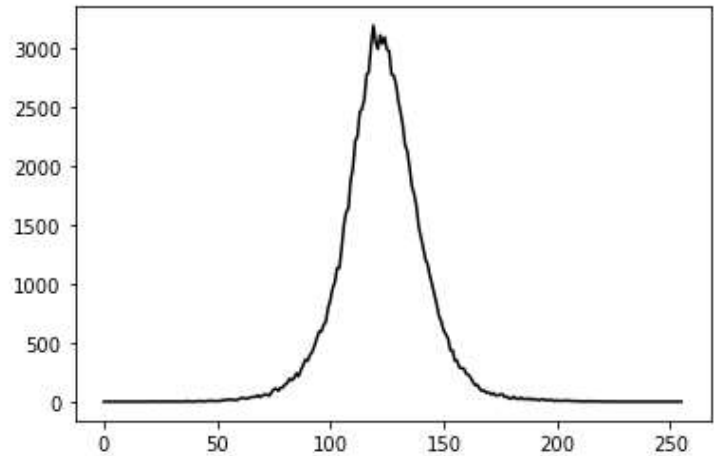


**Ilustración 30** - Histograma de la tritura en 8 bits. Fuente: Elaboración propia

**Tabla 17** - Datos de la tritura en 8 bits. Fuente: Elaboración propia

### 7.2.2.3 Histograma de la pasta en 8 bits

Muestra	MP8	PP8	DEP8
A1	106	106,68	16,15
A2	118	118,72	20,79
A3	120	119,94	17,16
B1	84	84,78	14,33
B2	80	80,76	13,46
B3	79	79,7	14,54
C1	90	93,26	21,62
C2	124	116,65	22,86
C3	106	107,44	19,04
D1	92	93,72	18,66
D2	104	102,71	20,52
D3	98	97,7	18,93
E1	83	87,69	16,31
E2	90,50	93,88	18,43
E3	98	100,07	20,55
F1	96	100,18	17,97
F2	93	95,67	16,88
F3	97	99,73	16,63
G1	120	121,47	16,99
G2	114	118,42	17,52
G3	109	111,36	17,24
H1	84	89,09	21,55
H2	93	94,82	18,52
H3	87	89,43	22,05
I1	103	107,23	17,86
I2	107	109,03	19,18
I3	112	114,74	17,37
J1	121	123,23	18,7
J2	118	120,58	16,71
J3	111	118,65	19,39
K1	117	118,81	17,21
K2	110	111,62	17,93
K3	118	117,14	17,43
L1	129	129,99	18,48
L2	118	119,66	18,16
L3	119	122,79	17,6

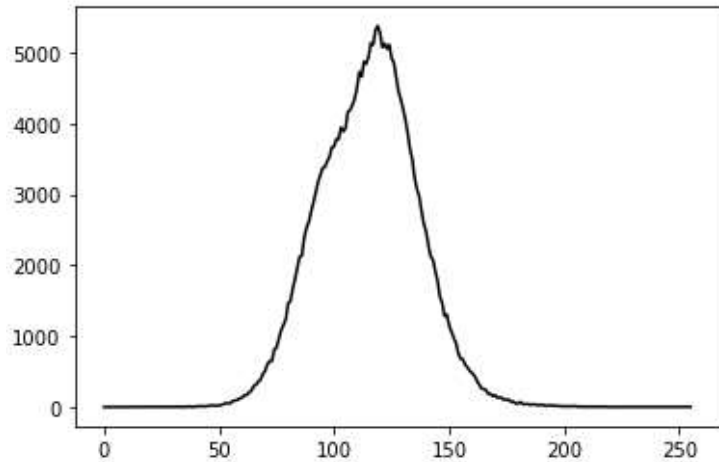


**Ilustración 31** - Histograma de la tritadura en 8 bits. Fuente: Elaboración propia

**Tabla 18** - Datos de la pasta en 8 bits. Fuente: Elaboración propia

### 7.2.2.4 Histograma de la Imagen en Escala de Grises (8 bits)

Muestra	MI8	PI8	DEI8
A1	105	103,96	17,86
A2	118	116,06	22,51
A3	120	116,91	19,21
B1	82	80,54	17,52
B2	80	78,87	14,93
B3	79	75,87	16,08
C1	78	84,23	21,97
C2	124	112,17	24,99
C3	99	98,72	20,83
D1	89	86,18	22,84
D2	101	97,89	22,83
D3	95	93	22,51
E1	82	84,49	20,16
E2	90,00	88,53	22,78
E3	98	92,57	25,39
F1	95	98,09	21,04
F2	93	94,37	20,71
F3	94	96,46	19,32
G1	120	116,72	21,01
G2	114	113,67	20,85
G3	107	107,14	19,94
H1	81	87,96	22,99
H2	93	93,32	20,07
H3	79	88,4	22,19
I1	103	103,02	21,49
I2	107	106,94	22,21
I3	110	110,64	21,83
J1	121	116,48	22,65
J2	115	113,24	21
J3	111	109,85	23,88
K1	114	111,9	21,56
K2	110	104,69	21,75
K3	117	111,46	21,15
L1	125	123,15	22,12
L2	117	114,71	21,5
L3	119	114,92	21,14



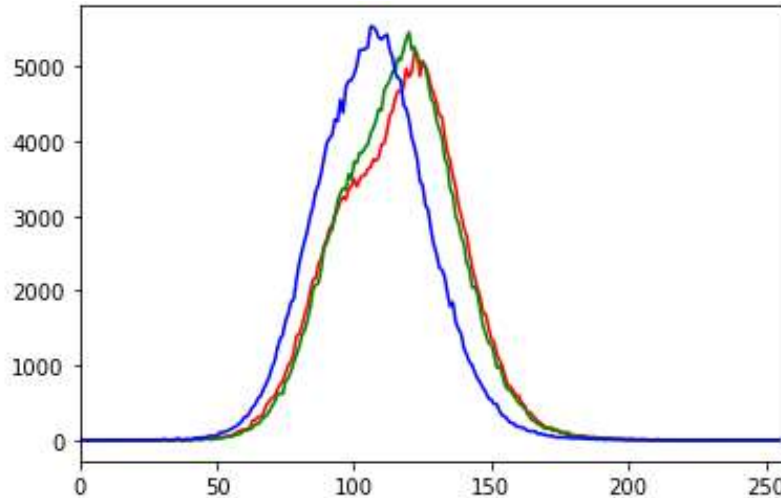
**Ilustración 32** - Histograma de la imagen en RGB. Fuente: Elaboración propia

**Tabla 19** - Datos de la imagen en 8 bits. Fuente: Elaboración propia

### 7.2.2.5 Histograma de la imagen completa

Muestra	MIR	PIR	DEIR	MIG	PIG	DEIG	MIB	PIB	DEIB
A1	105	104,5	18,15	107	105,1	17,82	96	96,47	17,59
A2	122	116,55	22,66	123	117,15	22,53	110	108,95	22,34
A3	121	117,78	19,59	121	118,02	19,12	109	108,73	18,98
B1	84	80,63	17,99	84	81,6	17,5	76	74,34	17,16
B2	82	78,96	15,04	81	79,73	14,95	74	74,1	14,85
B3	80	75,54	16,31	79	76,85	16,11	71	71,66	15,68
C1	77	83,56	22,34	82	85,42	22,01	71	79,8	21,02
C2	125	113,56	25,29	120	113,15	24,97	108	103,4	24,63
C3	98	98,21	21,3	101	100,04	20,78	93	93,04	20,17
D1	97	88,58	23,73	91	86,72	22,71	75	77,07	21,77
D2	107	99,86	23,45	104	98,53	22,74	91	89,32	22,31
D3	100	94,23	23,06	95	93,81	22,44	83	85,5	22,02
E1	88	86,2	20,6	83	85,19	20,14	70	75,18	19,77
E2	96	90,64	23,38	91,00	89,19	22,74	76,50	79,04	22,06
E3	104	95,07	26,15	99	93,18	25,33	83	82,9	24,35
F1	99	100,14	21,33	95	98,72	21,03	83	89,29	20,92
F2	95	95,66	20,89	94	95,17	20,7	83	86,71	20,75
F3	97	97,72	19,63	94	97,16	19,31	87	89,41	19,04
G1	126	120,31	21,64	123	117,32	20,93	105	104,19	20,56
G2	118	116,43	21,34	115	114,29	20,8	104	103,07	20,24
G3	113	109,74	20,36	108	107,62	19,9	97	97,71	19,48
H1	85	89,23	23,08	81	88,8	23,02	69	80,19	22,99
H2	95	95,15	20,28	91	93,96	20,05	81	85,06	20,06
H3	82	89,93	22,23	80	89,1	22,25	70	80,55	22,22
I1	106	104,38	21,95	104	103,86	21,45	92	95,01	20,05
I2	107	108,58	22,39	110	110,7	22,23	95	98,6	22,05
I3	115	112,61	22,33	111	111,49	21,77	100	101,1	21,34
J1	125	119,39	23,32	121	117,15	22,63	104	105,33	21,78
J2	117	115,17	21,89	115	114,06	20,87	102	103,96	19,87
J3	115	11,84	24,65	112	110,55	23,81	98	101	22,7
K1	121	114,69	22,33	114	112,48	21,47	103	101,54	20,63
K2	113	106,73	22,54	112	105,42	21,68	100	95,56	20,69
K3	123	113,72	21,86	118	112,14	21,08	105	101,94	20,26
L1	131	126,16	23,11	126	123,92	21,96	109	111,33	21,15
L2	121	116,81	22,09	117	115,53	21,42	105	104,96	20,97
L3	122	116,2	22	120	115,85	20,99	106	106,73	20,21

Tabla 20 - Datos de la imagen en 8 RGB. Fuente: Elaboración Propia



**Ilustración 33** - Histograma de la imagen completa. Fuente: Elaboración propia

### 7.2.3 Ubicación del tono con más frecuencia en el espacio RGB

Inicialmente consideramos un espacio ortogonal donde los ejes corresponden a los canales R, G y B, en este contexto el tono del pixel de la imagen es un punto en el espacio. Como la hipótesis inicial es que el color de la pasta influye en la resistencia del hormigón, decidimos obtener más información sobre el comportamiento de los tonos en la pasta, en este caso, del tono con más frecuencia que llamaremos “f”. Mediante herramientas geométricas, decidimos conocer a que distancia se encuentra el punto f al origen, en este caso para determinar la oscuridad de la imagen. A esta distancia la denominaremos “Do”

Con la misma estrategia, también decidimos obtener la distancia del punto f a la recta de grises, a esta distancia la denominaremos “Dg”

Estos valores podemos observar en la siguiente tabla además del área de las trituradas y la distancia máxima a la recta de grises:

Muestra	AT	r	Do	Dg
A1	41,52	6,3	179	8,17
A2	46,16	6,3	205	8,16
A3	41,99	7	203	8,17
B1	53,26	6,3	140	7,35
B2	42,03	4,3	135	6,53
B3	49,62	4	132	4,55
C1	55,07	4,5	152	6,16
C2	46,48	7,8	214	10,71
C3	63,69	6	191	8,16
D1	44,21	8,1	148	11,78
D2	43,12	7	177	11,78
D3	55,93	6,3	166	10,71
E1	45,53	8,8	143	11,78
E2	44,83	8,6	154	11,78
E3	44,13	8,5	165	11,78
F1	46,37	8,5	158	11,78
F2	47,80	7,3	157	10,71
F3	53,56	7,1	159	8,83
G1	44,38	11,6	209	16,08
G2	39,22	9,8	196	11,78
G3	47,40	9,1	188	11,78
H1	52,67	7,6	148	10,71
H2	54,58	8,6	153	11,78
H3	50,96	7,5	135	8,83
I1	45,54	7,4	179	10,71
I2	41,40	7,5	185	10,71
I3	39,17	8,6	191	11,78
J1	48,75	10,9	205	11,78
J2	45,11	8,5	198	11,78
J3	47,97	8,4	196	11,78
K1	47,02	10,2	201	11,78
K2	43,17	8,1	196	11,78
K3	38,28	8,1	207	11,78
L1	45,11	10,8	218	16,08
L2	49,94	9,8	203	11,78
L3	57,13	8,8	210	11,78

**Tabla 21** - Datos del area de la triturada, su respectivo radio y posicion del tono con mas frecuencia en RGB. Fuente: Elaboración propia

## 8 CAPÍTULO VIII: ANÁLISIS DE DATOS Y ECUACIONES DE APROXIMACIÓN

### 8.1 Datos extraídos de la imagen

En total se obtuvieron 25 datos de la imagen de la muestra de hormigón:

1. Área de la Triturada (AT)
2. Distancia máxima del tono de la triturada a la recta de grises (r)
3. Distancia de la moda de la pasta a la recta de grises (Dg)
4. Distancia de la moda de la pasta al origen de las coordenadas (Do)
5. Moda de la Imagen en el canal R (MIR)
6. Moda de la Imagen en el canal G (MIG)
7. Moda de la Imagen en el canal B (MIB)
8. Promedio de la Imagen en el canal R (PIR)
9. Promedio de la Imagen en el canal G (PIG)
10. Promedio de la Imagen en el canal B (PIB)
11. Desviación Estándar de la Imagen en el canal R (DEIR)
12. Desviación Estándar de la Imagen en el canal G (DEIG)
13. Desviación Estándar de la Imagen en el canal B (DEIB)
14. Moda de la Imagen en 8 bits (MI8)
15. Promedio de la Imagen en 8 bits (PI8)
16. Desviación Estándar de la Imagen en 8 bits (DEI8)
17. Moda de la triturada en el canal B (MTB)
18. Promedio de la triturada en el canal B (PTB)
19. Desviación Estándar de la triturada en el canal B (DETB)
20. Moda de la triturada en 8 Bits (MT8)
21. Promedio de la triturada en 8 Bits (PT8)
22. Desviación Estándar de la triturada en 8 Bits (DET8)
23. Moda de la pasta en 8 Bits (MP8)
24. Promedio de la pasta en 8 Bits (PP8)
25. Desviación Estándar de la pasta en 8 Bits (DEP8)

### 8.1.1 Correlación entre datos de la imagen

Mediante el método de las componentes principales se puede determinar la correlación existente entre los 25 datos.

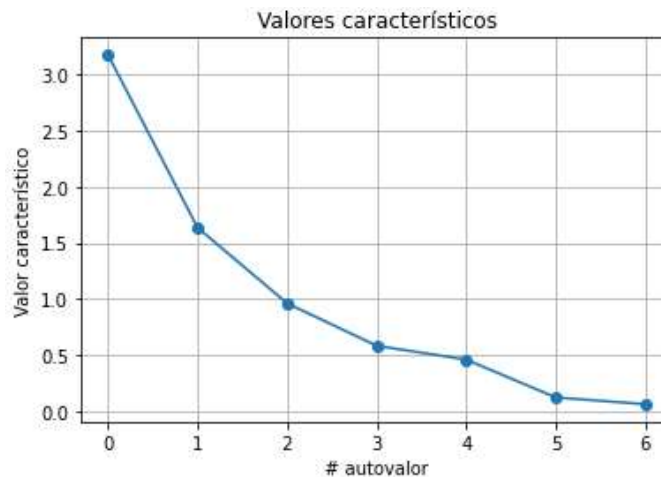
	AT	r	Do	Dg	MT8	PT8	DET8	MTB	PTB	DETB	MP8	PP8	DEP8	MI8	PI8	DEI8	MIR	PIR	DEIR	MIG	PIG	DEIG	MIB	PIB	DEIB
AT	1,0	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,3	0,3	0,0	0,4	0,2	0,0	0,3	0,3	0,0	0,3	0,2	0,0
r	0,2	1,0	0,6	0,9	0,4	0,6	0,6	0,4	0,5	0,5	0,6	0,6	0,1	0,6	0,6	0,4	0,7	0,4	0,5	0,6	0,6	0,4	0,5	0,5	0,4
Do	0,2	0,6	1,0	0,5	0,8	0,9	0,4	0,9	0,9	0,3	1,0	1,0	0,2	1,0	1,0	0,4	1,0	0,5	0,4	1,0	1,0	0,4	1,0	1,0	0,3
Dg	0,3	0,9	0,5	1,0	0,3	0,5	0,7	0,3	0,4	0,6	0,5	0,6	0,2	0,5	0,6	0,5	0,6	0,3	0,6	0,5	0,5	0,5	0,4	0,5	0,5
MT8	0,2	0,4	0,8	0,3	1,0	0,9	0,2	0,9	0,9	0,2	0,8	0,8	0,2	0,8	0,9	0,2	0,8	0,6	0,2	0,8	0,9	0,2	0,9	0,9	0,2
PT8	0,2	0,6	0,9	0,5	0,9	1,0	0,3	0,9	1,0	0,3	0,9	0,9	0,1	0,9	1,0	0,3	0,9	0,6	0,3	0,9	1,0	0,3	0,9	1,0	0,3
DET8	0,3	0,6	0,4	0,7	0,2	0,3	1,0	0,1	0,3	1,0	0,4	0,4	0,6	0,4	0,4	0,9	0,5	0,2	0,9	0,4	0,4	0,9	0,3	0,3	0,9
MTB	0,2	0,4	0,9	0,3	0,9	0,9	0,1	1,0	1,0	0,1	0,9	0,9	0,1	0,9	0,9	0,1	0,8	0,5	0,1	0,9	0,9	0,1	0,9	0,9	0,1
PTB	0,2	0,5	0,9	0,4	0,9	1,0	0,3	1,0	1,0	0,3	0,9	0,9	0,1	0,9	1,0	0,2	0,9	0,6	0,3	0,9	1,0	0,2	0,9	1,0	0,2
DETB	0,3	0,5	0,3	0,6	0,2	0,3	1,0	0,1	0,3	1,0	0,3	0,3	0,6	0,4	0,4	0,9	0,4	0,2	0,9	0,3	0,4	0,9	0,3	0,3	0,9
MP8	0,3	0,6	1,0	0,5	0,8	0,9	0,4	0,9	0,9	0,3	1,0	1,0	0,2	1,0	1,0	0,4	1,0	0,6	0,4	1,0	1,0	0,4	1,0	1,0	0,3
PP8	0,2	0,6	1,0	0,6	0,8	0,9	0,4	0,9	0,9	0,3	1,0	1,0	0,2	1,0	1,0	0,4	1,0	0,5	0,4	1,0	1,0	0,4	1,0	1,0	0,3
DEP8	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1	0,6	0,1	0,1	0,6	0,2	0,2	1,0	0,1	0,1	0,8	0,1	0,0	0,8	0,1	0,1	0,8	0,0	0,1	0,9
MI8	0,3	0,6	1,0	0,5	0,8	0,9	0,4	0,9	0,9	0,4	1,0	1,0	0,1	1,0	1,0	0,3	1,0	0,6	0,4	1,0	1,0	0,3	1,0	1,0	0,3
PI8	0,3	0,6	1,0	0,6	0,9	1,0	0,4	0,9	1,0	0,4	1,0	1,0	0,1	1,0	1,0	0,3	1,0	0,6	0,4	1,0	1,0	0,3	1,0	1,0	0,3
DEI8	0,0	0,4	0,4	0,5	0,2	0,3	0,9	0,1	0,2	0,9	0,4	0,4	0,8	0,3	0,3	1,0	0,4	0,1	1,0	0,3	0,3	1,0	0,2	0,3	1,0
MIR	0,4	0,7	1,0	0,6	0,8	0,9	0,5	0,8	0,9	0,4	1,0	1,0	0,1	1,0	1,0	0,4	1,0	0,6	0,4	1,0	1,0	0,4	1,0	0,9	0,3
PIR	0,2	0,4	0,5	0,3	0,6	0,6	0,2	0,5	0,6	0,2	0,6	0,5	0,0	0,6	0,6	0,1	0,6	1,0	0,1	0,6	0,6	0,1	0,6	0,6	0,1
DEIR	0,0	0,5	0,4	0,6	0,2	0,3	0,9	0,1	0,3	0,9	0,4	0,4	0,8	0,4	0,4	1,0	0,4	0,1	1,0	0,4	0,4	1,0	0,3	0,3	1,0
MIG	0,3	0,6	1,0	0,5	0,8	0,9	0,4	0,9	0,9	0,3	1,0	1,0	0,1	1,0	1,0	0,3	1,0	0,6	0,4	1,0	1,0	0,3	1,0	1,0	0,3
PIG	0,3	0,6	1,0	0,5	0,9	1,0	0,4	0,9	1,0	0,4	1,0	1,0	0,1	1,0	1,0	0,3	1,0	0,6	0,4	1,0	1,0	0,3	1,0	1,0	0,3
DEIG	0,0	0,4	0,4	0,5	0,2	0,3	0,9	0,1	0,2	0,9	0,4	0,4	0,8	0,3	0,3	1,0	0,4	0,1	1,0	0,3	0,3	1,0	0,2	0,3	1,0
MIB	0,3	0,5	1,0	0,4	0,9	0,9	0,3	0,9	0,9	0,3	1,0	1,0	0,0	1,0	1,0	0,2	1,0	0,6	0,3	1,0	1,0	0,2	1,0	1,0	0,2
PIB	0,2	0,5	1,0	0,5	0,9	1,0	0,3	0,9	1,0	0,3	1,0	1,0	0,1	1,0	1,0	0,3	0,9	0,6	0,3	1,0	1,0	0,3	1,0	1,0	0,3
DEIB	0,0	0,4	0,3	0,5	0,2	0,3	0,9	0,1	0,2	0,9	0,3	0,3	0,9	0,3	0,3	1,0	0,3	0,1	1,0	0,3	0,3	1,0	0,2	0,3	1,0

Tabla 22 - Correlación entre variables iniciales de la imagen. Fuente: Elaboración propia

Cuando la correlación entre variables es muy alta, solamente se necesita una de ellas para poder evaluar junto con las demás variables. Para este proyecto decidimos que las correlaciones mayores a 0,9 serán filtradas para trabajar solamente con las variables principales. En total se encontraron 18 variables con correlaciones mayores a 0.9, por lo que solo 7 variables no tienen correlaciones, estas variables son:

- 1) Área de Triturada (AT)
- 2) Distancia máxima del tono de la triturada a la recta de grises (r)
- 3) Distancia de la moda de la pasta al origen de las coordenadas (Do)
- 4) Moda de la triturada en el canal B (MTB)
- 5) Desviación Estándar de la triturada en el canal B (DETBB)
- 6) Promedio de la Imagen en el canal R (PIR)
- 7) Desviación Estándar de la Imagen en el canal G (DEIG)

Con los datos filtrados, iniciamos con la descomposición Espectral de la matriz de covarianzas, para determinar los valores característicos de cada variable:



**Ilustración 34** - Valores Característicos vs cantidad de valores característicos. Fuente: Elaboración propia

Utilizaremos las componentes principales que tienen valores característicos mayores a 1. Las ecuaciones de estas componentes son las siguientes:

$$Z_1 = 0,02898462(AT) - 0,07380(r) + 0,01933187(Do) - 0,0291259(MTB) + 0,197418(DETB) - 0,26132905(PIR) - 0,028543(DEIG) - 0,535700$$

$$Z_2 = 0.0199078(AT) + 0.0163964(R) - 0.0204579(DO) + 0.044172(MTB) +$$

$$0.2066158(DETB) - 0.00270557(PIR) - 0.16206344(DEIG) - 1.94021161$$

### 8.1.2 Resistencias Estimadas con dos Componente Principales con los datos filtrados de la imagen

Con la ecuación de las componentes Principales, podemos estimar una Resistencia mediante el método de mínimos cuadrados

Muestra	Resistencia Real	Resistencia Estimada
A1	13,40	11,69
A2	15,10	12,32
A3	14,15	12,46
B1	17,30	14,84
B2	17,65	14,25
B3	21,31	13,87
C1	9,56	11,38
C2	10,60	13,44
C3	10,14	15,07
D1	9,67	12,20
D2	11,28	12,51
D3	9,37	16,03
E1	9,27	14,48
E2	9,96	14,30
E3	10,64	13,94
F1	14,81	12,04
F2	15,83	13,13
F3	14,24	13,26
G1	16,76	14,01
G2	14,93	11,99
G3	15,58	13,29
H1	6,83	11,68
H2	7,96	11,40
H3	7,92	9,24
I1	14,35	13,63
I2	16,11	13,66
I3	17,14	14,64
J1	10,38	12,63
J2	12,99	13,58
J3	13,12	13,31
K1	19,85	13,50
K2	21,24	14,48
K3	14,14	14,26
L1	10,73	12,80
L2	10,75	13,35
L3	11,49	13,91

**Tabla 23** - Valores de la Resistencia Estimada y la Resistencia Real

Con estos valores obtenemos un coeficiente de correlación muestral igual a 0,34

### 8.1.3 Resistencias Estimadas sin utilizar componentes principales

Como el coeficiente de correlación muestral de la *tabla 23* es muy bajo, decidimos analizar todos los datos sin crear nuevos componentes principales, es decir, utilizando los valores reales de la imagen.

Por el método de mínimos cuadrados obtenemos la siguiente ecuación para los datos pertenecientes solo de la imagen:

$$R = -0.154928(AT) - 0.479282(r) + 0.12344(Do) - 0.134213(MTB) + 0.601312(DETB) - 0.026762(PIR) - 1.757335(DEIG) + 39.430398$$

Con esta ecuación tenemos los siguientes resultados:

Muestra	Resistencia Real	Resistencia Estimada
A1	13,40	9,60
A2	15,10	11,58
A3	14,15	10,88
B1	17,30	15,32
B2	17,65	13,61
B3	21,31	15,20
C1	9,56	13,10
C2	10,60	11,72
C3	10,14	14,28
D1	9,67	12,98
D2	11,28	12,65
D3	9,37	13,69
E1	9,27	11,76
E2	9,96	12,98
E3	10,64	13,98
F1	14,81	11,50
F2	15,83	10,82
F3	14,24	13,98
G1	16,76	13,50
G2	14,93	11,15
G3	15,58	12,70
H1	6,83	12,15
H2	7,96	11,51
H3	7,92	10,52
I1	14,35	15,75
I2	16,11	15,35
I3	17,14	15,14
J1	10,38	13,92
J2	12,99	13,53
J3	13,12	13,63
K1	19,85	15,60
K2	21,24	16,49
K3	14,14	14,61
L1	10,73	14,10
L2	10,75	12,56
L3	11,49	14,73

**Tabla 24** - Resistencia real y resistencia estimada

Con estos resultados obtenemos un coeficiente de correlación muestral igual a 0.72057

## 8.2 Datos filtrados de la imagen y datos externos a la imagen

Como el Coeficiente de correlación muestral de la *tabla 23* es muy bajo, decidimos agregar los siguientes datos externos a la imagen:

- a- La relación agua/cemento (A/C)
- b- La proporción del cemento en la dosificación (CEM)

- c- La temperatura del hormigón Fresco (Temp)
- d- El asentamiento en el ensayo del cono de Abrams (Cono)

Con estos nuevos datos, el total de variables incluyendo los datos externos a la imagen son:

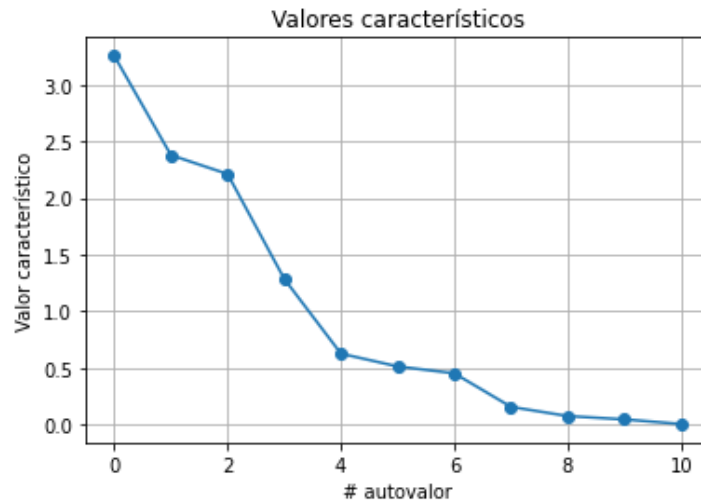
- 1) Área de Triturada (AT)
- 2) Distancia máxima del tono de la triturada a la recta de grises (r)
- 3) Distancia de la moda de la pasta al origen de las coordenadas (Do)
- 4) Moda de la triturada en el canal B (MTB)
- 5) Desviación Estándar de la triturada en el canal B (DETB)
- 6) Promedio de la Imagen en el canal R (PIR)
- 7) Desviación Estándar de la Imagen en el canal G (DEIG)
- 8) La relación agua/cemento (A/C)
- 9) La proporción del cemento en la dosificación (CEM)
- 10) La temperatura del hormigón Fresco (Temp)
- 11) El asentamiento en el ensayo del cono de Abrams (Cono)

### 8.2.1 Correlación entre los datos de la imagen y los datos externos a la imagen

	AT	r	Do	MTB	DETB	PIR	DEIG	CEM	A/C	Cono	Temp
AT	1,000	0,238	0,225	0,150	0,283	0,224	0,011	0,020	0,484	0,465	0,090
r	0,238	1,000	0,553	0,354	0,533	0,412	0,425	0,069	0,067	0,181	0,009
Do	0,225	0,553	1,000	0,853	0,329	0,539	0,354	0,111	0,048	0,155	0,237
MTB	0,150	0,354	0,853	1,000	0,081	0,518	0,071	0,326	0,220	0,136	0,365
DETB	0,283	0,533	0,329	0,081	1,000	0,172	0,862	0,083	0,041	0,092	0,191
PIR	0,224	0,412	0,539	0,518	0,172	1,000	0,056	0,048	0,086	0,079	0,072
DEIG	0,011	0,425	0,354	0,071	0,862	0,056	1,000	0,107	0,276	0,240	0,119
CEM	0,020	0,069	0,111	0,326	0,083	0,048	0,107	1,000	0,423	0,369	0,755
A/C	0,484	0,067	0,048	0,220	0,041	0,086	0,276	0,423	1,000	0,671	0,169
Cono	0,465	0,181	0,155	0,136	0,092	0,079	0,240	0,369	0,671	1,000	0,451
Temp	0,089	0,009	0,237	0,365	0,191	0,072	0,119	0,755	0,169	0,451	1,000

**Tabla 25** - Correlación entre los datos de la imagen y los datos externos a la imagen

Las correlaciones mayores o iguales a 0.9, serán descartadas, pero en este caso se observa que todos son menores a 0.9, por lo que todas las variables se mantienen para iniciar con la descomposición Espectral de la matriz de covarianzas



**Ilustración 35** - Valores Característicos de los datos de la imagen y los datos externos a la imagen

Como tenemos 4 valores característicos mayores a 1, tendremos 4 componentes principales:

$$Z_1 = 0,000168257534(AT) - 0,0205073886(r) - 0,00157281491(Do) - 0,0014716278(MTB) + 0,057122392(DETB) + 0,000335043752(PIR) - 0,062763259(DEIG) - 3,50678792(CEM) - 7,58437128(A/C) + 0,0667398410(cono) - 0,0002012783(temp) + 7,89717156$$

$$Z_2 = -0,00966230565(AT) + 0,105974557(r) - 0,0147462313(Do) + 0,0204367956(MTB) - 0,224732458(DETB) + 0,00133703793 (PIR) + 0,281646495(DEIG) - 1,12725783 (CEM) - 2,33723593 (A/C) - 0,00301330876 (cono) - 0,0143337224(temp) + 1,89397845$$

$$Z_3 = -0,00616829(AT) - 0,00616829(r) + 0,02109051(Do) - 0,04630586(MTB) - 0,15609039(DETB) + 0,00467123(PIR) + 0,11816999(DEIG) + 1,315013(CEM) - 2,61535763(A/C) + 0,01102251(cono) - 0,05166865(temp) + 2,32711153$$

$$Z_4 = 0,06092764(AT) + 0,15161774(r) + 0,00778123, (Do) - 0,0213274 (MTB) - 0,00368446(DETB) - 0,00607332(PIR) - -0,00514001(DEIG) - 2,98348922(CEM) - 1,03513581(A/C) - 0,03706189(cono) + 0,15551751(temp) - 2,00031145$$

### 8.2.2 Resistencia Estimadas con cuatro componentes principales con los datos de la imagen y los datos externos a la imagen

Muestra	Resistencia Real	Resistencia Estimada
A1	13,40	9,60
A2	15,10	11,58
A3	14,15	10,88
B1	17,30	15,32
B2	17,65	13,61
B3	21,31	15,20
C1	9,56	13,10
C2	10,60	11,72
C3	10,14	14,28
D1	9,67	12,98
D2	11,28	12,65
D3	9,37	13,69
E1	9,27	11,76
E2	9,96	12,98
E3	10,64	13,98
F1	14,81	11,50
F2	15,83	10,82
F3	14,24	13,98
G1	16,76	13,50
G2	14,93	11,15
G3	15,58	12,70
H1	6,83	12,15
H2	7,96	11,51
H3	7,92	10,52
I1	14,35	15,75
I2	16,11	15,35
I3	17,14	15,14
J1	10,38	13,92
J2	12,99	13,53
J3	13,12	13,63
K1	19,85	15,60
K2	21,24	16,49
K3	14,14	14,61
L1	10,73	14,10
L2	10,75	12,56
L3	11,49	14,73

**Tabla 26** - Resistencia Real y Resistencia Estimada con componentes principales de los datos externos a la imagen

Con estos resultados obtenemos un coeficiente de correlación muestral igual a 0.4570

### 8.2.3 Resistencia Estimadas sin componentes principales con los datos de la imagen y los datos externos a la imagen

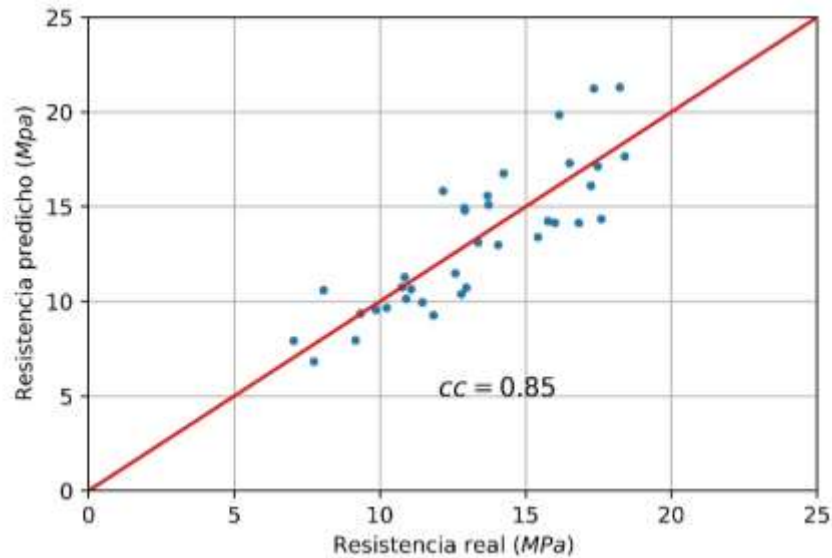
Nuevamente por el método de los mínimos cuadrados obtenemos una ecuación para la resistencia, pero sin utilizar componentes principales, es decir utilizando todos los valores reales de la imagen y los datos externos a la imagen.

$$R = -0.188412(AT) + 0.25054(r) + 4.325276(Do) - 2.468863(MTB) - 2.301962(DETB) \\ -0.411586(PIR) - 0.035980(DEIG) + 6.990197(Cem) + 7.050652(A/C) \\ -9.773400(cono) + 0.565170(temp) + 13.237762$$

Muestra	Resistencia Real	Resistencia Estimada
A1	13,40	15,42
A2	15,10	13,73
A3	14,15	16,01
B1	17,30	16,50
B2	17,65	18,40
B3	21,31	18,22
C1	9,56	9,85
C2	10,60	8,06
C3	10,14	10,89
D1	9,67	10,22
D2	11,28	10,85
D3	9,37	9,32
E1	9,27	11,81
E2	9,96	11,52
E3	10,64	11,04
F1	14,81	12,91
F2	15,83	12,16
F3	14,24	15,76
G1	16,76	14,23
G2	14,93	12,89
G3	15,58	13,68
H1	6,83	7,73
H2	7,96	9,17
H3	7,92	7,05
I1	14,35	17,60
I2	16,11	17,24
I3	17,14	17,46
J1	10,38	12,79
J2	12,99	14,05
J3	13,12	13,37
K1	19,85	16,15
K2	21,24	17,33
K3	14,14	16,81
L1	10,73	12,97
L2	10,75	10,76
L3	11,49	12,59

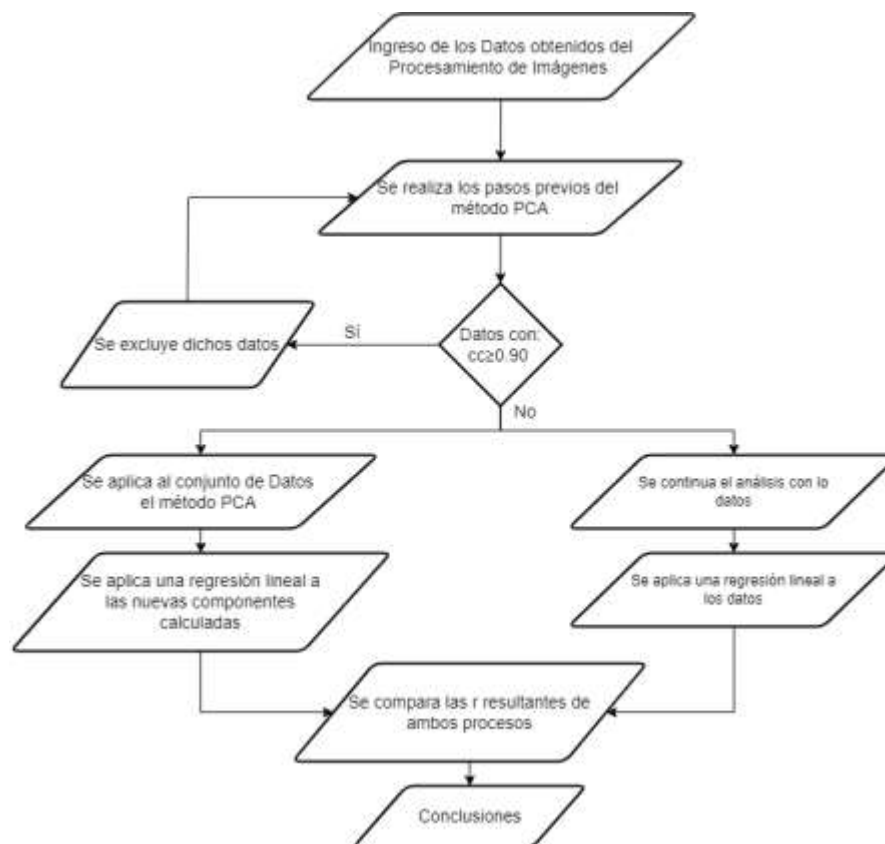
**Tabla 27** - Resistencia real y resistencia estimada

Con estos valores obtenemos una correlación muestral igual a 0.8502



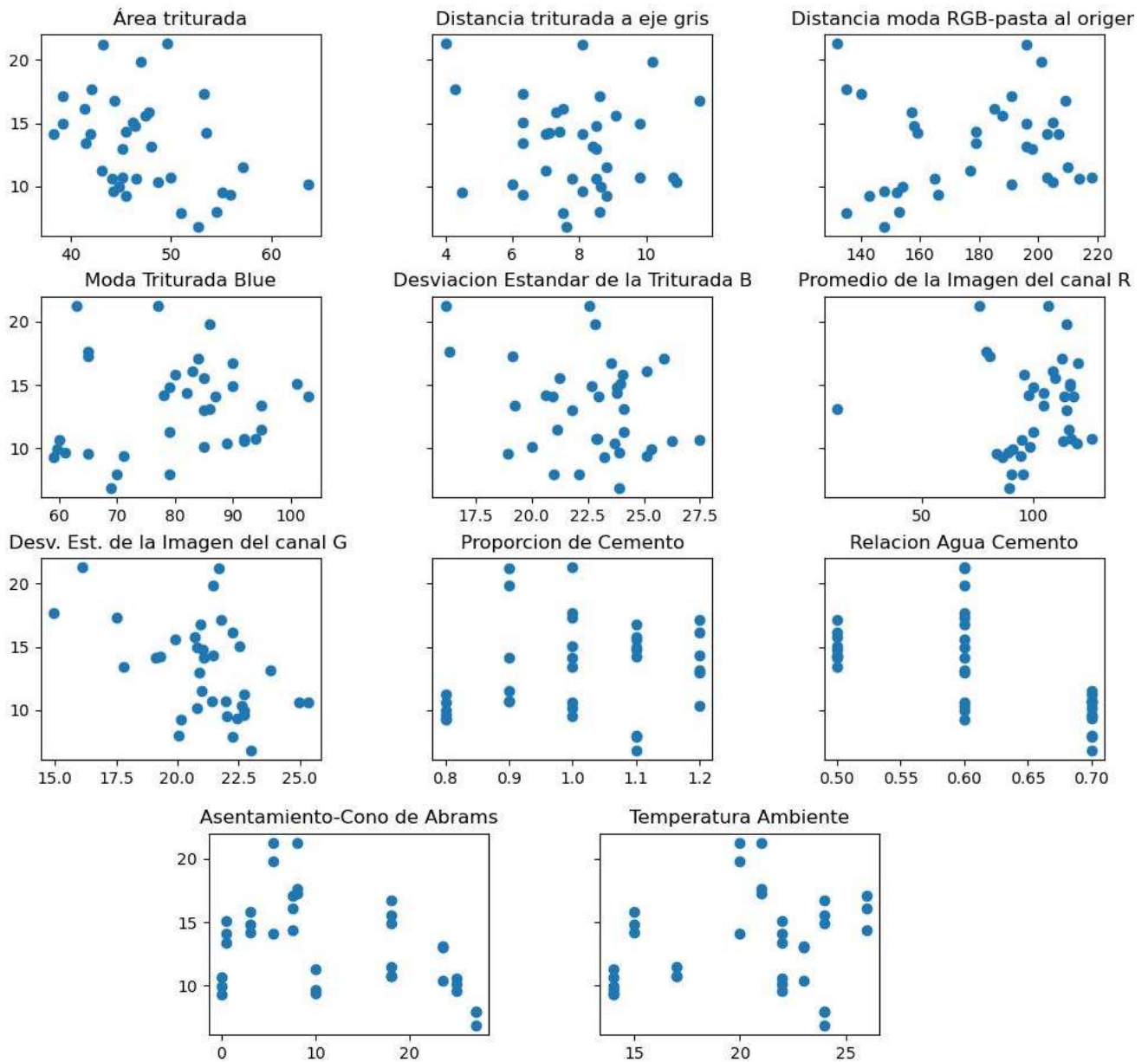
**Ilustración 36** - Resistencia predicha por el método de la regresión lineal vs Resistencia real. Fuente: Elaboración propia

### 8.3 Diagrama de Flujo para determinar la mejor correlación muestral



**Ilustración 37** - Diagrama de Flujo para determinar la mejor correlación muestral. Fuente: Elaboración propia

Resistencia (MPa) vs Cada Variable de Estudio



**Ilustración 38** - Resistencia (Mpa) vs cada variable de estudio. Fuente: Elaboración propia

## 8.4 Análisis de datos mediante redes neuronales

Para el análisis de datos se utilizaron 25 registros para entrenamientos y 10 registros para verificación.

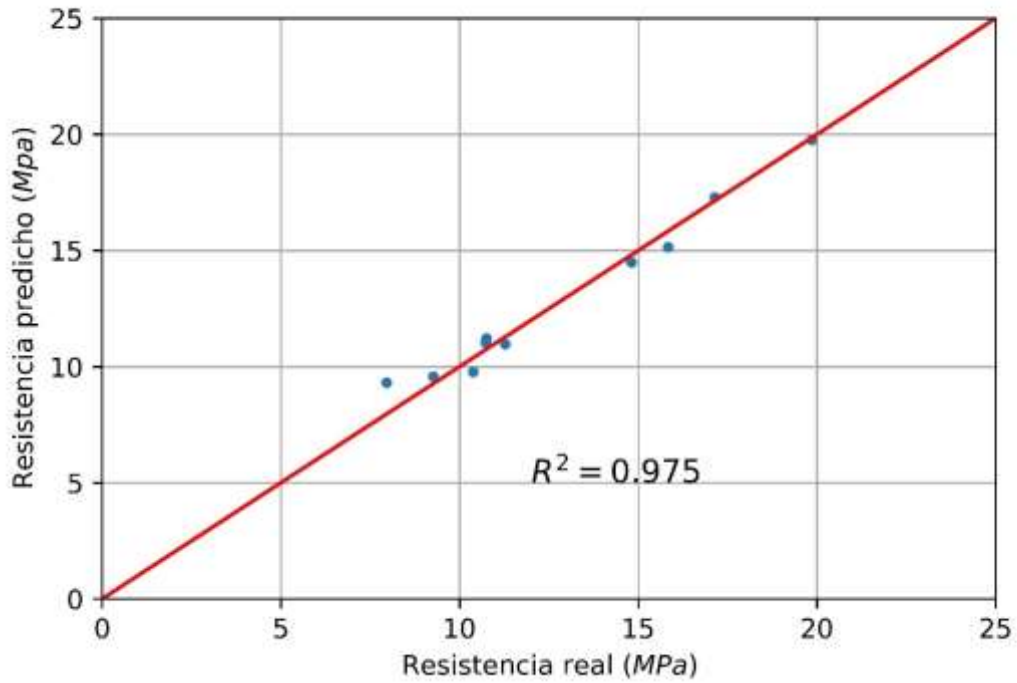
Se utilizó el método *klearn.neural\_network.MLPRegressor* de Python 3, utilizado como regresor de perceptrón multicapa cuya función es disminuir el error cuadrático usando métodos como el descenso estocástico del gradiente entre otros

Se obtuvo un error cuadrático mínimo utilizando los siguientes parámetros:

- Cantidad de capas ocultas: 2
- Cantidad de neuronas en la primera capa: 12
- Cantidad de neuronas en la segunda capa: 8
- Función de activación: Sigmoide logística
- Método de optimización: (LBFGS) algoritmo de Broyden – Fletcher – Goldfarb–Shanno de memoria limitada: El objetivo de este método es utilizar la información de curvatura de solo las iteraciones más recientes. La información de curvatura de las iteraciones anteriores, que son menos probables que sea relevante, son descartadas con el fin de ahorrar almacenamiento. [12]

### 8.4.1 Regresión Lineal entre la resistencia predicha y la resistencia correcta mediante redes neuronales

La regresión lineal de los 10 registros de verificación, entre la resistencia predicha y la resistencia correcta es de 0,973. Cuando más aproximado a la recta de 45° estén los valores, el ajuste es mejor



**Ilustración 39** - Resistencia predicha por el método de las redes neuronales vs Resistencia real. Fuente: Elaboración propia

## 9 CAPITULO IX: CONCLUSIONES

- La representación tridimensional de los canales R, G y B resulto importante en el estudio de la imagen mediante geometría euclidiana para obtener información sobre las fases principales de interés (Triturada-Pasta)
- La información proveída por la imagen es insuficiente para determinar una buena correlación (coeficiente de correlación muestral igual a 0.7210), por lo que fue necesario incluir las siguientes variables externas a la imagen:
  - Relación agua cemento
  - Proporción del cemento
  - Temperatura ambiente
  - Asentamiento por cono de Abrams

Con estas variables externas incluidas al análisis se obtiene un coeficiente de correlación muestral igual a 0,8506.

- Se ha notado que el comportamiento de las variables fueron bastantes dispersas por lo que se espera que el comportamiento mejore potenciando:
  - La cantidad de corte por probeta
  - La cantidad de imágenes por probeta
  - La cantidad de probetas
- Utilizando redes neuronales se obtiene una correlación de 0,973.
- A los intereses de esta investigación se opta por la ecuación obtenida por el método de los mínimos cuadrados, entre la resistencia y las variables de estudio como una representación más tangible de la correlación existente.

## 10 CAPITULO X: RECOMENDACIONES

- Aumentar la cantidad de corte por probeta y realiza sus respectivas capturas de imágenes
- Controlar la influencia del color de la vestimenta del fotógrafo
- Aumentar la cantidad de probetas por dosificación o bien disminuir la cantidad de dosificaciones y aumentar la cantidad de probetas
- Realizar las capturas de imágenes con celulares inteligentes.
- Estudiar el comportamiento del vacío en la probeta con relación a la Resistencia
- Reducir el programa a una aplicación móvil
- Ampliar el análisis a otros métodos
- Ampliar el estudio con diferentes tipos de materiales y dosificaciones

## 11 CAPITULO XI: ANEXOS

### 11.1 Imagen sin fondo de las probetas



Muestra A1



Muestra A2



Muestra A3



Muestra B1



Muestra B2



Muestra B3



Muestra C1



Muestra C2



Muestra C3



Muestra D1



Muestra D2



Muestra D3



Muestra E1

Muestra E3



Muestra F1

Muestra F2

Muestra F3



Muestra G1

Muestra G2

Muestra G3



Muestra H1

Muestra H2

Muestra H3



Muestra I1



Muestra I2



Muestra I3



Muestra J1



Muestra J2



Muestra J3



Muestra K1



Muestra K2



Muestra K3



Muestra L1

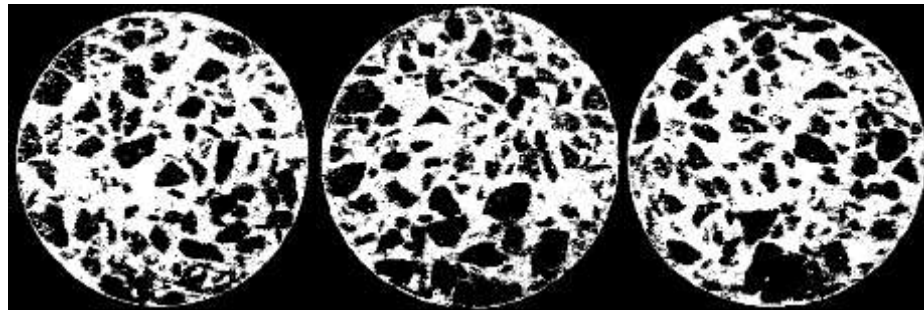


Muestra L2



Muestra L3

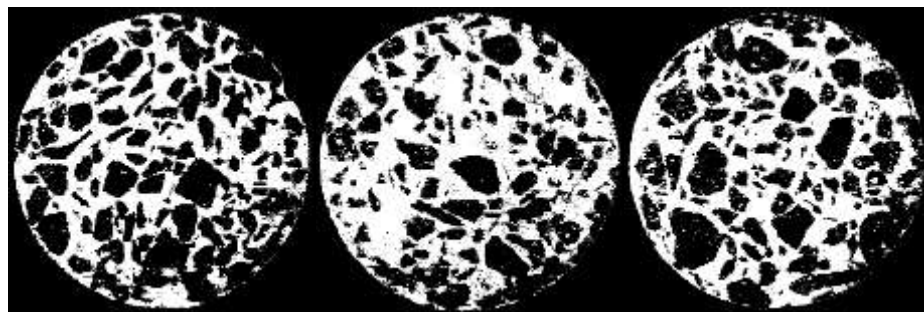
### 11.2 Imágenes binarias de las muestras para determinar el área de la triturada



Muestra A1

Muestra A2

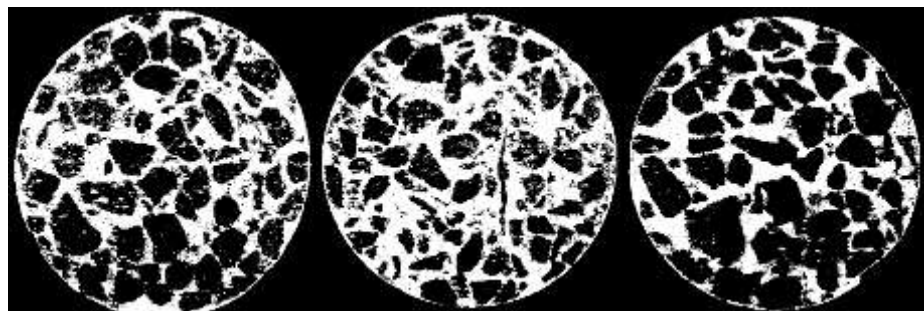
Muestra A3



Muestra B1

Muestra B2

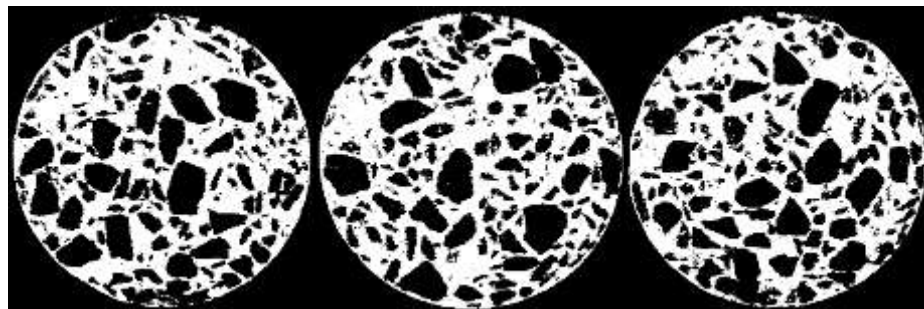
Muestra B3



Muestra C1

Muestra C2

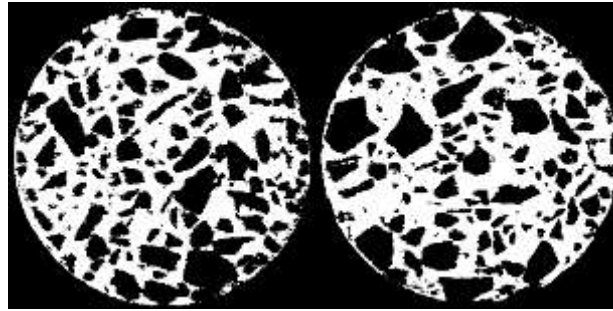
Muestra C3



Muestra D1

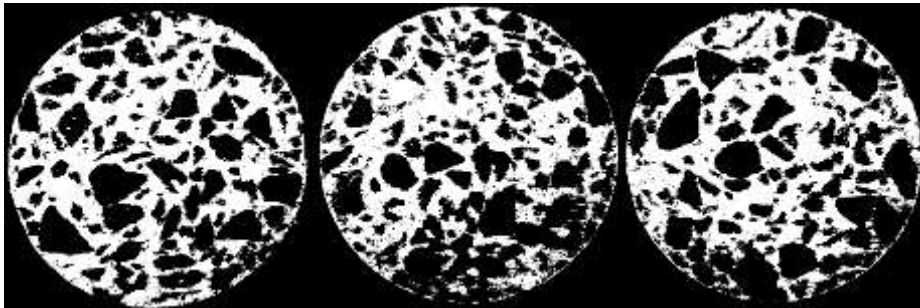
Muestra D2

Muestra D3



Muestra E1

Muestra E2



Muestra F1

Muestra F2

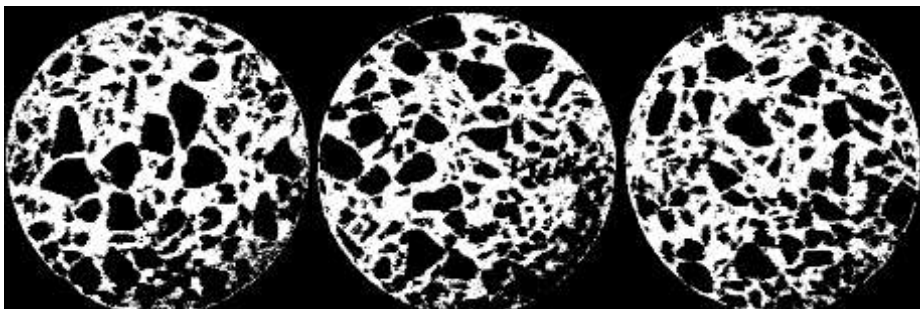
Muestra F3



Muestra G1

Muestra G2

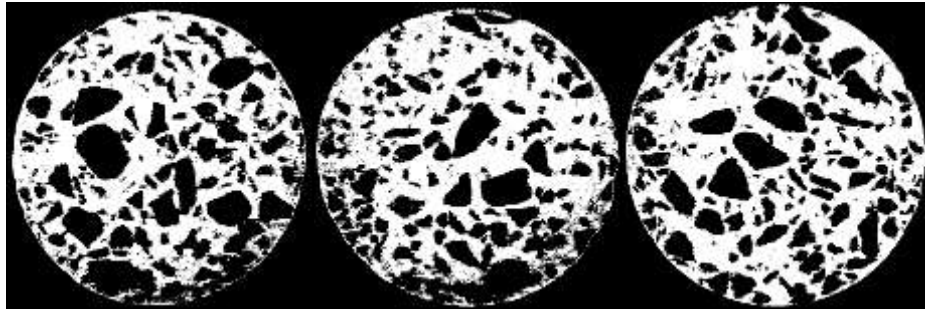
Muestra G3



Muestra H1

Muestra H2

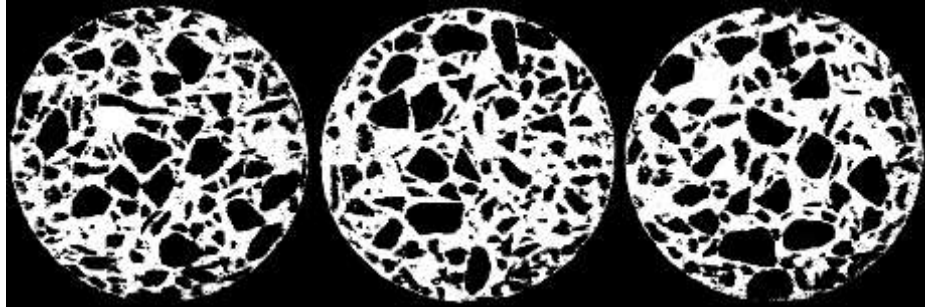
Muestra H3



Muestra I1

Muestra I2

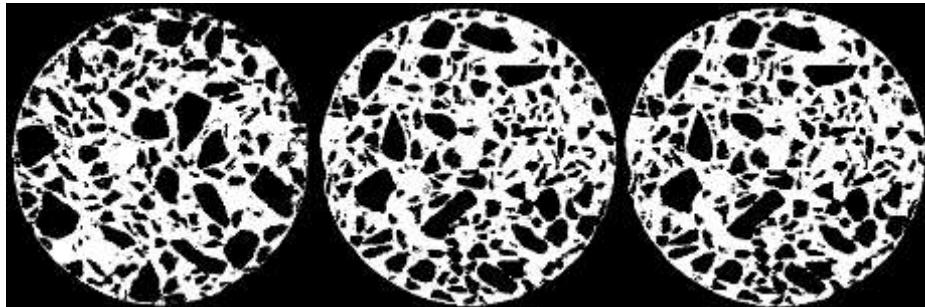
Muestra I3



Muestra J1

Muestra J2

Muestra J3



Muestra K1

Muestra K2

Muestra K3



Muestra L1

Muestra L2

Muestra L3

## 12 CAPITULO XII: BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. J. Rangel Mora y M. Á. Santos Amaya, MANUAL DE CONTROL DE CALIDAD DE LOS ENSAYOS DE HORMIGON, Andalucía , 2019.
- [2] M. J. Servin Gonzalez, ESTUDIO DE LA CALIDAD DEL HORMIGÓN UTILIZADO EN CONSTRUCCIONES CIVILES DE LA CIUDAD DE CORONEL OVIEDO, Coronel Oviedo, 2019.
- [3] A. García, F. Morán y J. C. Arroyo, JIMENEZ MONTOYA HORMIGÓN ARMADO 15° Edición, Barcelona: Gustavo Gili SL, 2009.
- [4] NORMA ASTM 150-07.
- [5] NORMA ASTM C 143.
- [6] NORMA ASTM C39/C39M-01.
- [7] W. Burger y B. M. J., Digital Image Processing segunda edición, Londres : Springer, 2016.
- [8] R. Walpole, R. Myers y S. Myers, PROBABILIDAD Y ESTADISTICA PARA INGENIERIA Y CIENCIAS novena edición, Ciudad de Mexico : Pearson Educación S.A., 2012.
- [9] G. Strang, ALGEBRA LINEAL Y SUS APLICACIONES cuarta edición, Ciudad de Mexico: International Thomson Editores, 2007.
- [10] F. G. Ramirez Villanueva, TECNICAS DE APRENDIZAJE AUTOMATICO PARA ANALISIS A FLEXION ENVIGAS RECTANGULARES DE HORMIGON ARMADO, San Lorenzo , 2019.
- [11] P. Isasi y I. Galvan, REDES DE NEURONAS ARTIFICIALES, Madrid: Pearson Educación S.A., 2004.
- [12] J. Nocedal y S. Wright, NUMERICAL AUTOMIZACION SEVOND EDICION, Springer, 2006.
- [13] B. Celalettin, Ç. Bekir y K. Semsettin, «ASSESSMENT OF CONCRETE COMPRESSIVE STRENGTH BY IMAGE PROCESSING TECHNIQUE,» *Construction and Building Materials*, pp. 526-532, 2012.
- [14] NORMA IRAM 1627:1997.