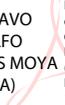


## CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTO DE GRADUACIÓN

Proyecto de Graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador, integrado por los profesores Ing. Gustavo Rojas Moya, Ing. Rommel Cuevas Kauffmann, Ing. Miguel Peralta Salas, Ing. Sonia Vargas Calderón, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería en Construcción, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

GUSTAVO  
ADOLFO  
ROJAS MOYA  
(FIRMA)



Firmado digitalmente por  
GUSTAVO ADOLFO  
ROJAS MOYA  
(FIRMA)  
Fecha: 2021.06.16  
14:21:08 -06'00'

---

Ing. Gustavo Rojas Moya.  
Director

Rommel Lezing  
Cuevas  
Kauffmann

Firmado digitalmente por  
Rommel Lezing Cuevas  
Kauffmann  
Fecha: 2021.06.16 14:50:35  
-06'00'

---

Ing. Rommel Cuevas Kauffmann.  
Profesor Guía

MIGUEL  
PERALTA SALAS  
(FIRMA)



Firmado digitalmente por MIGUEL PERALTA SALAS (FIRMA)  
DN: SERIALNUMBER=CPF-03-0422-0165, SN=PERALTA  
SALAS, G=MIGUEL, C=CR, O=PERSONA FISICA,  
OU=CIUDADANO, CN=MIGUEL PERALTA SALAS (FIRMA)  
Razón: Mi firma en este documento representa mi aceptación  
de los términos definidos  
Ubicación: la ubicación de su firma aquí  
Fecha: 2021.06.15 06:55:54-06'00'  
Foxit Reader Versión: 10.1.3

---

Ing. Miguel Peralta Salas.  
Profesor Lector

SONIA VARGAS  
CALDERON  
(FIRMA)



Firmado digitalmente  
por SONIA VARGAS  
CALDERON (FIRMA)  
Fecha: 2021.06.16  
14:04:38 -06'00'

---

Ing. Sonia Vargas Calderón.  
Profesora Observadora

# **Desarrollo de concreto hidráulico con propiedades magnéticas.**

# Abstract

Innovation and new technologies always start with small steps. In the case of concrete technologies, an attempt was made to take a small step in this project where exploration was proposed in the development of magnetic concretes, from ferromagnetic aggregates which were substituted in the fine aggregate. For this purpose, concrete cylinders were developed with two different 1020 steel particles. One mixed with shavings and the other one with filing. The strengths of both mixtures were compared with those of a standard concrete which was called Base Concrete. This was to determine if the addition of these particles altered the f'c positively or negatively. The dosages used created in the concrete cylinders a magnetic field on the surface of them of approximately 0,5T (Tesla) when subjected to a solenoid of 400 turns fed with 6A (Amps) of direct current. All this from the measurements of the adhesion force of a Neodymium magnet against the concrete using a laboratory-built balance. This magnetic field generated a magnetizing force of approximately 0,4N in the concrete. Further research in this line may lead discovery of a concrete with higher magnetization forces and at lower costs.

**Keywords:** Concrete, magnetism, ferromagnetic materials, steel chip, steel filing, magnetic concrete, levitation.

# Resumen

La innovación y nuevas tecnologías siempre empiezan con pequeños pasos. Para el caso de las tecnologías de concretos, se intentó dar un pequeño paso en este proyecto donde se propuso la exploración en el desarrollo de concretos magnéticos, a partir de agregados ferromagnéticos los cuales se sustituyeron en el agregado fino. Se desarrolló para esto cilindros de concreto con dos distintas partículas de acero 1020, una mezcla con viruta y la otra con limadura. Las resistencias de ambas mezclas se compararon con las de un concreto patrón nombrado Concreto Base, para determinar si la adición de estas partículas alteraba positiva o negativamente el f'c. Las dosificaciones utilizadas crearon en la superficie de los cilindros de concreto un campo magnético de aproximadamente 0,5T (Tesla) al someterse en un solenoide de 400 espiras alimentado con 6A (Amperios) de corriente directa. Esto a partir de las mediciones de la fuerza de adherencia de un imán de Neodimio contra el concreto por medio de una balanza construida en el laboratorio. Este campo magnético generó en el concreto una fuerza de magnetización de aproximadamente 0,4N. Continuar investigando en esta línea permitirá descubrir un concreto con mayores fuerzas de magnetización y a menores costos.

**Palabras claves:** Concreto hidráulico, magnetismo, materiales ferromagnéticos, viruta de acero, limadura de acero, concreto magnético, levitación.

# **Desarrollo de concreto hidráulico con propiedades magnéticas.**

ELIUD CALDERÓN BADILLA

Proyecto final de graduación para optar por el grado de  
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

Junio del 2021

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA  
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

## **Dedicatoria**

Este proyecto está dedicado a la memoria de mi hermano menor Yaid Calderón Badilla, estudiante de Ingeniería Física en el Tecnológico de Costa Rica y gran apasionado por el universo y sus grandes misterios. Quien creía que lo imposible se vuelve posible con solo que uno se lo proponga.

Siempre estará en mi corazón.

# Contenido

Prefacio .....	3
Resumen ejecutivo.....	4
Introducción.....	6
Marco teórico .....	6
Planteamiento del problema .....	15
Antecedentes .....	16
Metodología .....	18
Resultados .....	26
Análisis de los resultados .....	91
Conclusiones.....	113
Recomendaciones .....	116
Apéndices .....	118
Referencias .....	119



# Prefacio

La evolución de la ingeniería se basa en la investigación. La transmisión de conocimientos provoca que nuevas generaciones utilicen estos para innovar, crear y ampliar un tema específico, para desarrollarlo más y explorar en otros sectores.

La tecnología actual y todo el desarrollo a nivel mundial se deben a la investigación. Sin esto, la industria en paralelo al estilo de vida de las personas, no serían lo mismo.

La ingeniería civil ha enfrentado siempre un reto, que es construir con menor tiempo, menor costo, con una mayor eficiencia y mejor provecho de los materiales. También, con nuevos materiales, pues con el tiempo se desarrollan materiales nuevos para la construcción, especialmente en el tema de acabados y el concreto es un material en el que constantemente se está investigando. El avance en tecnologías de concreto permite modificar y manipular al concreto para utilizarse con distintos propósitos.

Con dicho espíritu de innovación, en este proyecto se busca modificar el concreto hidráulico a partir de un material ferromagnético. El concreto magnético es una propuesta basada en generar una matriz de diseño de mezcla que pueda cargarse magnéticamente por inducción electromagnética.

Para esta modificación, se plantea la sustitución de agregado fino por limadura y viruta de acero 1020, permitiendo así que el acero sea parte de los componentes básicos y esenciales del concreto, en lugar de añadirlo como un aditivo más.

Todos los ensayos, mezclas de concreto y obtención de materia prima se realizaron principalmente en las instalaciones del Tecnológico de Costa Rica, tanto en el Centro de Investigación en Vivienda y Construcción (CIVCO), como en el Taller de la Escuela de Ingeniería en Diseño Industrial y el Taller de la Escuela de Electromecánica.

Es importante promover la investigación pues es la única herramienta que permite a la ingeniería evolucionar.

Este es un primer paso en la creación de un material de construcción que pueda funcionar a futuro como una opción para utilizarse en un sistema de levitación de estructuras.

## Agradecimientos

Primero agradezco a Dios por mi etapa universitaria, todas las experiencias vividas y la oportunidad de llegar hasta este punto con salud y las capacidades de desarrollar mi proyecto final de graduación. También, a mi familia y amigos, que me motivaron, impulsaron y apoyaron en todos estos años de estudio.

Se agradece a todas las personas que estuvieron cerca y colaboraron en las distintas etapas del proyecto, tanto estudiantes como técnicos y personal docente y administrativo de las carreras de Ingeniería en Construcción, Ingeniería Electrónica, Ingeniería en Mantenimiento Industrial, Ingeniería en Diseño Industrial e Ingeniería Física.

A las empresas SJ Transformadores y su propietario Ernesto Alonso González Meléndez se le extiende un especial agradecimiento por la donación del solenoide con el que se llevaron a cabo parte de los experimentos realizados. A la empresa Quebrador Ochoмого LTDA se les agradece pues donaron los agregados utilizados en este proyecto. De igual manera a Holcim Costa Rica quienes donaron el cemento con el que se desarrollaron las mezclas de concreto magnético.

Por último, a mi profesor guía el Ingeniero Rommel Cuevas quién fue de gran apoyo con su orientación, creyó en mí desde un inicio y siempre me motivó a seguir y concluir con mi proyecto.

# Resumen ejecutivo

La investigación de este proyecto acerca del concreto magnético, es exploratoria, en la que se busca lograr que un espécimen de concreto se pueda magnetizar.

Con este proyecto se pretendía lograr crear un concreto capaz de magnetizarse para así evaluar su eventual uso en sistemas de levitación para aislar cargas de una estructura de la superficie del suelo permitiendo así generar un aislamiento sísmico en las bases de la estructura. Sin embargo, las fuerzas magnetizantes logradas, debido a las dosificaciones que se pudieron utilizar por la limitada materia prima, no generaron las fuerzas necesarias para desarrollar aún dicho sistema de levitación, pero sí para generar datos que pueden proyectar dosificaciones distintas y dejar las bases para futuras investigaciones.

Para el estudio se realizó primero la caracterización de los agregados que se utilizaron en las mezclas de concreto, para lo que se consideraron tamaños máximos nominales de 12,5 mm, debido a que se necesitaba un concreto con pocos vacíos, más denso.

Estos especímenes incluían un metal ferromagnético en su diseño de mezcla de concreto para que al endurecerse la mezcla quedara distribuida de manera homogénea, para su posterior proceso de magnetización.

El diseño y construcción de la bobina se realizó en la empresa SJ Transformadores, ubicada en Belén de Heredia y permitió inducir los cilindros de concreto como si se tratara de un electroimán.

Los cilindros de prueba se fallaron en dos condiciones, magnetizados y no magnetizados. Se sometieron a la falla a la compresión a 3 edades: 7, 14 y 28 días, pero solo para esta última edad se magnetizaron algunos especímenes. A los 28 días se fallaron los 6 especímenes correspondientes de cada mezcla realizada y se obtuvo el  $f_c$  de cada

tipo de concreto. A la vez se fallaron 2 cilindros adicionales para los concretos con partículas ferromagnéticas, los cuales fueron sometidos al campo magnético producido por el solenoide antes de la falla, con lo cual, se obtuvo que para el Concreto con Viruta sí hubo un aumento en la resistencia para los cilindros fallados luego del proceso de magnetización, mientras que para los cilindros con limadura, no fue así, pues no hubo diferencia entre las resistencias de los cilindros magnetizados y sin magnetizar.

También, se realizó una mezcla de concreto base para evaluar la variación de los dos concretos modificados por el hecho de tener un metal en la matriz de concreto. Para este estudio estadístico se utilizó una prueba t de dos muestras, ayudado por el software Minitab. Se logró determinar que el concreto modificado con limadura de acero aumenta la resistencia de un concreto hidráulico convencional (Concreto Base), mientras que el concreto modificado con viruta de acero no logró alcanzar la resistencia de diseño, quedando muy por debajo.

Se midió la fuerza de adherencia que se generó, utilizando un imán de neodimio por medio de una balanza construida en el laboratorio. A partir de esto se realizó una proyección de cuánta corriente y/o qué dosificaciones de metal se podrían usar. En cuanto a la validación de los datos verificando su confiabilidad se utilizó el alfa de Cronbach, también, por medio del software Minitab, determinando así que para ambos tipos de concreto sí hubo magnetización en los especímenes. Dicha fuerza magnética aumentaba conforme se aumentó la corriente circulante en el solenoide.

Por último, a partir de la inversión económica realizada en el proyecto se estimó el costo de obtención de materia prima para la limadura y la viruta de acero 1020. Determinando

que para la realización de estos especímenes, se requiere una gran inversión.

# Introducción

En los últimos años, en el ámbito de la ingeniería civil, se ha desarrollado con mayor ritmo la tecnología de aisladores sísmicos para estructuras. Esto, debido a que existe una variable de diseño llamada "Fuerza sísmica". La aceleración que se genera en el suelo y este en la estructura puede ocasionar no solo daños materiales, también pérdidas humanas.

Estos sistemas aisladores o disipadores absorben gran parte de la energía generada en la estructura producto del sismo, en promedio estos pueden absorber aproximadamente un 80% de la fuerza o energía (Oviedo & Duque, 2006). Para los japoneses, según Oviedo y Duque, estos sistemas de disipación de energía se clasifican en 4 tipos: sistemas aislados en la base, sistemas de absorción de energía, sistemas de efecto de masa suspendida y sistemas de control activo. Por otro lado, los estadounidenses los clasifican en 3: sistemas aislados, sistemas de disipación pasiva de energía y sistema de control activo. Estas tecnologías se han aplicado en algunos edificios y estructuras en diferentes países y se continúan utilizando.

Entre los aisladores más comunes están los elastómeros reforzados o de caucho natural con núcleo metálico, apoyos basculantes de fricción, apoyos deslizantes y amortiguadores o elementos flexibles (Oviedo & Duque, 2006). Están también los amortiguadores metálicos, sin embargo, estos al absorber la energía de un sismo se deforman y por lo general deben ser reemplazados.

En tecnologías más recientes, nuevamente destaca Chile. Durante el terremoto del 2010, un edificio ubicado en la comuna de Las Condes en Santiago no presentó daños por un sistema de péndulos colocados en el penúltimo piso. Este sistema le permitió al edificio mantenerse en equilibrio durante el sismo, pues la fuerza que lo hacía tambalearse se contrarrestaba con el movimiento contrario que tenían estos 2

péndulos, cuyos pesos suman aproximadamente 300 toneladas, según Parisi.

Si bien estos sistemas ayudan a disminuir el impacto de un sismo, porqué no buscar eliminarlo completamente.

¿Por qué no pensar en separar completamente la estructura del suelo? ¿Será momento ahora de involucrar la levitación en la ingeniería civil?

La idea de utilizar el magnetismo como una fuente de levitación y con esto separar una estructura del suelo, surgió al ver un documental sobre las consecuencias del terremoto de Chile en 2010. El análisis forense de las estructuras colapsadas me generó la siguiente inquietud: si una estructura no estuviera en contacto con el suelo, el sismo no influiría en esta.

Al buscar separar las cargas de una estructura del suelo haciendo que estas sean "absorbidas" o retenidas en un campo magnético, se eliminaría el impacto de un sismo.

Ahora bien, existen cargas laterales como el viento, para lograr estabilizar estas las bases también deberían generar restricciones que impidan a la estructura desplazarse lateralmente, es decir, como generando un tipo de "cajón", donde se restrinja en todas direcciones y la base esté como envuelta en un campo magnético, similar de cierta forma a los rieles de los trenes Maglev.

La desventaja es que no existe algún material en la construcción que pueda magnetizarse momentáneamente como un electroimán para generar fuerzas magnéticas que puedan ser involucradas en un sistema de levitación.

De aquí nace la Hipótesis: Separar una estructura del suelo soportando todas sus cargas, se puede lograr por medio de levitación magnética, creando un material con las propiedades necesarias para cargarse magnéticamente.

Por esto, se busca generar en el concreto hidráulico esas propiedades magnéticas,

sustituyendo agregado fino por un material ferromagnético y estudiar, su reacción y comportamiento físico-mecánico, además de su capacidad de magnetizarse al inducirse como un electroimán. De los resultados obtenidos en esta investigación quedan muchas preguntas, muchos supuestos y variables que se pueden aclarar más a fondo con nuevas exploraciones, todo con el fin de iniciar un proceso investigativo que permita llegar en algún punto a generar la tecnología que permita levitar estructuras.

## Objetivo General

Analizar las propiedades electromagnéticas de un concreto hidráulico modificado con partículas de acero 1020.

## Objetivos Específicos

1. Determinar la dosificación del metal ferromagnético en la mezcla de concreto, adecuada para permitir que los especímenes se carguen magnéticamente manteniendo su resistencia a la compresión.
2. Determinar el comportamiento físico-mecánico del material desarrollado.
3. Cuantificar las fuerzas magnéticas generadas en los especímenes de concreto hidráulico.
4. Analizar estadísticamente las propiedades del concreto desarrollado en términos de resistencia y magnetización.

## Alcances y Limitaciones

El alcance del proyecto está limitado a desarrollar un concreto capaz de magnetizarse, manteniendo su resistencia, esto al ser introducido en una bobina conectada a una fuente de corriente directa.

Las limitaciones del proyecto con respecto a la elaboración de cilindros son:

- La obtención de limadura y viruta de acero es un proceso costoso, debido a las herramientas y tiempo que se tarda en obtener. Lo que ocasiona que esta materia prima para la elaboración de cilindros sea limitada. En la industria,

no se encontró ningún taller o empresa que desgastara barras de acero 1020 completamente, ya sea en forma de limadura o de viruta. Por esto se debió extraer por medios propios, utilizando para la limadura discos de corte y desbaste para un esmerilador angular. Las horas que se demora el proceso de desgaste, atrasaban el proceso y encarecían los costos, pues se pagaba por hora. Para producir estos en mayor escala se ocuparían otros procesos y equipo industrial desarrollado específicamente para esta labor.

Con respecto al diseño de la bobina para magnetizar el concreto e intentar crear un electroimán:

- Para diseñar la bobina se requirió ayuda externa y de otros profesionales expertos en el tema, pues no son temas competentes a la carrera de Ingeniería en Construcción. Además, no se tenía equipo para construir la bobina, pero se logró encontrar una empresa que pudiera realizarla.

Con respecto a la medición de los campos magnéticos de los especímenes:

- No se disponía de un Gaussímetro que midiera el campo magnético, por lo que tuvo que medirse con un equipo construido en el laboratorio.
- Para poder avalar los datos, debido a que la obtención de estos fue con un instrumento y un método completamente empírico, se realiza un estudio de confiabilidad de estos.

# Marco teórico

La investigación del magnetismo fue de suma importancia para un modelo experimental.

Dentro del mundo de los metales existen metales “Amagnéticos” y “Ferromagnéticos”. El primero corresponde a todos los materiales que no son capaces de conservar la orientación que infunde el campo magnético externo en sus electrones, es decir, no pueden mantener un campo magnético propio; se divide también en materiales “Paramagnéticos” y “Diamagnéticos”. Los materiales paramagnéticos son aquellos que al encontrarse con un campo magnético externo, orientan sus electrones en el sentido del campo, siendo atraídos por este. Los diamagnéticos por otro lado, orientan sus electrones en el otro sentido, viéndose repelidos por el campo magnético percibido.

Los materiales ferromagnéticos, sin embargo, sí son capaces de conservar un campo magnético propio pues luego de retirar el campo magnético externo, algunos dominios no regresan a su posición original. Quiere decir que todos los imanes son materiales ferromagnéticos.

Según Pozueta, los materiales ferromagnéticos más comunes son el hierro el cobalto y el níquel. Sin embargo, son metales puros, pero existen aleaciones con estos metales que también son ferromagnéticos y poseen incluso mayores permeabilidades magnéticas relativas ( $\mu_r$ ) con valores alrededor de 100000, cuando las de los materiales puros rondan los 2000 y 10000.

Existen varios materiales magnéticos que sirven para hacer imanes permanentes. Tal como indica Pérez-Alcázar, están: aceros magnéticos, aleaciones de ALNICO, ferritas de bario y estroncio, imanes de tierras Raras y otros como los imanes de CoPt y los imanes de MnAl.

Este autor también, proporciona una figura elaborada por Hadjipanayis en el 2008, la cual muestra la orientación de dominios según diferentes condiciones para imanes permanentes de Nd-Fe-B durante su evolución.

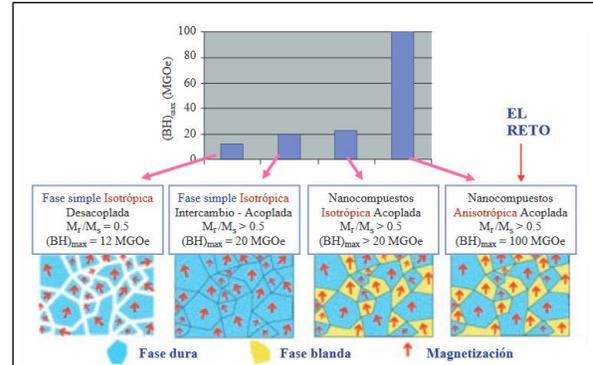


Figura 1. Desarrollo histórico de los Imanes Permanentes (IPs) nanoestructurados de Nd-Fe-B. Fuente: (Pérez-Alcázar, 2016)

Lo que se rescata de esta imagen es la orientación de los dominios (flechas rojas), pues muestran el comportamiento en distintas condiciones. Para efectos de este proyecto se tendría la situación de la primera condición ilustrada en la parte inferior izquierda, donde se presenta una fase isotrópica desacoplada. Esto quiere decir que las partículas con dominios y propiedades magnéticas se encuentran separadas por una fase no magnética. Aterrizando esto propiamente al proyecto, serían las partículas de acero rodeadas de material de concreto hidráulico.

Por otra parte, los imanes permanentes poseen un método de fabricación muy particular. Abad y Sagredo nos muestran un esquema realizando por Yang, sobre el proceso de manufactura de imanes NEO, en la figura 2.

Su proceso requiere de máquinas y hornos especiales para poder manipular los metales, fundirlos, crear moldes de arena y poseer fuentes de alta corriente. Los imanes permanentes son capaces de alcanzar grandes fuerzas de adherencia, que rondan e incluso superen los 100 kgf. Estos valores son brindados por los fabricantes de imanes en las fichas técnicas, como por ejemplo el de la empresa Norelem, que incluso brinda la fuerza de sujeción o adherencia en N.

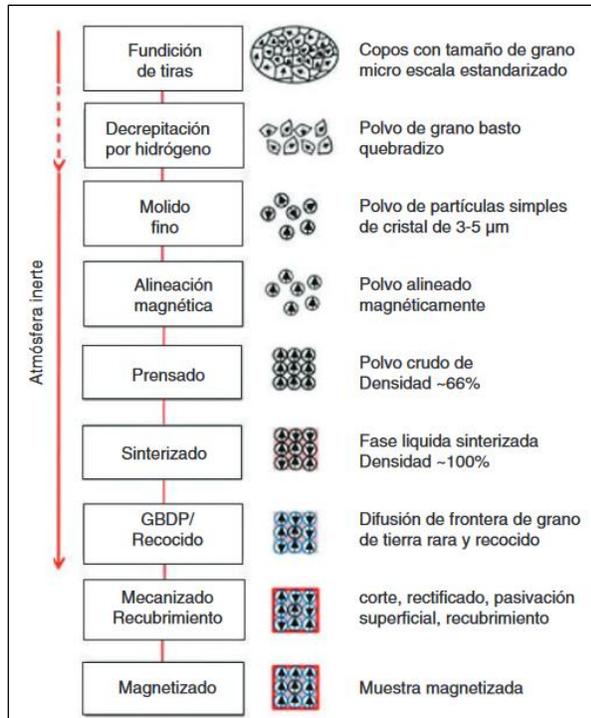


Figura 2. Proceso esquemático de manufactura de imanes sinterizados. Fuente: (Abad y Sagredo, 2018).

Los imanes no son todos permanentes, pues existen los imanes permanentes y los electroimanes.

Según indican Chávez y Chávez, los electroimanes son aquellos que pueden activarse y desactivarse con una corriente eléctrica, como por ejemplo por medio de inducción electromagnética con un solenoide o una bobina. Es decir, son imanes temporales, que a diferencia de los permanentes, estos se magnetizan ante la presencia de un campo magnético ejercido por una corriente eléctrica, pero una vez que esta se retira, su magnetización desaparece.

*“En particular, los materiales ferro y ferromagnéticos se emplean en el diseño de transformadores y electroimanes, constituyendo por lo general un núcleo central sobre el que se arrolla un bobinado de un material conductor. El paso de corriente eléctrica por el bobinado produce un gran campo magnético en el núcleo.”*  
(Catalá et al, 2018)

Al trabajar con un electroimán se pueden conseguir fuerzas magnéticas bastante grandes, por supuesto estas están relacionadas al material ferromagnético del que se componga el núcleo de

la bobina, la cantidad de espiras, la cantidad de corriente y al área transversal.

Los electroimanes son utilizados en los sistemas de levitación para trenes en Alemania y Japón, por ejemplo. Estos trenes Maglev, funcionan en 2 maneras, según Perren, EMS: Suspensión electromagnética y EDS: Suspensión Electrodinámica. Esto demuestra la capacidad que poseen los electroimanes en cuanto a fuerza magnética se refiere.

La levitación desde el inicio de sus estudios ha sido muy llamativa para la ciencia, ahora aplicado a la industria de transportes, motores e incluso aparatos eléctricos (figura 3).



Figura 3. Parlante con sistema de levitación. Fuente: (Pinterest).

Un experimento publicado por la revista Nova Scientia muestra la levitación de un imán de neodimio sujeto a una viga con pivote en el centro de su claro, sobre un electroimán, como se muestra en la figura 4.

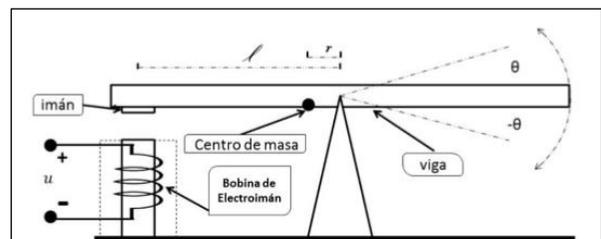


Figura 4. Experimento de levitación en un grado de libertad. Fuente: (Pegueros et al, 2017)

Esto muestra como claramente un electroimán tiene la capacidad de mantener a otro cuerpo en levitación a partir de las polaridades iguales.

Los electroimanes cambian mucho su capacidad magnética dependiendo del núcleo de la bobina, ya que según el material del que se componga varía su permeabilidad magnética. Esta

es una propiedad de los materiales que determina la capacidad con la que las líneas de flujo se pueden establecer en él, según Boylestad. La permeabilidad relativa es la razón de la permeabilidad que posee un material con respecto a la del vacío. Según indica González, la permeabilidad relativa del acero dulce posee un valor de 2000, como se observa en la siguiente figura.

Ferromagnéticas	Permeabilidad relativa ( $\mu_r$ )
Polvo de Permalloy (2-81), 2 Mo-81 Ni de composición porcentual y el resto Fe e impurezas	130
Cobalto	250
Níquel	600
Ferroxcube 3 (.Perrito Mn-Zn)	1.500
Acero dulce (0,2 C)	2.000
Hierro con impurezas (0,2 C)	5000
Hierro silicio utilizados en transformadores (4 Si)	7.000 o menor
Permalloy 78 (78,5 Ni)	100.000
Hierro purificado	200.000
Superpermalloy (5 Mo-79 Ni)	1.000.000

Figura 5. Permeabilidad relativa de algunos materiales. Fuente: (González, 2009)

Cuando las permeabilidades magnéticas relativas son mayores a 1, esto indica que el material es ferromagnético.

La superconductividad, que también es un tema de mucha investigación en la actualidad, permite a los materiales con esta propiedad entrar en levitación ante la presencia de un imán, esto, debido a que se genera en el material un campo magnético opuesto al exterior. Esta propiedad, sin embargo, solo se logra a temperaturas muy bajas, alrededor de 0 K, temperatura a la cual se descubrió la superconductividad (Gazo, 2008). Esto dificulta crear un material para construcción ya que no es concebible mantener un material a esta temperatura permanentemente, pues incurre en un gran gasto, tomando en cuenta que esas temperaturas se consiguen con nitrógeno líquido. Por lo tanto, a pesar de que estos materiales generan levitación no es factible su uso en la creación de un concreto magnético para potenciar su uso comercial. Si se llegara a obtener la tecnología y los conocimientos científicos para desarrollar superconductores a temperatura ambiente, eso podría facilitar la creación de un concreto con propiedades superconductoras.

En el mundo del magnetismo, existen varios términos importantes para poder trabajar con bobinas o solenoides. La fuerza magnetomotriz ( $F_m$ ), según Boylestad, es la presión que existe sobre un sistema para que se establezcan líneas de flujo magnético, por la

ecuación Ec.1 se evidencia que con un aumento en el número de vueltas del alambre, en la corriente o en ambas, influirá en el incremento de esta presión.

$$F_m = N * I \quad \text{Ec.1.}$$

Donde:

- N: número de vueltas de alambre del dispositivo.
- I: corriente. [Amperios]

De aquí se genera la fuerza magnetizante a la que se le asigna la letra "H". Boylestad la define como la fuerza magnetomotriz por unidad de longitud, generando la siguiente ecuación:

$$H = \frac{N*I}{L} \quad \text{Ec.2.}$$

Donde:

- L: longitud. [metros]

Esta fuerza tiene un efecto pronunciado en la permeabilidad magnética resultante de un material, pues conforme se incrementa la fuerza magnetizante, la permeabilidad se aumenta a un máximo por un momento, sin embargo, luego cae a un mínimo donde se estabiliza. Esto se ilustra en la siguiente figura.

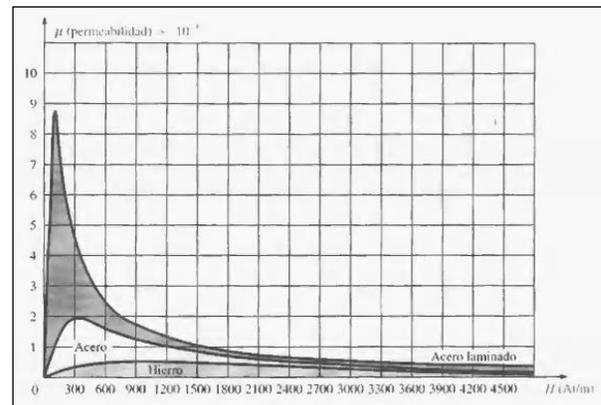


Figura 6. Variación de la permeabilidad magnética con la fuerza magnetizante. Fuente: (Boylestad, 2004)

Combinando esta fuerza magnetizante y la permeabilidad magnética, se obtiene el campo magnético o densidad de flujo, donde para una fuerza magnetizante dada, a mayor permeabilidad magnética, habrá más densidad de flujo. Derivando en la siguiente ecuación:

$$B = \mu * H \quad \text{Ec.3.}$$

Esto a nivel general introduce los campos magnéticos, sin embargo, los comportamientos magnéticos varían según la forma en que estos se induzcan. Es distinto alimentar con corriente un alambre recto, una espira (un alambre doblado formando un círculo), una espira cuadrada, un toroide, un solenoide o un transformador.

Al querer trabajar con un electroimán, este debe ser cilíndrico, debido a que los especímenes de concreto son cilíndricos, por lo que se utilizaría un solenoide de sección circular.

Las ecuaciones van a variar ligeramente para un solenoide, pues el campo magnético es más intenso en el interior del solenoide según Hayt, donde se utiliza la ecuación Ec.3 para calcular el campo magnético. Sin embargo, Catalá, indica que el campo magnético en un extremo sobre el eje de la bobina corresponde a la mitad, generando así lo mostrado en la ecuación Ec.4.

$$B = \frac{\mu * N * I}{2 * L} \quad \text{Ec.4.}$$

Al utilizar la corriente en Amperios y la longitud en metros, las unidades resultantes del campo magnético son Teslas [T].

Por otro lado, para la fuerza ejercida por un electroimán sobre otro objeto, Sadiku en su libro demuestra la ecuación para el cálculo de este valor.

$$F = \frac{B^2 * A}{2 * \mu} \quad \text{Ec.5.}$$

Donde:

- A: área transversal del núcleo del solenoide.

En cuanto al diseño del concreto, este se trabajará con base en códigos de la American Concrete Institute (ACI). La ACI 211.1-91 es una práctica estándar para el diseño de mezclas de concreto hidráulico. Esta práctica funciona tanto para aplicarse a mezclas con o sin aditivos. Además, los tipos de cemento para los que aplica esta práctica son los cementos tipo Portland y los mencionados en la norma de la American Society for Testing and Materials, ASTM C595/C595M-20 en la sección 4, que son: Cementos con escoria de alto horno, cementos con puzolanas, cementos de piedra caliza y cementos mezclados ternarios.

En este proyecto el cemento utilizado fue el FuerteMax que corresponde, según el Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica (INTECO), a un cemento modificado mixto, el cual es modificado con puzolanas y caliza (INTECO, 2018).



Figura 7. Cemento hidráulico FuerteMax de Holcim Costa Rica. Fuente: www.holcim.cr.

Con respecto a los agregados, estos deben pasar por ciertos estudios los cuales se realizan por medio de ensayos normados por la ASTM. Las primeras normas utilizadas son la ASTM D75-19 y ASTM C702-18. Con las cuales se extrae la muestra de campo y se disminuye hasta muestras de un tamaño adecuado para los distintos ensayos.

La norma ASTM D75-19 es una pequeña guía que aconseja cómo extraer las muestras de agregados de su fuente, de manera que las muestras obtenidas sean representativas de las pilas de material de los quebradores o proveedores.

Ya obtenido este material, destinado a utilizarse en las mezclas de concreto hidráulico, se debe reducir a cantidades representativas y adecuadas para llevar a cabo los distintos ensayos de caracterización. La norma ASTM C702-18 establece cómo tratar este material de manera que se homogenice adecuadamente y así ir extrayendo pequeñas muestras representativas del material en cantidades adecuadas para cada uno de los siguientes ensayos.

El primero de estos corresponde al agregado fino. La norma ASTM C117-17, la cual establece un proceso de lavado para la muestra que será destinada al ensayo de granulometría. Esta muestra debe ser lavada, para así eliminar el

material pasando el tamiz #200 (75µm), es decir, partículas finas.

El ensayo de granulometría se realiza con base en los procedimientos y parámetros de la norma ASTM C136-19. Esta permite declarar si un agregado es apto o no para el uso en mezclas de concreto hidráulico, a partir de los límites de los requisitos de especificación aplicables para la distribución del tamaño de partículas. Estos límites se encuentran en la norma ASTM C33-18, la cual define los requisitos que se deben cumplir para la calificación y la calidad de agregado fino y grueso para uso en mezclas de concreto. En el caso específico de Costa Rica, el Decreto N° 10854-MEIC (Ministerio de Economía, Industria y Comercio) indica los límites pasando que se deben cumplir, sin embargo, estos se basan en la norma ASTM C33 y son iguales a excepción de una ligera diferencia en los porcentajes pasando de los tamices #50 (100µm) y #100 (150µm). A pesar de esta leve diferencia se utiliza para efectos de este proyecto los de la norma ASTM C33-18 y para el Módulo de Finura sí se utiliza el Decreto N° 10854-MEIC “Norma Oficial de Especificaciones para los Agregados Finos y Gruesos para Concreto”.

Para el caso de los agregados finos, es importante evidenciar que estos no estén contaminados con material orgánico. Para esto la norma ASTM C40-20, establece el procedimiento a seguir para corroborar si posee impurezas o no, que eventualmente puedan ser perjudiciales en la mezcla de concreto donde se utilice el agregado.

La norma ASTM C128-15 y C127-15, establecen el procedimiento adecuado para obtener los valores de: gravedad específica saturada superficie seca, gravedad específica seca al horno, gravedad específica aparente y porcentaje de absorción; para el agregado fino y agregado grueso respectivamente. También, es aceptado el nombre densidad relativa en lugar de gravedad específica. El valor de gravedad específica es importante ya que determina cuál es la relación entre la densidad de un material y la densidad de un medio líquido, en este caso el agua ya que se trabaja con cemento hidráulico. Básicamente lo que represente el valor de gravedad específica será una noción de cómo se moverá el material en el agua, en otras palabras, si el valor es menor a 1 quiere decir que este material flotará en el agua, si el valor es mayor a 1 significa que se hundirá y entre mayor sea el valor, más fácilmente se hundirá, indicando también que es un material más pesado y denso.

Los agregados finos construidos granulométricamente no se sometieron al ensayo de gravedad específica, sino que se hizo una correlación como lo permiten las normas. En la ASTM C127-15, en el apéndice X1, brinda una ecuación con la cual se puede obtener la gravedad específica para un material compuesto, es decir, al formar un agregado con dos materiales distintos cuya gravedad específica es conocida. También, esta se puede ampliar a tres o más materiales mezclados, como se ve en la tabla X1.1 de la norma. La ecuación, adaptada a este documento, es la siguiente:

$$GE_r = \frac{100}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}} \quad \text{Ec.6.}$$

Donde:

- $GE_r$ : Gravedad Específica Resultante para el agregado compuesto por 2 o más materiales distintos.
- P: Porcentaje del material presente en el agregado compuesto.
- G: Gravedad específica conocida del material presente en el agregado compuesto.

Por supuesto, para la ecuación anterior, la numeración corresponde a un mismo material, es decir, la gravedad específica 1 y el porcentaje 1 corresponden a un mismo material y así consecutivamente. El 100 corresponde al total del agregado generado, un 100%. También, se puede utilizar en lugar de “100” un “1”, pero trabajando los porcentajes (P) en decimales, por ejemplo, en lugar de “44%”, utilizar “0,44”.

Otro parámetro importante en los agregados corresponde al peso unitario tanto suelto como compactado, con el porcentaje de vacíos respectivo para cada condición. La norma ASTM C29-17a menciona que este es un valor necesario para distintos métodos de selección de proporciones de materiales para las mezclas de concreto. Además, establece el procedimiento adecuado a seguir para obtener de manera precisa estos valores. El peso unitario viene siendo el peso del material por volumen ( $\text{kg/m}^3$ ), lo que indica cuánto material, por peso, entra en un volumen dado. El porcentaje de vacíos que se calcula, son los vacíos que existen entre las partículas y dentro de cada partícula. Para lograr obtener este valor se utiliza la ecuación (4) de

dicha norma, para la cual se requiere el valor de la gravedad específica seca al horno, pues esta contempla el material sin los poros internos pues están completamente vacíos y sin agua, así se puede hacer la relación de cuánto del material ocupado en el recipiente de la prueba de peso unitario corresponde a ese material seco y cuánto a vacío.

Para el agregado grueso, un parámetro importante que avala si el material es adecuado para utilizarse en mezclas de concreto, es la pérdida de material por abrasión. La norma ASTM C131-20, establece que para determinar este porcentaje se debe utilizar un equipo llamado “La máquina de los ángeles”.

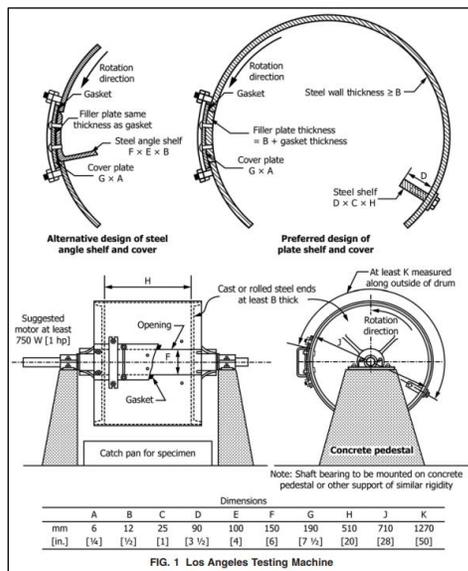


Figura 8. Esquema de Máquina de los Ángeles.  
Fuente: ASTM C131-20

Esta norma establece cómo preparar la muestra de agregado según el tamaño máximo nominal de partículas, para que este se someta en la máquina de los ángeles a 500 revoluciones donde entrará en un proceso de abrasión por medio de fricción e impacto, lo que irá degradando las partículas.

El moldeado de cilindros se ejecuta con la norma ASTM C192-19. Esta demarca las condiciones en que se deben encontrar los materiales a emplear en la mezcla, los métodos de mezclado, moldeado y curado para especímenes de concreto elaborados en laboratorio. Esta norma es de suma importancia pues las resistencias que alcancen los especímenes a 28 días (f'c), dependen de que se sigan rigurosamente estas

indicaciones y que se realicen de igual manera en todas las mezclas y especímenes de una misma investigación. La norma indica que los especímenes realizados bajo sus especificaciones pueden ser utilizados para: proporción de mezclas para proyectos de concreto, evaluación de diferentes mezclas y materiales, correlación con pruebas no destructivas y especímenes con fines de investigación.

También, se tomó en cuenta para este proyecto la norma ASTM C566-19, la cual presenta 2 procedimientos alternativos para secar agregados, ya sea en horno microondas como en una plantilla eléctrica. Para el caso de ambos agregados, se requería determinar su porcentaje de agua el día que se realizaría la mezcla, por lo que se determinó dicho porcentaje, secando los materiales en una plantilla eléctrica.

En cuanto a las fallas de cilindros para la obtención de las curvas de resistencia y valores de f'c, la norma ASTM C39-18 establece algunas condiciones para ejecutar las fallas de cilindros. Además, los límites del coeficiente de variación para resistencias a compresión de los cilindros a diferentes edades, junto con los rangos aceptables del d2s% o límites de diferencia para 2 o 3 cilindros, como se muestra en la siguiente figura.

	Coefficient of Variation <sup>4</sup>	Acceptable Range <sup>4</sup> of Individual Cylinder Strengths	
		2 cylinders	3 cylinders
150 by 300 mm [6 by 12 in.]			
Laboratory conditions	2.4 %	6.6 %	7.8 %
Field conditions	2.9 %	8.0 %	9.5 %
100 by 200 mm [4 by 8 in.]			
Laboratory conditions	3.2 %	9.0 %	10.6 %

<sup>4</sup> These numbers represent respectively the (1s %) and (d2s %) limits as described in Practice C670.

Figura 9. Límites de precisión de los datos de resistencia a la compresión de cilindros de concreto hidráulico.  
Fuente: ASTM C39-18

Su correspondiente ecuación es la siguiente:

$$d2s\% = \frac{(D_{M\acute{a}x.} - D_{M\acute{i}n.})}{D_{M\acute{a}x.}} * 100 \quad \text{Ec.7.}$$

Donde:

- D2s%: Diferencia máxima aceptable entre dos resultados de prueba expresada como porcentaje.
- D<sub>Máx.</sub>: Valor máximo de los datos.
- D<sub>Mín.</sub>: Valor mínimo de los datos.

La ASTM C670-15, es complementario con la ASTM C39-18, pues explica conceptos estadísticos importantes aplicados a estudios de las resistencias de concretos hidráulicos. Además, brinda unos factores para ampliar los rangos de confianza dependiendo de la cantidad de cilindros que se estén estudiando, hasta 10 máximo.

Number of Test Results	Multiplier of Standard Deviation or Coefficient of Variation <sup>B</sup>
2	2.8
3	3.3
4	3.6
5	3.9
6	4.0
7	4.2
8	4.3
9	4.4
10	4.5

<sup>A</sup> A test result can be a single determination or the average of two or more determinations as defined in the test method.  
<sup>B</sup> Values were obtained from Table A7 of "Order Statistics and Their Use in Testing and Estimation," Vol 1, by Leon Harter, Aerospace Research Laboratories, United States Air Force.

Figura 10. Rango máximo aceptable de confianza para la cantidad de pruebas realizadas.  
 Fuente: ASTM C670-15

Con respecto al análisis de los datos obtenidos producto de las resistencias del concreto, el código ACI 214RS-11 "Guía para la evaluación de resultados de ensayos de resistencia del concreto", es un documento referente al análisis de resultados a partir de criterios estadísticos, estableciendo criterios de control estándar y posibles causas sobre varianzas entre resistencias. Estas causas se muestran en la siguiente figura.

Variaciones entre tandas	Variaciones dentro de la tanda
<p><i>Variaciones en las características y las dosificaciones de los ingredientes:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Agregados;</li> <li>• Materiales cementantes, incluyendo las puzolanas; y</li> <li>• Aditivos.</li> </ul> <p><i>Cambios en la relación (a/mc) causados por:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Control deficiente del agua;</li> <li>• Variación de la humedad de los agregados en su sitio de almacenamiento;</li> <li>• Variación de las mediciones de la humedad de los agregados; y</li> <li>• Remezclado.</li> </ul> <p><i>Variaciones en el mezclado, transporte, y muestreo:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiempo y velocidad de mezclado;</li> <li>• Distancia entre la planta y sitio de colocación;</li> <li>• Condiciones del camino; e</li> <li>• Incapacidad de obtener una muestra representativa de la tanda.</li> </ul> <p><i>Variaciones en la colocación, y consolidación*</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Canal, bomba, o carretilla;</li> <li>• Vibración interna o externa; y</li> <li>• Diferentes operadores.</li> </ul> <p><i>Variaciones en la temperatura y el curado del concreto*</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Estacional;</li> <li>• Humedad del ambiente; y</li> <li>• Velocidad del viento.</li> </ul>	<p><i>Inadecuado muestreo de la muestra de la tanda.</i></p> <p><i>Variaciones debidas a las técnicas de fabricación:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Condiciones deficientes;</li> <li>• Herramientas incorrectas;</li> <li>• Encofrados de mala calidad, dañados o distorsionados;</li> <li>• Colocación y consolidación deficientes; y</li> <li>• Manejo incorrecto de muestras de ensayo frescas.</li> </ul> <p><i>Diferencias en el curado:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Demoras en el inicio del curado inicial;</li> <li>• Variación de temperatura;</li> <li>• Control de humedad variable;</li> <li>• Curado inicial deficiente;</li> <li>• Demoras en el transporte de los cilindros al laboratorio;</li> <li>• Manejo descuidado de los cilindros durante el transporte; y</li> <li>• Curado final inadecuado.</li> </ul> <p><i>Variaciones en los ensayos de las muestras:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Operario no certificado;</li> <li>• Preparación de la superficie del espécimen;</li> <li>• Equipo de ensayo inadecuado o no calibrado;</li> <li>• Tasa de carga no estándar; y</li> <li>• Manejo deficiente de los registros.</li> </ul>

\*Se aplica a la resistencia in situ de la estructura.

Figura 11. Causas de variación entre tandas y dentro de las tandas.  
 Fuente: ACI 214RS-11

Hay que aclarar que esta guía de evaluación es específicamente para el estudio de datos de f'c de concretos hidráulicos, brindando límites, ecuaciones y condiciones para analizar estadísticamente los datos disponibles.

Estadísticamente existe la normalidad de datos y la no normalidad. Cuando un grupo de datos es normal, se distribuyen en forma de campana de tal manera que la desviación estándar permite la observación de todos los datos, o la mayoría, dentro de esta. Un ejemplo se tiene con la siguiente figura.

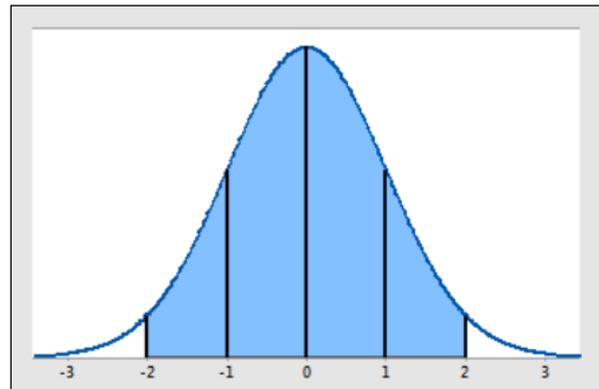


Figura 12. Ejemplo de distribución normal de datos.  
 Fuente: Soporte de Minitab.

Por lo general, los histogramas, son los utilizados para visualizar esta distribución de los datos. Estos en un gráfico de barras, donde cada barra tiene un ancho con un intervalo de valores y su altura dependerá de qué tantos valores entren en ese rango. Esto permite, similar a la Figura 12, mostrar la distribución de los datos de una muestra o población.

El Boxplot o diagrama de caja, según el soporte de Minitab, permite evidenciar si la distribución en los datos posee cierta asimetría, la cual podría indicar que no tienen normalidad, también datos atípicos y/o hacer comparaciones entre las medianas de distintas muestras.

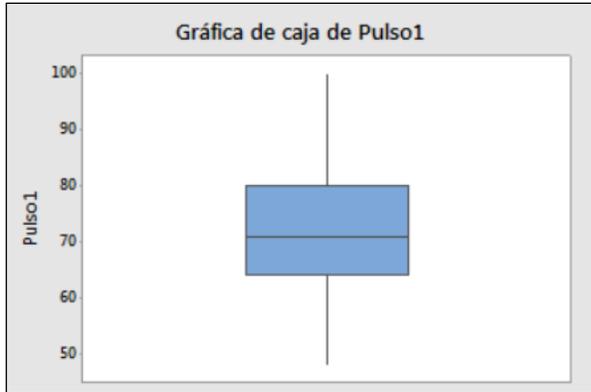


Figura 13. Ejemplo de Diagrama de caja o Boxplot.  
Fuente: Soporte de Minitab.

La desviación estándar, según el soporte de Minitab, es la medida de dispersión de los datos con respecto a la media. Esta siempre lleva las unidades de los datos con la que se calcula. El cuadrado de este valor es la varianza. El coeficiente de variación es el grado de variabilidad con respecto a la media, es como decir, la desviación estándar en términos de porcentaje. Este se calcula con la siguiente ecuación.

$$Cv = \frac{s}{\bar{x}} * 100 \quad \text{Ec.8.}$$

Donde:

- s: desviación estándar.
- $\bar{x}$ : promedio.

La varianza es representada como “v” o “s<sup>2</sup>”. La ecuación que le permite calcular su valor es la ecuación Ec.9.

$$s^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad \text{Ec.9.}$$

Donde:

- x: son los datos de la muestra.
- n: cantidad de datos.

La desviación estándar al ser la raíz de la varianza se calcula con la siguiente ecuación.

$$s = \sqrt{s^2} \quad \text{Ec.10.}$$

Para obtener la confiabilidad de los datos obtenidos en la medición de la fuerza magnética del concreto, se utiliza el alfa de Cronbach. En el análisis de elementos del software Minitab, el alfa

de Cronbach nos indica si los números son confiables (>0,6), poco confiables (<0,6) o inconsistentes (<0).

El alfa de Cronbach es muy utilizado en diferentes áreas como la medicina y psicología, pero al ser un valor que pondera y analiza las varianzas entre los datos, es muy utilizado también en la estadística para determinar si los datos son confiables y más aún, si el instrumento de medición es consistente.

*“En otras palabras, el alfa de Cronbach es el promedio de las correlaciones entre los ítems que hacen parte de un instrumento.”* (Oviedo, 2005)

Cervantes muestra la ecuación que permite obtener el coeficiente o alfa de Cronbach, de 1951, la cual se muestra en la siguiente figura.

$$\alpha = \frac{n}{n-1} \frac{\sum_{k=1}^n \sum_{h=1}^n \sigma_{k,h}}{\sigma_X^2}; \quad \forall h \neq k$$

Figura 14. Ecuación del alfa de Cronbach.  
Fuente: (Cervantes, 2005)

*“donde n es el número de partes, k y h son partes sobre las que se calcula el estadístico.”*

(Cervantes, 2005)

El alfa de Cronbach es altamente cuestionado, debido a las distintas interpretaciones que otros autores le han dado a lo largo de la historia, sin embargo, Cervantes discute que el lugar que tiene actualmente este coeficiente para determinar la confiabilidad de datos obtenidos de una medición es realmente importante.

Para obtener este coeficiente se utiliza directamente el software Minitab 19 con el que se analizan los elementos obtenidos en la medición, es decir, los datos.

Parte de los análisis estadísticos es comparar las resistencias a 28 días entre el concreto patrón (Concreto Base) y los concretos con limadura y viruta. A simple vista se puede observar que los datos varíen, sin embargo, al definir el valor del f'c como el promedio de los

datos obtenidos de las fallas a la compresión a 28 días para cada tipo de concreto, la comparación de los  $f_c$  sería comparar estos promedios entre sí, es decir, una comparación de las medias. Para esto se puede hacer un análisis t para dos muestras.

La ventaja de esta prueba es que puede ser utilizada en muestras pequeñas (con menos de 15 datos). La única condición con este tamaño de muestras es que no sean asimétricas ni posean datos atípicos. Según el soporte del software Minitab, estas 2 condiciones pueden afectar considerablemente los resultados del análisis y la validez de factor p.

Ballve menciona en su artículo que el nivel de significancia de p es 0,05. Este valor también, se encuentra en otras fuentes y el software Minitab también lo trabaja, aunque puede variar entre 0,05 y 0,01. Además, indica que un valor de p muy pequeño no indica mayor relevancia que un valor más cercano a 0,05. Con que p sea menor al nivel de significancia, se puede decir que se rechaza la Hipótesis nula, en caso contrario, se acoge la Hipótesis nula; esto planteado por los estadistas y matemáticos Neyman y Pearson.

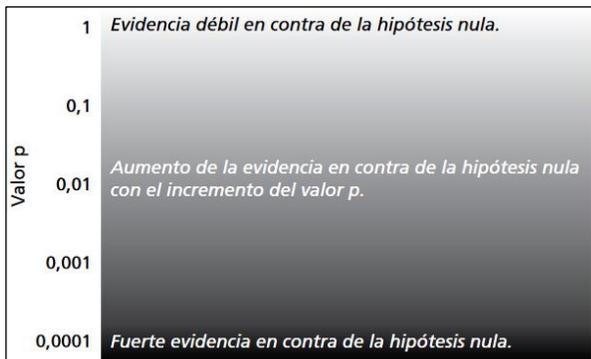


Figura 15. Interpretación del valor p con un nivel de significancia de 0,01.

Fuente: (Ballve et al, 2018)

# Planteamiento del problema

La ingeniería lleva muchos años revolucionando los sistemas constructivos, los materiales de construcción, la construcción sostenible, la construcción antisísmica y la gestión de proyectos. Todo esto gracias a la investigación, donde la mayoría proviene de universidades.

*“Los países considerados del primer mundo realizan grandes inversiones a la educación porque, de cierta manera, consideran que en ella radica la contribución de la resolución de los problemas de su población.”*

(Universia Argentina, 2019)

Partiendo de esta importancia de la investigación y siendo Costa Rica un país sísmico, busco en este proyecto indagar en un nuevo material que pueda utilizarse en un sistema de aislamiento sísmico, utilizando la levitación magnética. Así como se utiliza la levitación en transportes, podría hacerse levitar una estructura, aislándola completamente del suelo permitiendo que el sismo sea absorbido completamente por un campo magnético y no por los elementos estructurales. Sin embargo, el ámbito es distinto, pues en la construcción no puede utilizarse un sistema que dependa de una fuente de alimentación eléctrica constante. Además, el tren corresponde a un sistema dinámico pues se mueve, mientras que una estructura necesita un sistema estático.

Buscar un material común en la construcción y adaptarle propiedades magnéticas, es el primer paso para el desarrollo de una matriz magnetizable. Para esto fue escogido el concreto el cual puede modificarse fácilmente.

Por ello se investiga una posible modificación al diseño de mezcla de concreto hidráulico convencional para poder añadirle propiedades magnéticas y estudiar su

comportamiento. Esto, porque el concreto posee la ventaja de que es una mezcla que se puede realizar de múltiples formas, se pueden añadir muchos aditivos que cambien sus propiedades químicas, su trabajabilidad, su resistencia como las fibras de polipropileno, vidrio en el caso de concretos translúcidos o plástico en productos prefabricados. Así se obtendrían, con la adición de partículas metálicas, indicios de funcionalidad, adaptabilidad, magnetización y futuras posibles modificaciones, al añadirle un material ferromagnético.

Esta adhesión se propuso llevarla a cabo reemplazando limadura y viruta de acero 1020 en el agregado fino, para que se integre dentro del concreto como agregado y no como un aditivo.

La magnetización de un material compuesto por partículas de metales ferromagnéticos se espera lograr por medio de inducción electromagnética. Utilizando para esto los principios de los electroimanes, envolviendo el concreto modificado en un campo magnético, permitiendo cargar dichas partículas ferromagnéticas orientando los espines de los electrones en un mismo sentido, permitiendo así la fuerza de magnetización.

# Antecedentes

En el área de aisladores y disipadores sísmicos se pueden encontrar varios sistemas, pero ninguno propuesto con levitación magnética. Muchas investigaciones y aisladores desarrollados llegan a disminuir considerablemente el impacto de un sismo. Según menciona Parisi, hay una nueva tecnología desarrollada por la empresa Sirve, que viene a ser un disipador de energía magnetoreológico:

*“Consiste en un cilindro hidráulico, bobinas magnéticas, y un fluido “magnetoreológico” que responde a la aplicación de un campo magnético y formado por partículas magnetizables suspendidas en un líquido portador. Este fluido puede variar desde un estado líquido a semisólido y viceversa en milisegundos.”*  
(Parisi, 2014)

Con este sistema lo que se logra es que la estructura se mantenga en su eje, pues ante cualquier leve desplazamiento, el cilindro devuelve la estructura a su centro lo más rápido posible, debido al líquido electromagnético dentro del amortiguador.

En las últimas décadas se han desarrollado investigaciones sobre el magnetismo, de las cuales se han aprovechado sus propiedades en transporte, dispositivos electrónicos, motores y medicina como la quimioterapia, por ejemplo, que han ayudado a revolucionar el mundo. El desarrollo del magnetismo y la superconductividad han evolucionado y desarrollado una nueva rama llamada levitación magnética. Actualmente esta se aplica en la industria de transportes, como lo son los trenes en Japón, los cuales por medio de fuerzas magnéticas logran levitar y desplazarse.

Estos trenes, MagLev, viajan a grandes velocidades suspendidas sobre campos magnéticos opuestos, generados por bobinas. Según Perren, desde el mismo tren se encargan de regular la corriente que circula por las bobinas, generando que los imanes que se encuentran en

las vías del tren opongan, levantando todo el tren con ellos. La movilización de dicho tren se generará al intercambiar la frecuencia de onda magnética en el carril guía, con esto el tren avanzará, debido a la repulsión que generarán estas ondas con los electroimanes ubicados en el tren.

*“Una característica importante de este sistema es que la energía que mueve al tren no la provee el mismo tren, sino que esta es proveída por las vías. Esto permite evitar un malgasto de energía fraccionando la vía en secciones, de manera que cada una tenga su alimentación, de esta manera solamente estarán activos aquellos tramos de la vía por los que en ese momento esté transitando el tren.”*  
(Perren, 2003)

En Egipto, se desarrolló una investigación sobre las propiedades del concreto utilizando agua magnetizada. Según Ahmed, al pasar agua por un campo magnético, se modifican algunas de las propiedades como la viscosidad y la conductividad eléctrica. Para la mezcla de concreto se adicionó un material llamado nano alúmina egipcia que, junto con el agua magnetizada, aumentaron la resistencia del concreto en un 13%. Esta mejora se puede atribuir a que estas nanopartículas pueden actuar como núcleos para las fases del cemento, aumentando la hidratación ya que poseen alta reactividad, sin embargo, el agua magnética no aporta magnetismo al concreto. (Ahmed, 2017)

Una empresa alemana llamada MAGMENT, patentó una especie “concreto magnético”, con propiedades para transmitir corriente eléctrica y generar un material que pueda cargar vehículos eléctricos que transiten sobre este. En realidad, es una mezcla de concreto con adición de materiales como ferritas cerámicas y chatarra electrónica. Esto permite que, al conectarse a una corriente eléctrica, esta se distribuya por el material, generando un campo

magnético a su alrededor y así cargar los vehículos y distintos medios de transporte eléctricos, tal como se ilustra en la Figura 15.

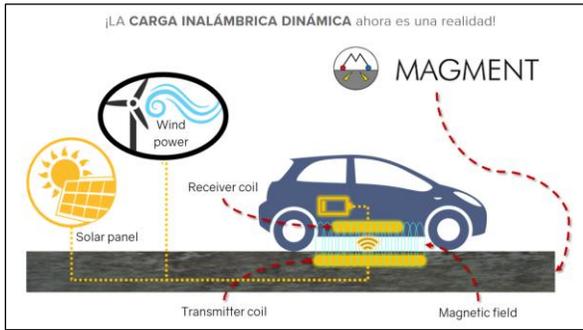


Figura 15. Carga inalámbrica dinámica ofrecida por la empresa MAGMENT. Fuente: MAGMENT.

Es interesante observar cómo se han desarrollado también experimentos en concretos no hidráulicos, como el concreto polimérico. Así lo realizó Villanueva, donde en una matriz de concreto polimérico añadieron partículas de magnetita.

*“En este caso se realizó un estudio sistemático de un tipo de concreto polimérico compuesto por silicón, cemento y sustancias oleofílicas, a su vez es reforzado con micropartículas de magnetita.”*  
(Villanueva et al, 2019)

Ahora, se podría pensar que involucrar un metal en una mezcla donde hay presencia de agua no solo para que esta fragüe, sino también para que se dé un correcto curado, se podría ver afectado el metal, debido a que entre en un proceso corrosivo. Portal, en su Tesis, desarrolla concreto con un metal, para hacer un estudio de resistencia. En el análisis al metal utilizado encuentra los resultados mostrados en la siguiente figura.

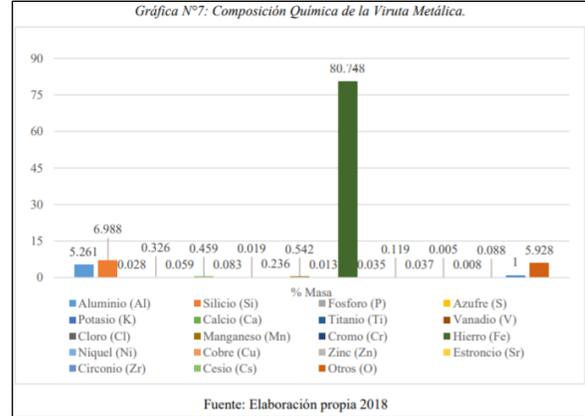


Figura 16. Viruta metálica utilizada por Portal. Fuente: (Portal, 2018)

Como se aprecia el metal utilizado está compuesto principalmente por hierro. De igual manera el acero dulce o acero 1020, cuya composición química se muestra en la Figura 17. Bien se sabe que el acero es una aleación con Hierro como base.

C <sup>w</sup> %	Si <sup>w</sup> %	Mn <sup>w</sup> %	P%	S%
0.16	0.14	0.63	0.008	0.009
Cr <sup>w</sup> %	Mo <sup>w</sup> %	Ni <sup>w</sup> %	Cu <sup>w</sup> %	
0.04	-	-	0.15	

Figura 17. Composición metálica acero 1020. Fuente: Aceros Roag.

En las conclusiones de su investigación, Portal menciona que sus componentes brindan aportes a la resistencia del concreto hidráulico como por ejemplo el Silicio (Si), componente que también se encuentra en el acero dulce. *“El Silicio (Si) influye positivamente en el concreto, la eliminación y oclusión de la porosidad, proporciona una ganancia de resistencia gradual, menor relación agua cemento.”* (Portal, 2018)

Con respecto a la oxidación del metal, Portal no menciona nada al respecto, sin embargo, declara que la viruta en la mezcla mejora el comportamiento en ciclos de fatiga, reduce la permeabilidad, aumenta la resistencia y controla la penetración de agentes oxidantes. Pero el comportamiento propiamente del acero 1020 tanto en viruta como limadura, se analizará como se menciona en la Metodología.

# Metodología

## Caracterización de agregados

El desarrollo de los especímenes de concreto requiere de agregado, por lo que para lograr este producto se debió obtener las propiedades de los agregados a partir de las siguientes normas:

- ASTM D75-19 “Muestreo de agregados” (Sampling Aggregates).
- ASTM C702-18 “Reducción de muestras de agregado a tamaños de ensayo” (Reducing Samples of Aggregate to Testing Size).
- ASTM C117-17 “Lavado de materiales más finos que 75- $\mu\text{m}$  (No. 200) para agregados minerales” (Materials Finer than 75- $\mu\text{m}$  (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing).
- ASTM C136-19 “Granulometría para agregados finos y gruesos” (Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates).
- ASTM C128-15 “Densidad Relativa (Gravedad Específica) y absorción de agregado fino” (Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate).
- ASTM C127-15 “Densidad Relativa (Gravedad Específica) y absorción de agregado grueso” (Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate).
- ASTM C131-20 “Resistencia a la degradación del agregado grueso de tamaño pequeño por abrasión e impacto en la máquina de Los Ángeles” (Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine).

- ASTM C29-17a “Densidad aparente (“Peso unitario”) y vacíos en el agregado” (Bulk Density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate”).

- ASTM C566-19 “Contenido de humedad evaporable total del agregado por secado” (Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying).

## Diseño de mezcla

En base a las características de los agregados determinadas en los ensayos, se realizó el diseño de mezcla según la norma ACI 211.1-91, tomando en cuenta el tipo de cemento especificado en el Cuadro E1 de la matriz experimental. Este corresponde al cemento FuerteMax (HOLCIM) ya que es un cemento con alta resistencia inicial y además posee buena trabajabilidad con menor contenido de agua, siendo esto beneficioso considerando la utilización de un metal dentro de la mezcla.

## Acero 1020 incorporado en la mezcla de concreto

Con respecto al metal utilizado, fue el acero mencionado en el Cuadro E1 de la matriz experimental. Este se procesó de dos distintas maneras para poder obtener limadura y viruta de acero. La limadura de acero se obtuvo por un proceso de corte y desbaste, esto con un esmerilador angular, en donde se alternaban discos de corte para hacer incisiones en forma de cuadrícula luego con los discos de desbaste se iba desgastando. Este proceso fue el más eficaz para obtener en un menor tiempo la limadura. Por otro lado, la viruta se obtuvo por un proceso de corte en fresadora, con una fresa de carburo de 6 filos y 3/8 de diámetro.

La viruta pasó por un segundo proceso de licuado, es decir, se introdujo en pequeñas cantidades a

una licuadora y se licuaba por un lapso de entre 15 y 30 segundos, esto con el fin de poder reducir un poco más las partículas de dicha viruta. Estas cantidades eran de aproximadamente 150 gramos, para permitir que pudieran licuarse de tal manera que no se atascaran las cuchillas de la licuadora.

## Agregado fino construido granulométricamente

Tanto la limadura de acero como la viruta se tamizaron y se separaron por tamiz. Lo mismo se hizo con el polvo de piedra. Esto para agregar el material ferromagnético según su tamaño de partícula (tamiz) al sustituirlo por el polvo de piedra, asegurando que los porcentajes pasando del agregado fino resultante cumplieran con la norma ASTM C33-18 "Especificaciones para agregados de concreto" (Specification for Concrete Aggregates). El porcentaje de sustitución utilizado fue de 35,23% pues fue el porcentaje que se pudo sustituir a partir de la materia prima disponible al momento de hacer las mezclas de concreto.

Se calculó el módulo de finura que tendrá el material, a partir de la siguiente fórmula:

$$MF = \frac{\sum PRAE}{100} \quad \text{Ec.11.}$$

Donde:

- MF: Módulo de Finura.
- PRAE: Porcentaje retenido acumulado esperado. Recordando que solo se incluyen los tamices de 9,5 a 0,15 mm.

El porcentaje retenido esperado (PRE) se calculó a partir del 100% que representa al material y a los porcentajes pasando estimados a partir de los límites de la norma ASTM C33-18 (de estos se tomaron un valor cualquiera que se encuentre entre el mínimo y máximo, ya sea aleatoriamente o promediado).

$$PRE = 100 - PPE \quad \text{Ec.12.}$$

Donde:

- PPE: Porcentaje pasando estimado.

El porcentaje retenido acumulado esperado (PRAE) se calcula a partir de los valores de los porcentajes retenidos:

$$PRAE = PRE - PRAE_{Tamiz\ anterior} \quad \text{Ec.13.}$$

Por último, la cantidad de material retenido por tamiz (MRE) en kilogramos (kg), se obtuvo de la siguiente ecuación:

$$MRE = \frac{PRE}{100} * M_T \quad \text{Ec.14.}$$

Donde:

- $M_T$ : Material total a construir. Este corresponde a la cantidad de agregado fino requerido para el diseño de mezcla.

La humedad de los agregados al momento de utilizarlos en el proceso de mezclado (humedad de sitio) se obtienen con la siguiente ecuación:

$$\% \text{ hum} = \frac{P_{hum} - P_{seco}}{P_{seco}} * 100 \quad \text{Ec.15.}$$

Donde:

- %hum: porcentaje de humedad en sitio.
- $P_{hum}$ : peso húmedo del material.
- $P_{seco}$ : peso seco del material.

## Elaboración de especímenes de concreto

Se desarrollaron 22 cilindros de concreto hidráulico por lote de concreto con acero y dimensiones de 100x200mm. Los diseños de mezcla se hicieron para obtener 19 cilindros de concreto, sin embargo, para cada mezcla se logró llenar 22 moldes, por lo que para aumentar los datos y fortalecer los resultados, se utilizaron estos 3 cilindros adicionales de cada mezcla para adicionar 1 cilindro más a cada edad de falla a la compresión, pasando de fallar 5 cilindros por edad a fallar 6 como se muestra en la matriz experimental. Para el Concreto Base se desarrollaron solo 18 cilindros de concreto, debido a que solo se destinarían 6 para fallar a cada edad. Un lote de cilindros corresponde a aquellos que se moldearon con la misma mezcla, por lo que deberían mantener las mismas propiedades.

La elaboración de estas probetas se realizó con base en la norma ASTM C192-19 "Fabricación y curado de especímenes de concreto en el laboratorio" (Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory).

Como lo indica la norma para la elaboración de mezclas de concreto en batidora se desarrollaron los siguientes pasos:

- Se inició mezclando el agregado grueso con una parte del agua de la mezcla para lograr que todo el agregado quede saturado.
- Luego se agregó el cemento y el agregado fino, esto se realizó con la batidora detenida, debido a que era mucho el material que se agregaría.
- Se encendió la batidora una vez que todos los materiales estuvieran dentro y, ya encendida, poco a poco se añadió el agua restante de la mezcla. Este proceso de mezclado duró 3 minutos, que se comenzaron a medir una vez se terminó de agregar toda el agua.
- Durante estos 3 minutos, si era requerido se agregaba el agua extra necesaria para alcanzar la consistencia deseada, anotando el dato de cuánta agua extra se añadió.
- Al finalizar estos 3 minutos, se detenía la máquina, se cubría con una manta, lona o bolsa plástica para que la mezcla repose por otros 3 minutos.
- Finalizado el tiempo, se quitaba la cubierta y se activaba por otros 2 minutos la batidora para finalizar con el mezclado.

Una vez realizada la mezcla se retiró el concreto de la batidora, teniendo el cuidado de que no quedara tanta mezcla pegada en las paredes ni en las paletas internas de esta.

Los moldes de los especímenes se llevaron a cabo entre 2 personas. Una se encargó de llenar, envarillar y vibrar los especímenes, mientras la otra se encargó de enrollar y enrazar las superficies para darles acabado. A todos se les aplicó:

- Dos capas por ser cilindros de 100x200mm.
- 25 envarillados por capa. Teniendo el cuidado de que en la segunda capa, al finalizar los 25 envarillados, el concreto quede por encima del nivel de enraizado.
- 12 golpes con mazo por capa, una vez terminado el envarillado de dicha capa.
- Los cilindros se moldearon de 5 en 5.

Estas condiciones se pueden verificar en las Tablas 1 y 2 de la norma.

Esta cantidad de cilindros por lote responde a lo siguiente: la cantidad de moldes disponibles en los laboratorios de Ingeniería en Construcción del TEC, la velocidad de moldeo de cilindros considerando el uso de un cemento hidráulico de alta resistencia inicial y que se requería una mezcla plástica lo que reducía el tiempo de fraguado. Por supuesto, también a lo más importante que es la materia prima disponible, pues la cantidad de limadura y viruta de acero eran limitadas, debido al costo y tiempo que se requería para obtener estos materiales.

## **Falla a la compresión de los especímenes**

Estos cilindros únicamente se utilizaron para la obtención de propiedades del material y poder adjudicar a los diseños de mezcla un modelo de comportamiento del material obtenido. Se utilizaron 18 cilindros de concreto de cada lote para determinar la resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días ( $f_c$ ) del diseño de mezcla correspondiente. Esto por medio de fallas en el laboratorio siguiendo la norma ASTM C39-18 "Resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto" (Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens). Ver Matriz Experimental.

De los especímenes fallados se observó que estos tuvieron una distribución uniforme, que no se hayan aglomerado algunos materiales en ciertas zonas del cilindro y para verificar la ausencia o presencia de burbujas de aire, producto del proceso de moldeo o mezclado.

## Análisis de resistencias del concreto

De la información obtenida en las fallas a la compresión de los cilindros para cada lote, se hizo una comparación de resistencias entre cada probeta fallada para así determinar la resistencia a la compresión representativa del diseño de mezcla utilizado para ese lote. Se realizó un histograma y un boxplot para cada conjunto de datos, donde se visualizara la distribución de estos, ambos elaborados con el software Minitab 19. Con los límites de desviaciones estándar y coeficientes de variación de las normas ASTM C39-18 y ASTM C670-15 “Preparación de declaraciones de precisión y sesgo para métodos de prueba para materiales de construcción” (Preparing Precision and Bias Statements for Test Methods for Construction Materials) se estudiaron los valores obtenidos en las fallas a la compresión. Con el  $f'c$  de las distintas mezclas, se comparó si los coeficientes de variación eran buenos o no con respecto al ACI 214RS-11 “Guía para la evaluación de resultados de ensayos de resistencia del concreto” y así obtener también un panorama de si aceptar o no dichos resultados. También, se determinaron posibles fuentes de error y se emitieron recomendaciones sobre posibles cambios o mejoras que se puedan desarrollar.

## Magnetización del concreto

Con la colaboración de un profesional en Ingeniería en Electromecánica y la empresa SJ Transformadores se diseñó y construyó la bobina para las pruebas de los cilindros. Los materiales para su construcción fueron donados por la empresa SJ Transformadores. La construcción de estas bobinas fue indispensable para cargar magnéticamente los cilindros de concreto con material ferromagnético y así evaluar su funcionamiento magnético.

La bobina para ensayos se conectó y probó en 2 fuentes de corriente directa (CD). Una prestada por la Escuela de Física del Tecnológico de Costa Rica, con capacidad de 6 A. La otra prestada por la Escuela de Ingeniería Electrónica del Tecnológico de Costa Rica, con capacidad de 3,5 A.

Los 4 cilindros destinados a cargarse magnéticamente para cada lote se introdujeron en la bobina para generarles el campo magnético.

De los 4 cilindros, 2 se sometieron a la fuerza magnética máxima alcanzada por la fuente, es decir, se conectó el solenoide a la fuente y se le hizo circular todo el amperaje (6A) para inducir al espécimen de concreto y así luego ser fallado a los 28 días según la norma ASTM C39-18, así se pudo evaluar si esta magnetización afecta de algún modo la resistencia del concreto. Para los restantes 2 cilindros, estos se pusieron a interactuar con imanes para así observar su capacidad de unión o adherencia al encarar polos opuestos y su capacidad de rechazar al encarar polos iguales. De esto solo se corroboró que hayan adquirido propiedades magnéticas.

Para medir la fuerza magnética de los especímenes de concreto, se tuvo que construir una balanza como instrumento para realizar esta medición. Esta balanza mostrada en la Figura 18, permitía medir cuánta fuerza se requería para separar un imán circular de neodimio de 10 centímetros de diámetro del concreto.



Figura 18. Balanza utilizada para la medición de la fuerza de adherencia en el concreto con distintos amperajes. Fuente: Elaboración propia.

## Análisis de fuerzas de magnetización

Al ser un instrumento empírico, se debía asegurar que los datos fueran confiables, por lo que a estos se les calculó el alfa de Cronbach, para verificar si eran o no confiables, o si del todo eran inconsistentes. A partir de esto, se elaboraron gráficos de los datos ponderados a partir de los cuales se obtuvo una ecuación representativa con la cual proyectar las fuerzas obtenidas con mayores amperajes. Por último, se interpolaron las

fuerzas magnéticas obtenidas con otras dosificaciones de acero.

Los cilindros de concreto base, que no tienen partículas de acero, solo se sometieron a fallas a la compresión, tanto a los 7, 14 y 28 días.

En última instancia se estimó el incremento en el costo para la elaboración de 1 m<sup>3</sup> de concreto, debido a la adición de limadura o viruta utilizando la misma dosificación de sustitución del agregado fino.

## Matriz experimental

<b>Cuadro E1. Matriz experimental de diseño para la elaboración de especímenes.</b>						
Metal por utilizar	Tipo de viruta	Dosificaciones	Relación A/C	Tipo de cemento	Especímenes proyectados	Cantidad de especímenes desarrollados
Acero 1020	Viruta de acero	100% del agregado que se pueda sustituir según la granulometría y la materia prima disponible.	Dependerá del diseño de mezcla del concreto.	FuerteMax (HOLCIM)	19	22
	Limadura de acero	100% del agregado que se pueda sustituir según la granulometría y la materia prima disponible.		FuerteMax (HOLCIM)	19	22

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

<b>Cuadro E2. Matriz experimental de ensayos para los especímenes elaborados.</b>				
Disposición de los especímenes	Áreas de estudio	Cantidad de especímenes	Alteración en la muestra	Total de especímenes
Cargar magnéticamente en la bobina.	Campo magnético máximo de la bobina y falla a la compresión a 28 días.	2	Inducción Magnética.	22
	Campo magnético controlado, interacción con imán y medición de campo magnético.	2		
Falla a la compresión.	Falla a los 3 días.	6	Destructivo.	
	Falla a los 14 días.	6		
	Falla a los 28 días.	6		

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

Según establece el ACI 318S-19, la cantidad mínima de especímenes de concreto para obtener la resistencia de una mezcla es de 2 cilindros con dimensiones 150x300 mm o 3 cilindros con dimensiones de 100x200 mm. Esto en la sección 26.5.3.2 del código.

<b>Cuadro E3. Revisión de los diseños de mezcla a través de los cilindros moldeados.</b>			
Tipo de ensayo	Áreas de estudio	Pruebas por realizar	Información recopilada
Cargar magnéticamente en la bobina	Campo magnético máximo de la bobina.	Deformación del cilindro por la inducción de fuerzas magnéticas en las partículas metálicas.	Observar posible auto compactación del cilindro por fuerzas del campo magnético muy grandes.
			Comprobar su correcta polarización con un imán que posea los polos identificados.
	Campo magnético controlado, interacción con imán.	Respuesta de atracción o repulsión con otro material magnético una vez creado el campo magnético en el cilindro.	Controlar la fuerza magnética en el tiempo para medir si pierde capacidad magnética (desmagnetización).
			Aumento en fuerza de adherencia del imán
	Falla a los 28 días.	Resistencia a la compresión de los cilindros cargados magnéticamente.	Aplica lo mismo para los cilindros fallados sin magnetizar**
**Falla a la compresión	Falla a los 3 días.	Resistencia a la compresión de los cilindros.	Crear una curva de crecimiento de la resistencia. Obtener resistencias a temprana edad.
		Homogeneidad interna en el espécimen destruido.	Observar una distribución homogénea de las partículas.
			Problemas de vacíos dentro de la mezcla por mala compactación o algún otro aspecto.
			Posibles decoloraciones producto de alguna reacción química adversa producida por el metal.
	Falla a los 14 días.	Resistencia a la compresión de los cilindros.	Crear una curva de crecimiento de la resistencia.
		Homogeneidad interna en el espécimen destruido.	Observar una distribución homogénea de las partículas.
			Problemas de vacíos dentro de la mezcla por mala compactación o algún otro aspecto.
			Posibles decoloraciones producto de alguna reacción química adversa producida por el metal.
	Falla a los 28 días.	Resistencia a la compresión de los cilindros.	Crear una curva de crecimiento de la resistencia. Obtener el f'c del concreto con adiciones metálicas.
		Homogeneidad interna en el espécimen destruido.	Observar una distribución homogénea de las partículas.
			Problemas de vacíos dentro de la mezcla por mala compactación o algún otro aspecto.
			Posibles decoloraciones producto de alguna reacción química adversa producida por el metal.

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

\*\*Las pruebas y la recopilación de información de la falla a compresión de los cilindros se aplican también en los cilindros magnéticos destinados a fallarse.

<b>Cuadro E4. Medición de campos magnéticos en el concreto realizado.</b>				
Mezcla de concreto	Cantidad de cilindros	Medición de fuerza de magnetización	Ecuaciones representativas	Tipo de ecuaciones obtenidas
Concreto con Limadura	2	Para 0, 1, 2, 3, 4, 5 y 6 amperios (A)	Se graficaron los datos y se obtuvo la ecuación de la tendencia que estos tomaron.	Polinómica de grado 2 y lineal.
Concreto con Viruta	2	Para 0, 1, 2, 3, 4, 5 y 6 amperios (A)	Se graficaron los datos y se obtuvo la ecuación de la tendencia que estos tomaron.	Polinómica de grado 2 y lineal.

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

# Resultados

## R1. Agregados

Los agregados que se estudiaron son piedra quinta, polvo de piedra y arena.

Primero se obtuvieron las muestras representativas de cada agregado y se redujeron a tamaño de muestra para poderles realizar los ensayos correspondientes. Las siguientes fotografías son del método de cuarteo para la homogeneidad del agregado y obtención de muestras representativas, siguiendo las normas ASTM C702-18 y ASTM D75-19.



Figura R1. Mezclado de agregado a pala para su homogeneización ASTM D75-19.



Figura R2. a) Muestra de agregado y separador mecánico. b) Muestras de cuarteo que se reducirán a muestras para ensayos según ASTM C702-18.



Figura R3. Reducción de muestras de piedra quinta para ensayos de caracterización según norma ASTM C702-18.

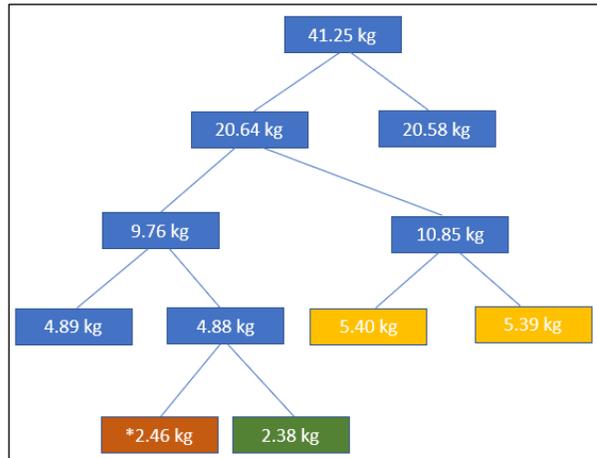


Figura R4. Reducción de muestras de piedra quinta para ensayos de caracterización según norma ASTM C702-18. \*Este material se desechó accidentalmente por lo que se hizo una reducción extra para obtener la muestra de la cual realizar el ensayo de gravedad específica para la piedra quinta, esta reducción se muestra en la Figura 11.

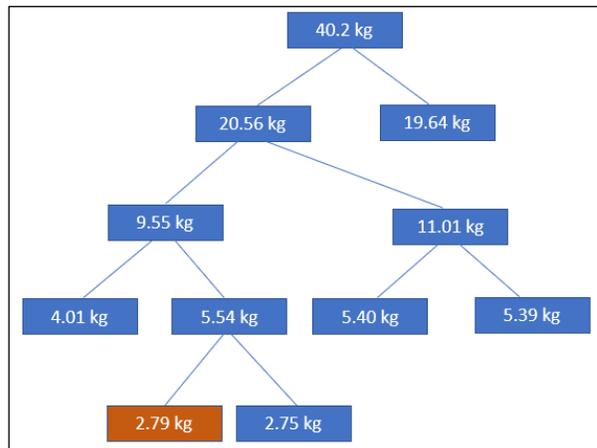


Figura R5. Reducción extra de una muestra de piedra quinta según norma ASTM C702-18.

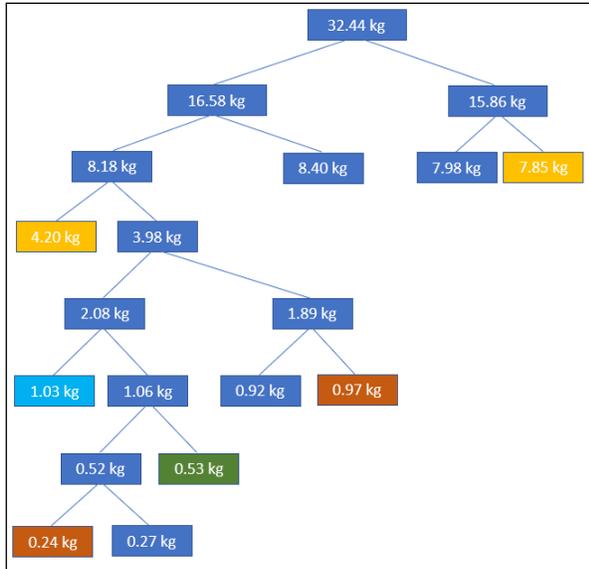


Figura R6. Reducción de muestras de polvo de piedra para ensayos de caracterización según norma ASTM C702-18.

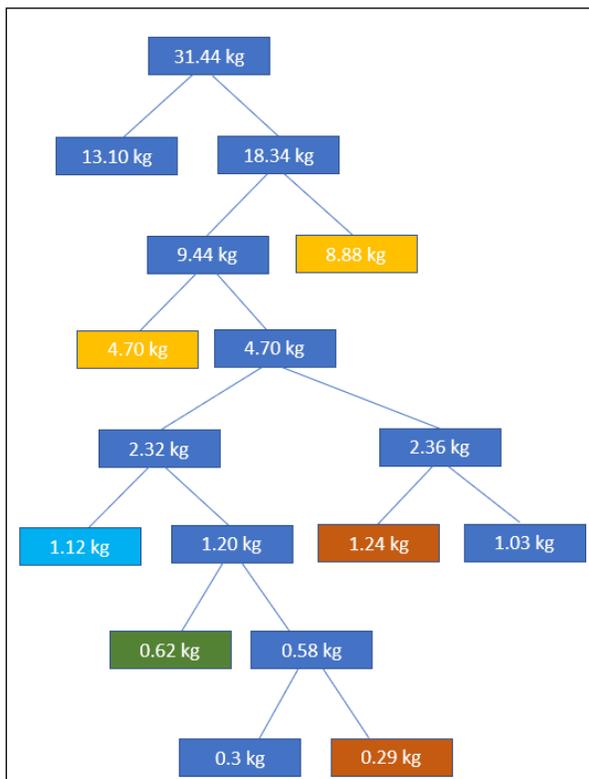


Figura R7. Reducción de muestras de arena para ensayos de caracterización según norma ASTM C702-18.

A continuación, se muestran los resultados de los ensayos, con su respectiva norma ASTM, que se realizaron para la arena, el

polvo de piedra y la piedra quinta obtenidos del Quebrador Ochomogo.

## Arena

**Cuadro 1. Resultados del ensayo de lavado de finos para la Arena (norma ASTM C117-17 y ASTM C33-18).**

Peso material seco sin lavar ( $\pm 0,1$ gr)	615,3
Peso material seco lavado ( $\pm 0,1$ gr)	526,2
Peso de finos ( $\pm 0,1$ gr)	89,0
Porcentaje de finos ( $\pm 1\%$ )	15
Límite de finos para agregado fino de concreto no sujeto a abrasión. (5% Máximo)	No cumple

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

La muestra de agregado fino destinada al ensayo de granulometría debe lavarse para limpiar la muestra de partículas menores a 0,075mm de diámetro. Para esto se siguió el "Procedimiento A", establecido en la sección 8 de la norma ASTM C117-17. Luego esa misma muestra se seca al horno según las normas para proceder a obtener la granulometría de este material.

**Cuadro 2. Masa de material para obtener la granulometría para la Arena (norma ASTM C136-19).**

Peso bandeja ( $\pm 0,01$ gr)	67,43
Peso bandeja + material seco sin lavar ( $\pm 0,01$ gr)	682,71
Peso seco sin lavar ( $\pm 0,01$ gr)	615,28
Peso bandeja + material seco lavado1 ( $\pm 0,01$ gr)	593,61
Peso material seco lavado1 ( $\pm 0,01$ gr)	526,18
Peso bandeja + material seco lavado2 ( $\pm 0,01$ gr)	593,67
Peso material seco lavado2 ( $\pm 0,01$ gr)	526,24
Masa constante peso seco lavado (%)	0,01
Peso bandeja para material retenido ( $\pm 0,01$ gr)	272,48

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

La muestra que se pone a secar se debe llevar a masa constante como se muestra en el Cuadro 2. Posterior a esto, se usa el último peso tomado para hacer la granulometría.

<b>Cuadro 3. Resultados del ensayo de granulometría para la Arena (norma ASTM C136-19).</b>				
Tamiz	Material retenido ( $\pm 0,01$ gr)	Porcen. Retenido ( $\pm 1\%$ )	Porcen. Retenido Acumulado ( $\pm 1\%$ )	Porcen. Pasando ( $\pm 1\%$ )
9,50	5,77	1	1	99
4,75	66,21	11	12	88
2,36	89,54	15	26	74
1,18	91,21	15	41	59
0,60	97,44	16	57	43
0,30	84,26	14	71	29
0,15	60,80	10	80	20
0,075	31,60	5	86	14
Charola	89,93	15	100	0
$\Sigma$	616,76			

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

En la charola se considera el peso de material lavado por el método de la norma ASTM C117-17. Posteriormente se calcula el módulo de finura, el porcentaje de error de la granulometría realizada.

<b>Cuadro 4. Resumen de datos para la Arena obtenidos a partir de la granulometría (norma ASTM C136-19).</b>	
Peso total Tamizado ( $\pm 0,01$ gr)	615,28
Sumatoria de material retenido ( $\pm 0,01$ gr)	616,76
Módulo de finura ( $\pm 0,01$ )	2,88
Límite de Módulo de finura (2,3-3,1)	Cumple
Porcentaje de Error ( $\pm 0,01\%$ )	0,24
Límite de porcentaje de error ( $< 0,3$ )	Cumple
Porcentaje de Finos ( $\pm 1\%$ )	15

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

Para determinar si el agregado estaba contaminado con material orgánico se le aplicó el ensayo de colorimetría a partir de la norma ASTM C40-20. En el cuadro 5 se muestra el rango de colores para evaluar esta característica.

<b>Cuadro 5. Rango de color estándar para la evaluación del contenido orgánico (norma ASTM C40-20).</b>	
# de color estándar	# de placa orgánica
5	1
8	2
11	3 (estándar)
14	4
16	5

Fuente: elaboración propia a partir de la Tabla 1 de la norma ASTM C40-20, utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

Se utilizó el número de placa orgánica y se obtuvieron los resultados mostrados en las figuras R8 y R9.

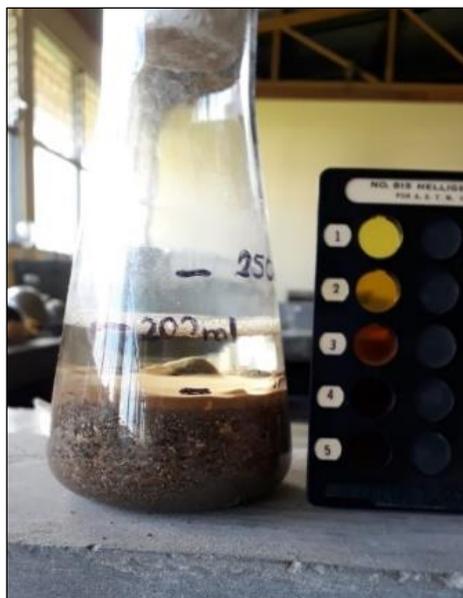


Figura R8. Colorimetría aplicada a la arena.  
Fuente: Elaboración propia.

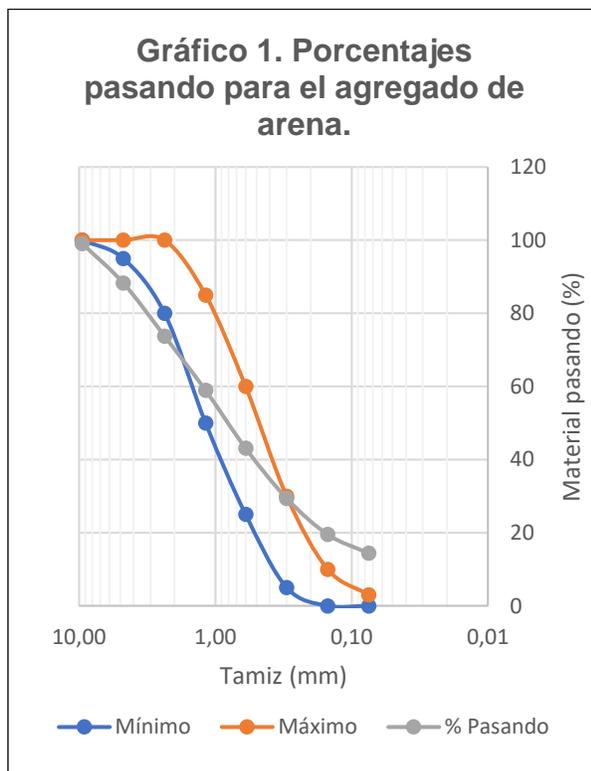
De la norma ASTM C33-18 se obtienen los parámetros para determinar si la granulometría de un agregado es adecuada para su uso en las mezclas de concreto, los cuales se ven en el cuadro 6, en donde se muestran los tamaños de los tamices en milímetros.

**Cuadro 6. Valores máximos y mínimos de porcentajes pasando cada tamiz para agregado fino (norma ASTM C33-18).**

Porcentaje pasando		
Tamiz (mm)	Mínimo (%)	Máximo (%)
9,50	100	100
4,75	95	100
2,36	80	100
1,18	50	85
0,60	25	60
0,30	5	30
0,15	0	10
0,075	0	3

Fuente: elaboración propia a partir de la Tabla 1 de la norma ASTM C33-18, utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

El gráfico 1 muestra los valores límites del cuadro 6 y los obtenidos en la arena del cuadro 3.



Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

Se calcula la gravedad específica siguiendo el procedimiento gravimétrico (picnómetro) de la norma ASTM C128-15 cuyo resultado se muestra en el siguiente cuadro.

**Cuadro 7. Datos del ensayo de gravedad específica para la arena (norma ASTM C128-15).**

Descripción	Medición 1	Medición 2
Material seco ( $\pm 0,1$ gr)	459,1	458,8
Peso picnómetro #6 ( $\pm 0,1$ gr)	172,4	172,4
Peso material saturado ( $\pm 0,1$ gr)	498,0	497,0
Peso picnómetro + espécimen + agua ( $\pm 0,1$ gr)	938,8	939,2
Peso picnómetro + agua ( $\pm 0,1$ gr)	670,3	670,3
Densidad relativa seca al horno ( $\pm 0,01$ )	2,00	2,01
Densidad relativa saturada superficie seca ( $\pm 0,01$ )	2,17	2,18
Densidad relativa aparente ( $\pm 0,01$ )	2,41	2,42
% absorción ( $\pm 0,1\%$ )	8,5	8,3

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

De los dos valores obtenidos para cada densidad relativa, se calcula la desviación estándar para verificar que cumpla con los valores de la norma, según la tabla 1 de la sección 12.

**Cuadro 8. Desviación estándar de los valores de gravedad específica para la arena (norma ASTM C128-15).**

Densidad relativa (seca al horno)	0,007102	Cumple
Densidad relativa (saturada superficie seca)	0,006003	Cumple
Densidad relativa (aparente)	0,005352	Cumple
% absorción	0,084571	Cumple

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

Se procede a realizar por último el ensayo de la norma ASTM C29-17<sup>a</sup> para obtener el peso unitario y también el porcentaje de absorción que depende de la gravedad específica seca al horno.

En los cuadros 8 y 9 se muestran los resultados de esta práctica. Por ser agregado fino se utilizó el Método B (Vibrado) de la sección 9 de esta norma.

<b>Cuadro 9. Peso unitario suelto de la arena (norma ASTM C29-17a).</b>		
1	Volumen del recipiente (cm <sup>3</sup> )	2820,00
	Peso recipiente (±0,05 kg)	2,63
	Peso recipiente + material (±0,05 kg)	6,37
	Peso unitario (kg/m <sup>3</sup> )	1325
2	Volumen del recipiente (cm <sup>3</sup> )	2820,00
	Peso recipiente (±0,05 kg)	2,63
	Peso recipiente + material (±0,05 kg)	6,38
	Peso unitario (kg/m <sup>3</sup> )	1327
3	Volumen del recipiente (cm <sup>3</sup> )	2820,00
	Peso recipiente (±0,05 kg)	2,63
	Peso recipiente + material (±0,05 kg)	6,37
	Peso unitario (kg/m <sup>3</sup> )	1326
Desviación Estándar (<14 kg/m <sup>3</sup> )		0,85
Promedio (±1 kg/m <sup>3</sup> )		1330
Porcentaje de vacíos (±1%)		34

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

<b>Cuadro 10. Peso unitario compactado de la arena (norma ASTM C29-17a).</b>		
1	Volumen del recipiente (cm <sup>3</sup> )	2820,00
	Peso recipiente (±0,05 kg)	2,63
	Peso recipiente + material (±0,05 kg)	6,88
	Peso unitario (kg/m <sup>3</sup> )	1507
2	Volumen del recipiente (cm <sup>3</sup> )	2820,00
	Peso recipiente (±0,05 kg)	2,63
	Peso recipiente + material (±0,05 kg)	6,87
	Peso unitario (kg/m <sup>3</sup> )	1504
3	Volumen del recipiente (cm <sup>3</sup> )	2820,00
	Peso recipiente (±0,05 kg)	2,63
	Peso recipiente + material (±0,05 kg)	6,89
	Peso unitario (kg/m <sup>3</sup> )	1508
Desviación Estándar (<14 kg/m <sup>3</sup> )		2,08
Promedio (±1 kg/m <sup>3</sup> )		1510
Porcentaje de vacíos (±1%)		25

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

## Polvo de piedra

Se lavó la muestra de polvo de piedra siguiendo el Procedimiento A de la sección 8 de la norma ASTM C117-17.

**Cuadro 11. Resultados del ensayo de lavado de finos para el polvo de piedra (norma ASTM C117-17 y ASTM C33-18).**

Peso material seco sin lavar (±0,01gr)	525,41
Peso material seco lavado (±0,01gr)	482,40
Peso de finos (±0,01gr)	43,01
Porcentaje de finos (±0,1%)	8,2
Límite de finos para agregado fino de concreto no sujeto a abrasión. (5% Máximo)	No Cumple

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

Como se observa en el cuadro 12, este material pasa completamente el tamiz 3/8", por lo que es considerado un agregado fino. Al ser así se sometió a los mismos ensayos que la arena fina, siguiendo los procedimientos de sus respectivas normas ASTM.

**Cuadro 12. Masa de material para obtener la granulometría para el polvo de piedra (norma ASTM C136-19).**

Peso bandeja (±0,01gr)	122,61
Peso bandeja + seco sin lavar(±0,01gr)	648,02
Peso seco sin lavar (±0,01gr)	525,41
Peso bandeja + material seco lavado1 (±0,01gr)	605,03
Peso material seco lavado1 (±0,01gr)	482,42
Peso bandeja + material seco lavado2 (±0,01gr)	605,01
Peso material seco lavado2 (±0,01gr)	482,40
Masa constante	0,00
Peso total para tamizar (±0,01gr)	483,60
Peso bandeja para material retenido (±0,01gr)	272,48

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

**Cuadro 13. Resultados del ensayo de granulometría para el polvo de piedra (norma ASTM C136-19).**

Tamiz (mm)	Material retenido ( $\pm 0,01$ gr)	Porcen. Retenido ( $\pm 1\%$ )	Porcen. Retenido Acumulado ( $\pm 1\%$ )	Porcen. Pasando ( $\pm 1\%$ )
9,50	0,00	0	0	100
4,75	172,07	33	33	67
2,36	141,11	27	60	40
1,18	73,68	14	74	26
0,60	46,88	9	83	17
0,30	28,36	5	88	12
0,15	15,08	3	91	9
0,075	6,98	1	92	7,9 ( $\pm 0,1\%$ )
Charola	43,25	8	100	0
$\Sigma$	527,41			

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

De los resultados en el Cuadro 12 se calculan el porcentaje de error, porcentaje de finos y módulo de finura del material, que se muestra en el siguiente cuadro.

**Cuadro 14. Resumen de datos para el polvo de piedra obtenidos a partir de la granulometría (norma ASTM C136-19).**

Peso total Tamizado ( $\pm 0,01$ gr)	525,41
Sumatoria de material retenido ( $\pm 0,01$ gr)	527,41
Módulo de finura	4,27
Límite de Módulo de finura (2,3-3,1)	No cumple
Porcentaje de Error ( $\pm 0,01\%$ )	0,38
Límite de porcentaje de error ( $<0,3$ )	No cumple
Porcentaje de Finos ( $\pm 0,1\%$ )	8,2

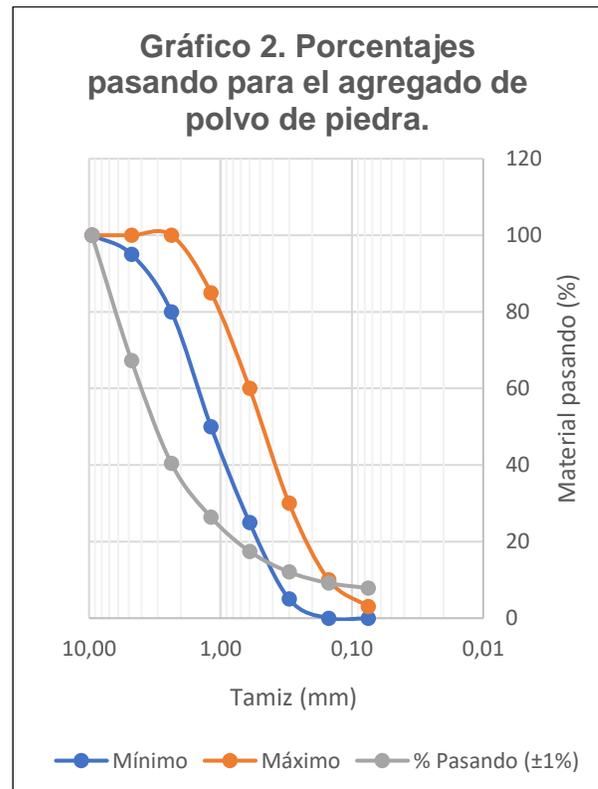
Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

Basados en la norma ASTM C40-20 se realizó, también el ensayo de colorimetría en el polvo de piedra.



Figura R9. Colorimetría aplicada en el polvo de piedra. Fuente: Elaboración propia.

Con los datos del cuadro 6, también se grafica la curva granulométrica del polvo de piedra y se muestra en el gráfico 2.



Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

**Cuadro 15. Datos del ensayo de gravedad específica para el polvo de piedra (norma ASTM C128-15).**

Descripción	Medición 1	Medición 2
Material seco ( $\pm 0,1$ gr)	479,5	479,2
Peso picnómetro #6 ( $\pm 0,1$ gr)	172,4	172,4
Peso material saturado ( $\pm 0,1$ gr)	500,0	499,8
Peso picnómetro + espécimen + agua ( $\pm 0,1$ gr)	972,6	972,2
Peso picnómetro + agua ( $\pm 0,1$ gr)	670,3	670,3
Densidad relativa seca al horno ( $\pm 0,01$ )	2,43	2,42
Densidad relativa saturada superficie seca ( $\pm 0,01$ )	2,53	2,53
Densidad relativa aparente ( $\pm 0,01$ )	2,71	2,70
% absorción ( $\pm 0,1$ %)	4,3	4,3

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

**Cuadro 16. Desviación estándar de los valores de gravedad específica para el polvo de piedra (norma ASTM C128-15).**

Densidad relativa (seca al horno)	0,002454	Cumple
Densidad relativa (saturada superficie seca)	0,002450	Cumple
Densidad relativa (aparente)	0,002724	Cumple
% absorción	0,004528	Cumple

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

Una vez calculados los valores de las distintas gravedades específicas se procede a calcular los pesos unitarios del polvo de piedra siguiendo el procedimiento del Método B (Vibrado) de la sección 9 de la norma ASTM C29-17a.

**Cuadro 17. Peso unitario suelto del polvo de piedra (norma ASTM C29-17a).**

1	Volumen del recipiente ( $\text{cm}^3$ )	2820,00
	Peso recipiente ( $\pm 0,05$ kg)	2,63
	Peso recipiente + material ( $\pm 0,05$ kg)	6,62
	Peso unitario ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	1413
2	Volumen del recipiente ( $\text{cm}^3$ )	2820,00
	Peso recipiente ( $\pm 0,05$ kg)	2,63
	Peso recipiente + material ( $\pm 0,05$ kg)	6,65
	Peso unitario ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	1425
3	Volumen del recipiente ( $\text{cm}^3$ )	2820,00
	Peso recipiente ( $\pm 0,05$ kg)	2,63
	Peso recipiente + material ( $\pm 0,05$ kg)	6,63
	Peso unitario ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	1416
Desviación Estándar ( $< 14 \text{ kg}/\text{m}^3$ )		6,45
Promedio ( $\pm 1 \text{ kg}/\text{m}^3$ )		1420
Porcentaje de vacíos ( $\pm 1\%$ )		41

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

**Cuadro 18. Peso unitario compactado del polvo de piedra (norma ASTM C29-17a).**

1	Volumen del recipiente ( $\text{cm}^3$ )	2820,00
	Peso recipiente ( $\pm 0,05$ kg)	2,63
	Peso recipiente + material ( $\pm 0,05$ kg)	7,22
	Peso unitario ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	1625
2	Volumen del recipiente ( $\text{cm}^3$ )	2820,00
	Peso recipiente ( $\pm 0,05$ kg)	2,63
	Peso recipiente + material ( $\pm 0,05$ kg)	7,25
	Peso unitario ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	1638
3	Volumen del recipiente ( $\text{cm}^3$ )	2820,00
	Peso recipiente ( $\pm 0,05$ kg)	2,63
	Peso recipiente + material ( $\pm 0,05$ kg)	7,22
	Peso unitario ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	1628
Desviación Estándar ( $< 14 \text{ kg}/\text{m}^3$ )		7,12
Promedio ( $\pm 1 \text{ kg}/\text{m}^3$ )		1630
Porcentaje de vacíos ( $\pm 1\%$ )		33

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

## Piedra quinta

La piedra quinta no pasa por el proceso de lavado de finos, por lo que directamente se pone a secar al horno para eliminar su humedad.

**Cuadro 19. Masa de material para obtener la granulometría para la piedra quinta (norma ASTM C136-19).**

Peso bandeja ( $\pm 0,01$ gr)	308,82
Peso bandeja + material seco1 ( $\pm 0,01$ gr)	2542,50
Peso material seco1 ( $\pm 0,01$ gr)	2233,68
Peso bandeja + material seco2 ( $\pm 0,01$ gr)	2542,50
Peso material seco2 ( $\pm 0,01$ gr)	2233,68
Masa constante	0,00

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

**Cuadro 20. Resultados del ensayo de granulometría para la piedra quinta (norma ASTM C136-19).**

Tamiz (mm)	Material retenido ( $\pm 0,01$ gr)	Porcen. Retenido ( $\pm 1\%$ )	Porcen. Retenido Acumulado ( $\pm 1\%$ )	Porcen. Pasando ( $\pm 1\%$ )
19,00	0,00	0	0	100
12,50	334,07	15	15	85
9,50	763,84	34	49	51
4,75	866,64	39	88	12
2,36	161,82	7	95	5
Charola	102,98	5	100	0
$\Sigma$	2229,35			

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

**Cuadro 21. Resumen de datos para la piedra quinta obtenidos a partir de la granulometría (norma ASTM C136-19).**

Peso total Inicial ( $\pm 0,01$ gr)	2233,68
Sumatoria de material retenido ( $\pm 0,01$ gr)	2229,35
Porcentaje de Error ( $\pm 0,01\%$ )	0,19
Límite de porcentaje de error	Cumple

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

El agregado grueso, para un tamaño máximo de 12,50 mm, utiliza los tamices de 19,00, 12,50, 9,50, 4,75 y 2,36 mm.

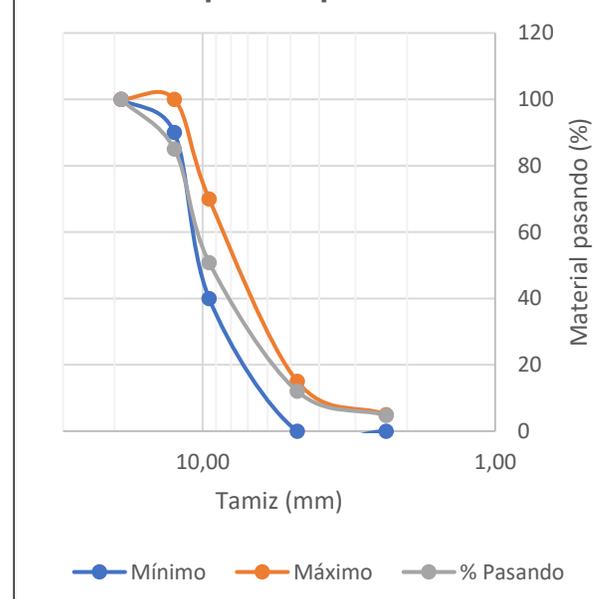
**Cuadro 22. Valores máximos y mínimos de porcentajes pasando cada tamiz para agregado grueso (norma ASTM C33-18).**

Porcentaje pasando		
Tamiz (mm)	Mínimo (%)	Máximo (%)
19,00	100	100
12,50	90	100
9,50	40	70
4,75	0	15
2,36	0	5

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

El gráfico 3 muestra los valores límites del cuadro 20 y los obtenidos en la piedra quinta del cuadro 18.

**Gráfico 3. Porcentajes pasando para el agregado de piedra quinta.**



Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

Para la gravedad específica de la piedra quinta, se utiliza la C127-15, por ser agregado grueso.

<b>Cuadro 23. Datos del ensayo de gravedad específica para la piedra quinta (norma ASTM C127-15).</b>		
Descripción	Medición 1	Medición 2
Masa sin procesar ( $\pm 0,1$ gr)	2664,5	2664,5
Masa sin finos ( $\pm 0,1$ gr)	2279,6	2277,9
Peso material lavado seco al horno1 ( $\pm 0,1$ gr)	2223,6	2221,1
Peso material lavado seco al horno2 ( $\pm 0,1$ gr)	2223,8	2221,0
Masa constante	0,0	0,0
Peso material SSS ( $\pm 0,1$ gr)	2290,9	2288,7
Peso Sumergido ( $\pm 0,1$ gr)	1308,5	1307,2
Densidad relativa seca al horno ( $\pm 0,01$ )	2,26	2,26
Densidad relativa saturada superficie seca ( $\pm 0,01$ )	2,33	2,33
Densidad relativa aparente ( $\pm 0,01$ )	2,43	2,43
% absorción ( $\pm 0.1$ %)	3,0	3,1

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

<b>Cuadro 24. Desviación estándar de los valores de gravedad específica para la piedra quinta (norma ASTM C127-15).</b>		
Densidad relativa (seca al horno)	0,000334	Cumple
Densidad relativa (saturada superficie seca)	0,000073	Cumple
Densidad relativa (aparente)	0,000322	Cumple
% absorción	0,021792	Cumple

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

Con la gravedad específica de la piedra quinta, se procede a obtener el peso unitario suelto y compactado del material junto con su porcentaje de vacíos.

<b>Cuadro 25. Peso unitario suelto de piedra quinta (norma ASTM C29-17a).</b>		
1	Volumen del recipiente ( $\text{cm}^3$ )	2820,00
	Peso recipiente ( $\pm 0,05$ kg)	2,63
	Peso recipiente + material ( $\pm 0,05$ kg)	6,10
	Peso unitario ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	1228
2	Volumen del recipiente ( $\text{cm}^3$ )	2820,00
	Peso recipiente ( $\pm 0,05$ kg)	2,63
	Peso recipiente + material ( $\pm 0,05$ kg)	6,09
	Peso unitario ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	1225
3	Volumen del recipiente ( $\text{cm}^3$ )	2820,00
	Peso recipiente ( $\pm 0,05$ kg)	2,63
	Peso recipiente + material ( $\pm 0,05$ kg)	6,0983
	Peso unitario ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	1229
Desviación Estándar ( $< 14$ $\text{kg}/\text{m}^3$ )		1,98
Promedio ( $\pm 1$ $\text{kg}/\text{m}^3$ )		1230
Porcentaje de vacíos ( $\pm 1\%$ )		46

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

<b>Cuadro 26. Peso unitario compactado de piedra quinta (norma ASTM C29-17a).</b>		
1	Volumen del recipiente ( $\text{cm}^3$ )	2820,00
	Peso recipiente ( $\pm 0,05$ kg)	2,63
	Peso recipiente + material ( $\pm 0,05$ kg)	6,32
	Peso unitario ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	1308
2	Volumen del recipiente ( $\text{cm}^3$ )	2820,00
	Peso recipiente ( $\pm 0,05$ kg)	2,63
	Peso recipiente + material ( $\pm 0,05$ kg)	6,34
	Peso unitario ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	1314
3	Volumen del recipiente ( $\text{cm}^3$ )	2820,00
	Peso recipiente ( $\pm 0,05$ kg)	2,63
	Peso recipiente + material ( $\pm 0,05$ kg)	6,33
	Peso unitario ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	1309
Desviación Estándar ( $< 14$ $\text{kg}/\text{m}^3$ )		3,43
Promedio ( $\pm 1$ $\text{kg}/\text{m}^3$ )		1310
Porcentaje de vacíos ( $\pm 1\%$ )		42

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

Se realiza la primera determinación de la pérdida de material por abrasión para el agregado grueso.

<b>Cuadro 27. Extracción de material para la primera prueba de Abrasión de piedra quinta (norma ASTM C131-20).</b>	
<b>Muestra para clasificación tipo B (Tabla 1 de la norma)</b>	
Peso bandeja #5 ( $\pm 0,01$ gr)	830,00
Peso material + bandeja #5 ( $\pm 0,01$ gr)	3664,10
Peso retenido en tamiz 1/2" ( $\pm 0,01$ gr)	2834,10
Peso bandeja #1 ( $\pm 0,01$ gr)	822,20
Peso material + bandeja #1 ( $\pm 0,01$ gr)	3589,60
Peso retenido en 3/8" ( $\pm 0,01$ gr)	2767,40

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

Según la clasificación de la muestra mostrada en el Cuadro 24, se determina con la sección 6.4.1 de la norma, el número de esferas de acero que se requieren para esta graduación y se pesan para verificar que cumplan con la masa de carga.

<b>Cuadro 28. Masa de carga para primera prueba de Abrasión de piedra quinta (norma ASTM C131-20).</b>	
Peso bandeja ( $\pm 0,01$ gr)	111,40
Peso de 11 Esferas + bandeja ( $\pm 0,01$ gr)	4671,40
Peso Esferas ( $\pm 0,01$ gr)	4560,00
Límite de peso por Norma ( $\pm 0,01$ gr)	4580 $\pm$ 25
Estado	Cumple

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

Se deben preparar, según la tabla 1 de la norma ASTM C131-20, 2500 gr de material retenido en el tamiz 12,5 mm (1/2") y 2500 gr de material retenido en 9,5 mm (3/8").

**Cuadro 29. Preparación del material retenido en tamiz 3/8" para ponerlo a prueba en máquina de los ángeles (norma ASTM C131-20). Primera prueba.**

<b>Material retenido en 3/8"</b>	
Peso seco lavado1 + bandeja #1 ( $\pm 0,01$ gr)	3476,80
Peso seco lavado2 + bandeja #1 ( $\pm 0,01$ gr)	3477,70
Masa constante	0,03
<b>Material extraído para introducir a la máquina de los ángeles</b>	
Masa bandeja #1 ( $\pm 0,01$ gr)	822,20
Material extraído ( $\pm 0,01$ gr)	155,30
Material para Máquina de los ángeles ( $\pm 0,01$ gr)	2500,20

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

**Cuadro 30. Preparación del material retenido en tamiz 1/2" para ponerlo a prueba en máquina de los ángeles (norma ASTM C131-20). Primera prueba.**

<b>Material retenido en 1/2"</b>	
Peso seco lavado1 + bandeja #5 ( $\pm 0,01$ gr)	3549,30
Peso seco lavado2 + bandeja #5 ( $\pm 0,01$ gr)	3550,90
Masa constante	0,05
<b>Material extraído para introducir a la máquina de los ángeles</b>	
Masa bandeja #5 ( $\pm 0,01$ gr)	822,20
Material extraído ( $\pm 0,01$ gr)	227,10
Material para Máquina de los ángeles ( $\pm 0,01$ gr)	2501,60

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

Se preparan las muestras de material retenido en 1/2" y 3/8" como se muestra en los cuadros 26 y 27, para poder incorporarlo en la Máquina de los ángeles y posteriormente determinar el porcentaje perdido del material.

<b>Cuadro 31. Determinación del porcentaje de material perdido (norma ASTM C131-20). Primera prueba.</b>	
Material seco procesado y lavado1 ( $\pm 0,01$ gr)	3333,90
Material seco procesado y lavado2 ( $\pm 0,01$ gr)	3335,40
Masa constante	0,04
Porcentaje perdido ( $\pm 1\%$ )	33

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

Luego se repite el ensayo para obtener un segundo dato del porcentaje perdido y verificar la precisión.

<b>Cuadro 32. Extracción de material para la segunda prueba de Abrasión de piedra quinta (norma ASTM C131-20).</b>	
<b>Muestra para clasificación tipo B (Tabla 1 de la norma)</b>	
Peso bandeja #3 ( $\pm 0,01$ gr)	1258,27
Peso material + bandeja #3 ( $\pm 0,01$ gr)	4375,80
Peso retenido en #1/2 ( $\pm 0,01$ gr)	3117,53
Peso bandeja #7 ( $\pm 0,01$ gr)	823,10
Peso material + bandeja #7 ( $\pm 0,01$ gr)	4305,60
Peso retenido en #3/8 ( $\pm 0,01$ gr)	3482,50

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

<b>Cuadro 33. Masa de carga para segunda prueba de Abrasión de piedra quinta (norma ASTM C131-20).</b>	
Peso bandeja ( $\pm 0,01$ gr)	143,90
Peso de 11 Esferas + bandeja ( $\pm 0,01$ gr)	4746,00
Peso Esferas ( $\pm 0,01$ gr)	4602,10
Límite de peso por Norma ( $\pm 0,01$ gr)	4580 $\pm$ 25
Estado	Cumple

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

<b>Cuadro 34. Preparación del material retenido en tamiz 3/8" para ponerlo a prueba en máquina de los ángeles (norma ASTM C131-20). Segunda prueba.</b>	
<b>Material retenido en 3/8"</b>	
Peso seco lavado1 + bandeja #7 ( $\pm 0,01$ gr)	4191,00
Peso seco lavado2 + bandeja #7 ( $\pm 0,01$ gr)	4192,70
Masa constante 1	0,04
<b>Material extraído para introducir a la máquina de los ángeles</b>	
Masa bandeja #7 ( $\pm 0,01$ gr)	823,10
Material extraído ( $\pm 0,01$ gr)	869,50
Material para Máquina de los ángeles ( $\pm 0,01$ gr)	2500,10

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

<b>Cuadro 35. Preparación del material retenido en tamiz 1/2" para ponerlo a prueba en máquina de los ángeles (norma ASTM C131-20). Segunda prueba.</b>	
<b>Material retenido en 1/2</b>	
Peso seco lavado1 + bandeja #3 ( $\pm 0,01$ gr)	4259,20
Peso seco lavado2 + bandeja #3 ( $\pm 0,01$ gr)	4261,60
Masa constante 1	0,06
<b>Material extraído para introducir a la máquina de los ángeles</b>	
Masa bandeja #3 ( $\pm 0,01$ gr)	1258,27
Material extraído ( $\pm 0,01$ gr)	503,25
Material para Máquina de los ángeles ( $\pm 0,01$ gr)	2500,08

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

<b>Cuadro 36. Determinación del porcentaje de material perdido luego de ponerlo a prueba en máquina de los ángeles (norma ASTM C131-20). Segunda prueba.</b>	
Material seco procesado y lavado1 (±0,01gr)	3435,10
Material seco procesado y lavado2 (±0,01gr)	3435,70
Masa constante	0,02
Porcentaje perdido (±1%)	31

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

<b>Cuadro 37. Desviación estándar de los porcentajes de material perdido en las pruebas de abrasión para la piedra quinta (norma ASTM C131-20).</b>	
Desviación estándar	1,43368207
Condición	Cumple

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

### Viruta de acero



Figura R10. Viruta de acero utilizada, muestra de material retenido en tamiz #50.  
Fuente: Elaboración propia.

<b>Cuadro 38. Gravedad Específica para viruta de acero (norma ASTM C128-15).</b>	
Material seco (±0.01 gr)	294,06
Peso picnómetro #6 (±0.01 gr)	172,38
Peso material saturado (±0.01 gr)	294,06
Peso picnómetro + espécimen + agua (±0.01 gr)	920,60
Peso picnómetro + agua (±0.01 gr)	670,26
Densidad relativa seca al horno (±0.01)	6,73
Densidad relativa saturada superficie seca (±0.01)	6,73
Densidad relativa aparente (±0.01)	6,73
% absorción (±0.1 %)	0,0

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

<b>Cuadro 39. Peso unitario suelto de viruta de acero (norma ASTM C29-17a).</b>		
1	Volumen del recipiente	2788,00
	Peso recipiente (±0,05 kg)	2,61
	Peso recipiente + material	4,50
	Peso unitario (kg/m <sup>3</sup> )	679
2	Volumen del recipiente	2788,00
	Peso recipiente (±0,05 kg)	2,61
	Peso recipiente + material	4,55
	Peso unitario (kg/m <sup>3</sup> )	696
Desviación Estándar (<14 kg/m <sup>3</sup> )		12,35
Promedio (±1 kg/m <sup>3</sup> )		690
Porcentaje de vacíos (±1%)		90

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

<b>Cuadro 40. Peso unitario compactado de viruta de acero (norma ASTM C29-17a).</b>		
1	Volumen del recipiente	2788,00
	Peso recipiente (±0,05 kg)	2,61
	Peso recipiente + material	5,27
	Peso unitario (kg/m <sup>3</sup> )	956
2	Volumen del recipiente	2788,00
	Peso recipiente (±0,05 kg)	2,61
	Peso recipiente + material	5,29
	Peso unitario (kg/m <sup>3</sup> )	962
Desviación Estándar (<14 kg/m <sup>3</sup> )		4,08
Promedio (±1 kg/m <sup>3</sup> )		960
Porcentaje de vacíos (±1%)		86

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

## Limadura de acero



Figura R11. Limadura de acero utilizada, muestra de material retenido en tamiz #50.

Fuente: Elaboración propia.

<b>Cuadro 41. Gravedad Específica para limadura de acero (norma ASTM C128-15).</b>	
Material seco ( $\pm 0.01$ gr)	293,23
Peso picnómetro #6 ( $\pm 0.01$ gr)	172,38
Peso material saturado ( $\pm 0.01$ gr)	293,23
Peso picnómetro + espécimen + agua ( $\pm 0.01$ gr)	909,90
Peso picnómetro + agua ( $\pm 0.01$ gr)	670,26
Densidad relativa seca al horno ( $\pm 0.01$ )	5,47
Densidad relativa saturada superficie seca ( $\pm 0.01$ )	5,47
Densidad relativa aparente ( $\pm 0.01$ )	5,47
% absorción ( $\pm 0.01$ %)	0,0

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

<b>Cuadro 42. Peso unitario suelto de limadura de acero (norma ASTM C29-17a).</b>		
1	Volumen del recipiente	2788,00
	Peso recipiente ( $\pm 0,05$ kg)	2,61
	Peso recipiente + material ( $\pm 0,05$ kg)	8,77
	Peso unitario ( $\text{kg/m}^3$ )	2212
2	Volumen del recipiente	2788,00
	Peso recipiente ( $\pm 005$ kg)	2,61
	Peso recipiente + material ( $\pm 0,05$ kg)	8,79
	Peso unitario ( $\text{kg/m}^3$ )	2217
Desviación Estándar ( $<14$ $\text{kg/m}^3$ )		3,37
Promedio ( $\pm 1$ $\text{kg/m}^3$ )		2210
Porcentaje de vacíos ( $\pm 1\%$ )		60

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

<b>Cuadro 43. Peso unitario compactado de limadura de acero (norma ASTM C29-17a).</b>		
1	Volumen del recipiente	2788,00
	Peso recipiente ( $\pm 0,05$ kg)	2,61
	Peso recipiente + material ( $\pm 0,05$ kg)	10,26
	Peso unitario ( $\text{kg/m}^3$ )	2744
2	Volumen del recipiente	2788,00
	Peso recipiente ( $\pm 0,05$ kg)	2,61
	Peso recipiente + material ( $\pm 0,05$ kg)	10,20
	Peso unitario ( $\text{kg/m}^3$ )	2725
Desviación Estándar ( $<14$ $\text{kg/m}^3$ )		13,16
Promedio ( $\pm 1$ $\text{kg/m}^3$ )		2730
Porcentaje de vacíos ( $\pm 1\%$ )		50

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

## R2. Diseño de mezcla para concreto hidráulico base

Para poder comparar los efectos del material ferromagnético en la resistencia del concreto, se requiere elaborar un concreto base, para poder tener un punto de comparación, por supuesto este concreto base no lleva ningún material ferromagnético incorporado en la mezcla.

Primero se calculan los porcentajes pasando que se requieren para construir un agregado fino, que cumpla con los límites establecidos en la norma ASTM C33-18. Se buscaron valores que quedaran en la mitad de los límites y que cumplieran con el módulo de finura también establecido en esta norma.

Es importante mencionar esta nomenclatura que aparece en algunos cuadros: M.f: Módulo de Finura. Gbss: Gravedad Especifica Saturada Superficie Seca. Gbs: Gravedad Especifica Seca al Horno. Gs: Gravedad Especifica Aparente. P.U: Peso unitario. %W: Humedad del agregado al realizar el peso unitario. %D: Absorción del agregado. H.Sitio: Humedad del agregado al momento de hacer la mezcla. T.M.N: Tamaño Máximo Nominal del agregado grueso.

<b>Cuadro 44. Determinación de porcentajes pasando para el agregado fino que se desea construir (norma ASTM C33-18).</b>			
Tamiz (mm)	Porcentaje retenido esperado (±0,1%)	Porcentaje retenido acumulado esperado (±0,1%)	Porcentaje pasando estimado (±0,1%)
9,5 (3/8")	0,0	0,0	100,0
4,75 (4)	2,5	2,5	97,5
2,36 (8)	12,5	15,0	85,0
1,18 (16)	25,0	40,0	60,0
0,6 (30)	25,0	65,0	35,0
0,3 (50)	20,0	85,0	15,0
0,15 (100)	10,0	95,0	5,0
0,075 (200)	5,0	100,0	0,0
Módulo de Finura	3,025		

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

Se debe calcular los porcentajes de humedad en sitio para los agregados que se van a utilizar en la mezcla de concreto. Estas humedades se obtuvieron por medio de calentamiento en una bandeja con una plantilla eléctrica, tal como lo permite la norma ASTM C566-19. Para esto se construyó una muestra de 500 gr que se puso a secar.

La muestra se pone a secar mientras se está revolviendo para no concentrar el calor en solo una parte de la muestra, luego se deja enfriar hasta que quede tibia y se pueda manipular con las manos, se pesa y se vuelve a calentar por unos 5 minutos más (la norma no indica tiempos de calentado). Luego de esto se deja enfriar nuevamente y se obtiene el segundo peso. Estos pasos se repiten hasta que se llegue a masa constante entre uno y otro, es decir una diferencia menor al 0,1%.

<b>Cuadro 45. Determinación del porcentaje de humedad en sitio para el agregado fino. (ASTM C566-19)</b>	
Masa Recipiente (±0,01 gr)	68,02
Recipiente + muestra (±0,01 gr)	568,55
Muestra húmeda (±0,01 gr)	500,53
Recipiente + Muestra seca1 (±0,01 gr)	556,26
Recipiente + Muestra seca2 (±0,01 gr)	556,19
Muestra seca1 (±0,01 gr)	488,24
Muestra seca2 (±0,01 gr)	488,17
Masa constante	0,01
Porcentaje de humedad (±0,01%)	2,52

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

<b>Cuadro 46. Determinación del porcentaje de humedad en sitio para el agregado grueso. (ASTM C566-19)</b>	
Masa Recipiente (±0,01 gr)	143,51
Recipiente + muestra (±0,01 gr)	1147,90
Muestra húmeda (±0,01 gr)	1004,39
Recipiente + Muestra seca1 (±0,01 gr)	1129,60
Recipiente + Muestra seca2 (±0,01 gr)	1128,70
Muestra seca1 (±0,01 gr)	986,09
Muestra seca2 (±0,01 gr)	985,19
Masa constante	0,09
Porcentaje de humedad (±0,01%)	1,86

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

En el siguiente cuadro se muestran los valores de entrada de los materiales para determinar la cantidad de agregado fino que se debe construir granulométricamente.

<b>Cuadro 47. Valores de entrada para el diseño de mezcla de concreto hidráulico base (ACI 211.1-91).</b>			
Material	Arena	Piedra	Cemento
M.f.	3,025	0,00	0,00
Gbss	2,53	2,33	0,00
Gbs	2,43	2,26	0,00
Gs	0,00	0,00	2,97
P.U. Suelto	1418,00	1227,00	1500,00
P.U. Compactado	1630,00	1310,00	0,00
%W	0,00	0,00	0,00
%D	4,28	3,02	0,00
%H. Sitio	2,52	1,86	0,00
T.M.N.	0,00	12,50	0,00

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

Se establece la resistencia deseada para el concreto a los 28 días y el asentamiento esperado en la mezcla para el molde.

<b>Cuadro 48. Condiciones para el diseño de concreto hidráulico (ACI 211.1-91).</b>	
f'c para diseño (MPa)	27,4586
f'cr crítico (MPa)	35,7586
Condición	Sin aire incluido
Asentamiento (mm)	75

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

<b>Cuadro 49. Dosificación para elaborar 18 cilindros de concreto base.</b>				
Material	Condición	Peso (kg)	Peso+20% (kg)	Dosificación
Cemento	Seco	12,928	15,513	1
Arena	Húmedo	20,563	24,676	1,59
Piedra	Húmedo	19,538	23,446	1,51
Agua	---	6,709	8,051	0,52

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

El diseño de mezcla completo se puede observar en el apéndice A1, donde se muestran los pasos que se deben seguir para obtener las dosificaciones de materiales para 1 m<sup>3</sup> de concreto y a partir de este las cantidades para los especímenes deseado.

Estos pasos se aplicaron en todos los diseños de mezcla que se realizaron para este proyecto de investigación.

Se procede a hacer la construcción granulométrica de los 24,7 kg de agregado fino para la mezcla de concreto base.

<b>Cuadro 50. Cálculo de porcentajes pasando para construir el agregado fino a utilizar en las mezclas de concreto (norma ASTM C33-18).</b>				
Masa agregado fino			24700	gr
Tamiz (mm)	Material retenido (±0,1gr)	Porcentaje retenido (±0,1%)	Porcentaje retenido acumulado (±0,1%)	Porcentaje pasando (±0,1%)
9,5	0,0	0,0	0,0	100,0
4,75	617,5	2,5	2,5	97,5
2,36	3087,5	12,5	15,0	85,0
1,18	6175,0	25,0	40,0	60,0
0,6	6175,0	25,0	65,0	35,0
0,3	4940,0	20,0	85,0	15,0
0,15	2470,0	10,0	95,0	5,0
0,075	1235,0	5,0	100,0	0,0
Charola	0,0	0,0	100,0	0,0
Σ	24700,0			

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

A la mezcla se le añadió un poco más de agua para poder obtener la consistencia deseada.

<b>Cuadro 51. Agua extra añadida a la mezcla de concreto base.</b>		
Peso agua extra	440	±5 gr

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

### R3. Diseño de mezcla para concreto hidráulico con limadura de acero

A partir de la cantidad de agregado fino para concreto base del Cuadro 40, se preparan 24,7 kg de agregado fino con limadura como primera aproximación.

**Cuadro 52. Cálculo de granulometría requerido para construir 24700 gr de agregado fino con limadura de acero (norma ASTM C33-18).**

Tamiz (mm)	Material retenido de agregado fino (±0,1gr)	Material retenido de acero (±0,1%)	Material usado de arena (±0,1%)	Material usado de acero (±0,1%)	Porcen. de acero (±0,01%)
9,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00
4,75	617,5	0,0	617,5	0,0	0,00
2,36	3087,5	340,5	2871,1	216,4	8,19
1,18	6175,0	530,8	5768,3	406,7	6,45
0,6	6175,0	1236,1	5063,0	1112,0	15,15
0,3	4940,0	3633,9	1430,2	3509,8	55,95
0,15	2470,0	4500,5	124,1	2345,9	100,00
0,075	1235,0	3224,2	124,1	1110,9	100,00
Charola	0,0	6192,9	0,0	0,0	0,00
Σ	24700,0		15998,2	8701,8	35,23

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

Se obtiene el peso unitario del agregado fino compuesto con limadura de acero pues este va a variar, debido a las diferencias que hay entre un material y otro.

**Cuadro 53. Peso unitario suelto de agregado fino con limadura de acero (norma ASTM C29-17a).**

Agregado fino (Suelto)		
1	Volumen del recipiente	2788,00
	Peso recipiente (±0,05 kg)	2,61
	Peso recipiente + material (±0,05 kg)	6,78
	Peso unitario (kg/m <sup>3</sup> )	1497
2	Volumen del recipiente	2788,00
	Peso recipiente (±0,05 kg)	2,61
	Peso recipiente + material (±0,05 kg)	6,77
	Peso unitario (kg/m <sup>3</sup> )	1494
Desviación Estándar (<14 kg/m <sup>3</sup> )		2,28
Promedio (±1 kg/m <sup>3</sup> )		1500
Porcentaje de vacíos (±1%)		73

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

**Cuadro 54. Peso unitario compactado de agregado fino con limadura de acero (norma ASTM C29-17a).**

Agregado fino (Compactado)		
1	Volumen del recipiente	2788,00
	Peso recipiente (±0,05 kg)	2,61
	Peso recipiente + material (±0,05 kg)	7,71
	Peso unitario (kg/m <sup>3</sup> )	1832
2	Volumen del recipiente	2788,00
	Peso recipiente (±0,05 kg)	2,61
	Peso recipiente + material (±0,05 kg)	7,68
	Peso unitario (kg/m <sup>3</sup> )	1819
Desviación Estándar (<14 kg/m <sup>3</sup> )		9,16
Promedio (±1 kg/m <sup>3</sup> )		1830
Porcentaje de vacíos (±1%)		67

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

Para obtener la gravedad específica del material compuesto con limadura de acero, se hace una correlación de la gravedad específica de la limadura con la gravedad específica del polvo de piedra.

**Cuadro 55. Correlación de la gravedad específica para el agregado fino compuesto con limadura de acero (Anguas et al, 2004).**

Gravedad Específica Polvo Piedra (Gbs)	2,43
Gravedad Específica Polvo Piedra (Gbss)	2,53
Gravedad Específica de Limadura suelta	5,47
Gravedad Específica Compuesta (Gbs)	3,02
Gravedad Específica Compuesta (Gbss)	3,12

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

**Cuadro 56. Determinación del porcentaje de humedad en sitio para el agregado fino con limadura. (ASTM C566-19)**

Masa Recipiente ( $\pm 0,01$ gr)	68,02
Recipiente + muestra ( $\pm 0,01$ gr)	571,88
Muestra húmeda ( $\pm 0,01$ gr)	503,86
Recipiente + Muestra seca1 ( $\pm 0,01$ gr)	564,48
Recipiente + Muestra seca2 ( $\pm 0,01$ gr)	564,12
Muestra seca1 ( $\pm 0,01$ gr)	496,46
Muestra seca2 ( $\pm 0,01$ gr)	496,10
Masa constante	0,07
Porcentaje de humedad ( $\pm 0,01\%$ )	1,49

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

**Cuadro 57. Determinación del porcentaje de humedad en sitio para el agregado grueso. (ASTM C566-19)**

Masa Recipiente #19 ( $\pm 0,01$ gr)	143,51
Recipiente #19 + muestra ( $\pm 0,01$ gr)	1145,10
Muestra húmeda ( $\pm 0,01$ gr)	1001,59
Recipiente + Muestra seca1 ( $\pm 0,01$ gr)	1126,82
Recipiente + Muestra seca2 ( $\pm 0,01$ gr)	1126,14
Muestra seca1 ( $\pm 0,01$ gr)	983,31
Muestra seca2 ( $\pm 0,01$ gr)	982,63
Masa constante	0,07
Porcentaje de humedad ( $\pm 0,01\%$ )	1,86

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

Se obtiene los porcentajes de humedad de cada material ya que este valor es necesario para hacer correcciones por humedad en la cantidad de agua requerida para la mezcla de concreto.

Con todos estos datos calculados se procede a realizar el diseño de mezcla, con el que se obtienen las dosificaciones de material requeridas para elaborar 19 cilindros de concreto de 100x200 mm.

**Cuadro 58. Valores de entrada para el diseño de mezcla de concreto hidráulico con limadura (ACI 211.1-91).**

Material	Arena	Piedra	Cemento
M.f.	3,025	0,00	0,00
Gbss	3,12	2,33	0,00
Gbs	3,02	2,26	0,00
Gs	0,00	0,00	2,97
P.U. Suelto	1496,00	1227,00	1500,00
P.U. Compactado	1825,00	1310,00	0,00
%W	1,49	0,00	0,00
%D	4,28	3,02	0,00
%H. Sitio	1,49	1,86	0,00
T.M.N.	0,00	12,50	0,00

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

**Cuadro 59. Dosificación definitiva para elaborar 19 cilindros de concreto con limadura de acero.**

Material	Condición	Peso (kg)	Peso +20% (kg)	Dosificación
Cemento	Seco	13,646	16,375	1
Arena	Húmedo	26,976	32,371	1,98
Piedra	Húmedo	20,624	24,748	1,51
Agua	---	7,454	8,945	0,55

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

Como se aprecia se requieren 32,4 kg de agregado fino, por lo que se debe construir más para completar el agregado fino. En el siguiente cuadro se muestra el total de cada tamiz para construir los 32,4 kg del agregado.

**Cuadro 60. Cálculo de granulometría requerido para construir 32400 gr de agregado fino con limadura de acero (norma ASTM C33-18).**

Tamiz (mm)	Material retenido de agregado fino (±0,1gr)	Material retenido de acero (±0,1%)	Material usado de arena (±0,1%)	Material usado de acero (±0,1%)	Porcen. de acero (±0,01%)
9,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00
4,75	810,0	0,0	810,0	0,0	0,00
2,36	4050,0	843,1	3506,2	543,8	8,19
1,18	8100,0	1341,6	7365,9	734,1	6,45
0,6	8100,0	1497,1	6660,6	1439,4	15,15
0,3	6480,0	3942,7	2642,8	3837,2	55,95
0,15	3240,0	4500,5	0,0	3240,0	100,00
0,075	1620,0	3224,2	0,0	1620,0	100,00
Charola	0,0	6192,9	0,0	0,0	0,00
Σ	32400,0		20985,5	11414,5	35,23

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

A esta mezcla también, se le añadió un poco más de agua de la calculada para llegar a la consistencia deseada.

**Cuadro 61. Agua extra añadida para la mezcla de concreto hidráulico con limadura.**

Peso agua extra	725	±5 gr
-----------------	-----	-------

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

**Cuadro 62. Porcentajes de acero con respecto a distintas presentaciones del diseño de mezcla con limadura.**

En el agregado fino	35,23	%
En la mezcla	10,53	%
En un cilindro	10,53	%

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

## R4. Diseño de mezcla para concreto hidráulico con viruta de acero

A partir de la cantidad de agregado fino para concreto base del Cuadro 40, se preparan 24,7 kg de agregado fino con viruta como primera aproximación.

**Cuadro 63. Cálculo de granulometría requerido para construir 24700 gr de agregado fino con viruta de acero (norma ASTM C33-18).**

Tamiz (mm)	Material retenido de agregado fino (±0,1gr)	Material retenido de acero (±0,1%)	Material usado de arena (±0,1%)	Material usado de acero (±0,1%)	Porcen. de acero (±0,01%)
9,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00
4,75	617,5	0,0	617,5	0,0	0,00
2,36	3087,5	26,7	3069,4	18,1	0,59
1,18	6175,0	102,4	6101,2	73,8	1,20
0,6	6175,0	1978,7	4361,1	1813,9	29,28
0,3	4940,0	9753,0	659,3	4280,7	86,65
0,15	2470,0	2524,2	110,6	2359,4	95,52
0,075	1235,0	155,8	1079,2	155,8	12,62
Charola	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00
Σ	24700,0		15998,2	8701,8	35,23

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

Se procede a realizar los ensayos de peso unitario para este nuevo agregado fino compuesto con viruta de acero.

**Cuadro 64. Peso unitario suelto de agregado fino con viruta de acero (norma ASTM C29-17a).**

Agregado fino (Suelto)		
1	Volumen del recipiente	2788,00
	Peso recipiente ( $\pm 0,05$ kg)	2,61
	Peso recipiente + material ( $\pm 0,05$ kg)	5,62
	Peso unitario ( $\text{kg/m}^3$ )	1082
2	Volumen del recipiente	2788,00
	Peso recipiente ( $\pm 0,05$ kg)	2,61
	Peso recipiente + material ( $\pm 0,05$ kg)	5,66
	Peso unitario ( $\text{kg/m}^3$ )	1093
Desviación Estándar ( $< 14 \text{ kg/m}^3$ )		8,01
Promedio ( $\pm 1 \text{ kg/m}^3$ )		1090
Porcentaje de vacíos ( $\pm 1\%$ )		84

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

**Cuadro 65. Peso unitario compactado de agregado fino con viruta de acero (norma ASTM C29-17a).**

Agregado fino (Compactado)		
1	Volumen del recipiente	2788,00
	Peso recipiente ( $\pm 0,05$ kg)	2,61
	Peso recipiente + material ( $\pm 0,05$ kg)	6,54
	Peso unitario ( $\text{kg/m}^3$ )	1412
2	Volumen del recipiente	2788,00
	Peso recipiente ( $\pm 0,05$ kg)	2,61
	Peso recipiente + material ( $\pm 0,05$ kg)	6,52
	Peso unitario ( $\text{kg/m}^3$ )	1402
Desviación Estándar ( $< 14 \text{ kg/m}^3$ )		7,46
Promedio ( $\pm 1 \text{ kg/m}^3$ )		1410
Porcentaje de vacíos ( $\pm 1\%$ )		79

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

Se hace una correlación entre la gravedad específica de la viruta de acero y la gravedad específica del polvo de piedra, para poder obtener la gravedad específica del nuevo agregado fino a partir de los porcentajes de polvo de piedra y de viruta de acero utilizados.

**Cuadro 66. Correlación de gravedad específica para el agregado fino con viruta de acero (norma ASTM C128-15).**

Gravedad Específica Polvo Piedra (Gbs)	2,43
Gravedad Específica Polvo Piedra (Gbss)	2,53
Gravedad Específica de viruta de acero	6,73
Gravedad Específica Compuesta (Gbs)	3,14
Gravedad Específica Compuesta (Gbss)	3,24

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

**Cuadro 67. Determinación del porcentaje de humedad en sitio del agregado fino con viruta de acero. (ASTM C566-19)**

Masa Recipiente ( $\pm 0,01$ gr)	121,71
Recipiente + muestra ( $\pm 0,01$ gr)	662,75
Muestra húmeda ( $\pm 0,01$ gr)	541,04
Recipiente + Muestra seca1 ( $\pm 0,01$ gr)	654,36
Recipiente + Muestra seca2 ( $\pm 0,01$ gr)	654,13
Muestra seca1 ( $\pm 0,01$ gr)	532,65
Muestra seca2 ( $\pm 0,01$ gr)	532,42
Masa constante	0,04
Porcentaje de humedad ( $\pm 0,01\%$ )	1,58

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

**Cuadro 68. Determinación del porcentaje de humedad en sitio del agregado grueso. (ASTM C566-19)**

Masa Recipiente #19 ( $\pm 0,01$ gr)	111,48
Recipiente + muestra ( $\pm 0,01$ gr)	1162,5
Muestra húmeda ( $\pm 0,01$ gr)	1051,02
Recipiente + Muestra seca1 ( $\pm 0,01$ gr)	1136,60
Recipiente + Muestra seca2 ( $\pm 0,01$ gr)	1137,10
Muestra seca1 ( $\pm 0,01$ gr)	1025,12
Muestra seca2 ( $\pm 0,01$ gr)	1025,62
Masa constante	0,05
Porcentaje de humedad ( $\pm 0,01\%$ )	2,53

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

**Cuadro 69. Valores de entrada para el diseño de mezcla de concreto hidráulico con viruta para desarrollar 19 cilindros (ACI 211.1-91).**

Material	Arena	Piedra	Cemento
M.f.	3,025	0	0
Gbss	3,24	2,33	0
Gbs	3,14	2,26	0
Gs	0	0	2,97
P.U. Suelto	1088	1227	1500
P.U. Compactado	1407	1310	0
%W	1,58	0	0
%D	4,28	3,02	0
%H. Sitio	1,58	2,53	0
T.M.N.	0	12,5	0

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

**Cuadro 70. Dosificación definitiva para elaborar 19 cilindros de concreto con viruta de acero.**

Material	Condición	Peso (kg)	Peso +20% (kg)	Dosificación
Cemento	Seco	13,646	16,375	1
Arena	Húmedo	28,047	33,657	2,06
Piedra	Húmedo	20,624	24,748	1,51
Agua	---	7,319	8,783	0,54

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

Como se aprecia, se necesitan 33,7 kg de agregado fino por lo que se debe construir más agregado para completar la demanda. En el siguiente cuadro se muestra el total de materiales mezclados por cada tamiz.

**Cuadro 71. Cálculo de granulometría requerido para construir 33700 gr de agregado fino con viruta de acero (norma ASTM C33-18).**

Tamiz (mm)	Material retenido de agregado fino ( $\pm 0,1\text{gr}$ )	Material retenido de acero ( $\pm 0,1\%$ )	Material usado de arena ( $\pm 0,1\%$ )	Material usado de acero ( $\pm 0,1\%$ )	Porcen. de acero ( $\pm 0,01\%$ )
9,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00
4,75	842,5	0,0	842,5	0,0	0,00
2,36	4212,5	283,6	4047,4	165,1	3,92
1,18	8425,0	455,4	8204,2	220,8	2,62
0,6	8425,0	2764,2	6299,3	2125,7	25,23
0,3	6740,0	8535,4	353,0	6387,0	94,76
0,15	3370,0	3951,1	698,8	2671,2	79,26
0,075	1685,0	1768,3	1382,2	302,8	17,97
Charola	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00
$\Sigma$	33700,0		21827,5	11872,5	35,23

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

Por último se corrige la cantidad de agua necesaria para la mezcla de concreto, debido a los porcentajes de humedad de los agregados.

**Cuadro 72. Agua extra añadida para la mezcla de concreto hidráulico con viruta.**

Peso agua extra	515	$\pm 5 \text{ gr}$
-----------------	-----	--------------------

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

**Cuadro 73. Porcentajes de acero con respecto a distintas presentaciones del diseño de mezcla con limadura.**

Del agregado fino	35,23	%
De la mezcla	10,53	%
En un cilindro	10,53	%

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

## R5. Fallas a compresión

Las fallas a compresión se realizaron a 3 edades, 7, 14 y 28 días. En cada edad se fallaron 6 cilindros para cada diseño de mezcla.

Se recopiló la información de tal manera que se evidencien las propiedades físicas y mecánicas de los especímenes producto de las fallas a la compresión.

Cada cilindro fallado se fotografió y se observó en busca de los patrones de falla y cualquier otro detalle de interés. Estas observaciones se ponen en las imágenes mostradas más adelante.

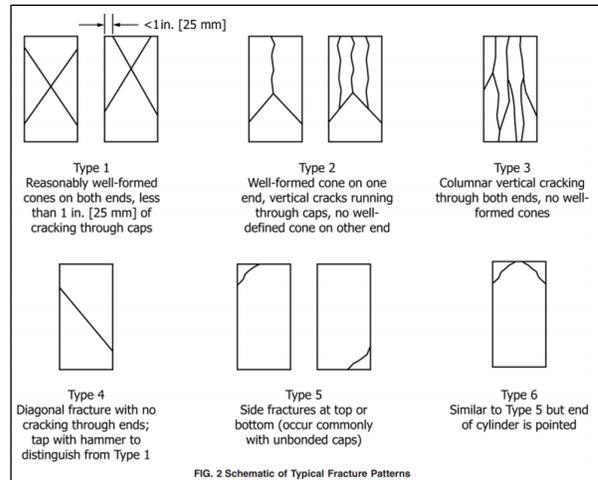


Figura R12. Tipos de falla en cilindros de concreto.  
Fuente: Norma ASTM C39/C39M-18.

## Concreto Base

Del Concreto Base se tienen 6 cilindros fallados a cada edad. A cada uno se les tomaron las medidas de altura y diámetro como lo especifica la norma. Sin embargo, el diámetro debió medirse con un Vernier, debido a que no estaba disponible pues lo estaban calibrando. Todos los datos mostrados, al igual que en el resto del documento, se reportan como se indica en las normas correspondientes.

**Cuadro 74. Resistencia de cilindros de Concreto Base fallados a 7 días.**

Muestra	Altura (±0,05cm)	Promedio (±0,05mm)	Diámetro (±0,05mm)	Promedio (±0,25mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )
CB13	20,30	203,00	101,08	101,25	8051,56	150,4	18,7	191,19
	20,30		101,23					
	20,30		100,95					
	-		101,31					
CB14	20,35	203,33	101,04	101,00	8011,85	164,4	20,5	209,45
	20,30		101,07					
	20,35		100,93					
	-		100,95					
CB15	20,40	203,50	101,12	101,00	8011,85	153,4	19,4	198,33
	20,30		101,09					
	20,35		101,08					
	-		101,07					
CB16	20,30	203,17	101,00	101,00	8011,85	116,9	14,6	148,44
	20,30		101,15					
	20,35		101,11					
	-		101,13					
CB17	20,30	203,17	101,20	101,00	8011,85	146,9	18,3	186,70
	20,35		101,07					
	20,30		101,15					
	-		101,05					
CB18	20,30	203,17	101,04	101,25	8051,56	125,8	15,7	159,97
	20,35		101,21					
	20,30		101,10					
	-		101,22					

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

<b>Cuadro 75. Resistencia de cilindros de concreto base fallados a 14 días.</b>								
Muestra	Altura (±0,05cm)	Promedio (±0,05mm)	Diámetro (±0,05mm)	Promedio (±0,25mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )
CB7	20,3	203,00	101,12	101,00	8011,85	222,2	27,7	283,00
	20,3		101,03					
	20,3		100,92					
	-		101,00					
CB8	20,35	203,83	101,02	101,00	8011,85	221,1	27,6	281,47
	20,4		101,10					
	20,4		100,95					
	-		100,91					
CB9	20,3	203,00	100,81	101,00	8011,85	220,4	27,6	281,17
	20,3		100,99					
	20,3		100,93					
	-		100,84					
CB10	20,35	203,67	101,16	101,00	8011,85	201,9	25,2	256,58
	20,35		101,16					
	20,4		101,09					
	-		101,06					
CB11	20,35	203,83	101,21	101,00	8011,85	217,2	27,1	276,07
	20,4		101,04					
	20,4		101,05					
	-		101,16					
CB12	20,3	203,67	101,23	101,25	8051,56	225,8	28,1	286,37
	20,4		101,12					
	20,4		101,29					
	-		100,95					

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

<b>Cuadro 76. Resistencia de cilindros de concreto base fallados a 28 días.</b>								
Muestra	Altura (±0,05cm)	Promedio (±0,05mm)	Diámetro (±0,05mm)	Promedio (±0,25mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )
CB1	20,35	203,33	101,28	101,25	8051,56	214,4	26,7	272,50
	20,30		101,03					
	20,35		101,12					
	-		101,09					
CB2	20,40	203,50	101,12	101,25	8051,56	233,7	29,1	296,98
	20,35		101,05					
	20,30		101,22					
	-		101,15					
CB3	20,35	203,83	101,20	101,25	8051,56	234,4	29,2	297,80
	20,40		101,12					
	20,40		101,19					
	-		101,06					
CB4	20,40	203,33	101,32	101,25	8051,56	228,5	28,5	290,35
	20,30		100,95					
	20,30		101,08					
	-		101,18					
CB5	20,30	203,67	101,24	101,25	8051,56	213,2	26,5	270,35
	20,40		101,13					
	20,40		101,13					
	-		101,20					
CB6	20,40	203,83	101,00	101,00	8011,85	227,1	28,3	288,51
	20,40		101,10					
	20,35		101,17					
	-		101,04					

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

Nota: El gráfico de la resistencia del Concreto Base se encuentra en el apartado R6, junto con los resultados estadísticos (Gráfico 4).

## Fallados a 7 días



Figura R13. Cilindro de concreto base. Identificación: CB13.  
Edad: 7 días.  
Fuente: Elaboración propia.

Observación sobre Figura R13: Agrietamiento vertical completo y abultamiento en el centro, no hay desprendimiento en los bordes.



Figura R14. Cilindro de concreto base. Identificación: CB14.  
Edad: 7 días.  
Fuente: Elaboración propia.

Observación sobre Figura R14: Agrietamientos verticales completos ligeramente inclinados a lo largo de toda la superficie del cilindro y algunos desprendimientos en los bordes del cilindro y algunas grietas verticales cortas (sin atravesar completamente hasta el otro extremo).



Figura R15. Cilindro de concreto base. Identificación: CB15.  
Edad: 7 días.  
Fuente: Elaboración propia.

Observación sobre Figura R15: Agrietamientos verticales completos con cierto grado de inclinación y desprendimiento de la superficie en la sección lateral, con abultamiento y desprendimiento de material en los bordes de la cara superior.



Figura R16. Cilindro de concreto base. Identificación: CB16.  
Edad: 7 días.  
Fuente: Elaboración propia.

Observación sobre Figura R16: Agrietamientos verticales completos, ligero abultamiento en la zona superior del cilindro. Agrietamientos cortos en diferentes secciones de la superficie, la mayoría de estos verticales, otros diagonales y otros en forma de "zic zac".



Figura R17. Cilindro de concreto base. Identificación: CB17.  
Edad: 7 días.  
Fuente: Elaboración propia.

Observación sobre Figura R17: Grietas verticales cortas y una grieta corta. Ligero desprendimiento de los bordes de la cara superior.



Figura R18. Cilindro de concreto base. Identificación: CB18.  
Edad: 7 días.  
Fuente: Elaboración propia.

Observación sobre Figura R18: Agrietamiento vertical y desprendimiento de capas superficiales. Ligero abultamiento en sección superior del cilindro.

#### Fallados a 14 días



Figura R19. Cilindro de concreto base. Identificación: CB7.  
Edad: 14 días.  
Fuente: Elaboración propia.

Observación sobre Figura R19: Agrietamientos verticales y desprendimiento de secciones superficiales, grietas cortas en los bordes de la cara superior con un ligero hinchamiento en esta sección.



Figura R20. Cilindro de concreto base. Identificación: CB8.  
Edad: 14 días.  
Fuente: Elaboración propia.

Observación sobre Figura R20: Agrietamiento vertical, abultamiento en sección superior con desprendimiento de sección superficial. Grietas cortas diagonales y verticales.



Figura R21. Cilindro de concreto base. Identificación: CB9.  
Edad: 14 días.  
Fuente: Elaboración propia.

Observación sobre Figura R21: Agrietamientos verticales completos, algunas grietas cortas y desprendimiento de bordes de la cara inferior del cilindro.



Figura R23. Cilindro de concreto base. Identificación: CB11.  
Edad: 14 días.  
Fuente: Elaboración propia.

Observación sobre Figura R23: Abultamiento en sección superior, con agrietamientos verticales completos, desprendimiento de bordes en la cara superior.



Figura R22. Cilindro de concreto base. Identificación: CB10.  
Edad: 14 días.  
Fuente: Elaboración propia.

Observación sobre Figura R22: Agrietamientos verticales y desprendimiento de secciones superficiales. Grietas cortas en la sección media del cilindro.



Figura R24. Cilindro de concreto base. Identificación: CB12.  
Edad: 14 días.  
Fuente: Elaboración propia.

Observación sobre Figura R24: Agrietamientos verticales completos y ligero hinchamiento en sección media.

## Fallados a 28 días



Figura R25. Cilindro de concreto base. Identificación: CB1.  
Edad: 28 días.  
Fuente: Elaboración propia.

Observación sobre Figura R25: Agrietamientos verticales completos y cruzados, hinchamiento en sección superior y desprendimiento de secciones superficiales, así como también de los bordes de la cara superior.



Figura R27. Cilindro de concreto base. Identificación: CB2.  
Edad: 28 días.  
Fuente: Elaboración propia.

Observación sobre figuras R26 y R27: Agrietamientos verticales completos y cruzados, ligero hinchamiento en sección media. Agrietamientos en forma de "V", grietas verticales cortas y desprendimiento de bordes en la cara superior.



Figura R26. Cilindro de concreto base. Identificación: CB2.  
Edad: 28 días.  
Fuente: Elaboración propia.



Figura R28. Cilindro de concreto base. Identificación: CB3.  
Edad: 28 días.  
Fuente: Elaboración propia.



Figura R29. Cilindro de concreto base. Identificación: CB3.  
Edad: 28 días.  
Fuente: Elaboración propia.

Observación sobre figuras R28 y R29: Agrietamientos verticales, desprendimiento de los bordes de la cara superior. Grietas cortas en distintos lugares de la superficie. Desprendimiento de secciones superficiales.



Figura R30. Cilindro de concreto base. Identificación: CB4.  
Edad: 28 días.  
Fuente: Elaboración propia.

Observación sobre Figura R30: Agrietamientos verticales completos y desprendimiento de secciones superficiales.



Figura R31. Cilindro de concreto base. Identificación: CB5.  
Edad: 28 días.  
Fuente: Elaboración propia.



Figura R32. Cilindro de concreto base. Identificación: CB5.  
Edad: 28 días.  
Fuente: Elaboración propia.

Observación sobre figuras R31 y R32: Agrietamientos verticales completos y cortos, desprendimiento de secciones de la superficie, ligero hinchamiento en la sección media del cilindro.



Observación sobre Figura R33: Agrietamientos verticales completos y ligero hinchamiento en la sección inferior. Grietas verticales cortas en sección media.

Figura R33. Cilindro de concreto base. Identificación: CB6.  
Edad: 28 días.  
Fuente: Elaboración propia.

## Concreto con limadura

Del Concreto con Limadura se tienen 6 cilindros fallados a cada edad y 2 adicionales a los 28 días, los cuales se magnetizaron antes de fallarse. A cada uno se les tomaron las medidas de altura y diámetro como lo especifica la norma. Al igual que con el Concreto Base, la resistencia se reporta en MPa y kg/cm<sup>2</sup>.

<b>Cuadro 77. Resistencia de cilindros de concreto con limadura fallados a 7 días.</b>								
Muestra	Altura (±0,05cm)	Promedio (±0,05mm)	Diámetro (±0,05mm)	Promedio (±0,25mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )
CL1	20,00	20,02	100,08	100,25	7893,30	184,3	23,3	237,50
	20,05		100,57					
	20,00		100,47					
			100,28					
CL2	20,00	20,03	100,46	100,25	7893,30	193,7	24,5	250,15
	20,00		100,30					
	20,10		100,13					
			100,46					
CL3	20,00	20,07	100,52	100,50	7932,72	183,7	23,2	236,79
	20,10		100,23					
	20,10		100,42					
			100,42					
CL4	20,10	20,07	100,29	100,50	7932,72	206,5	26,1	266,17
	20,00		100,43					
	20,10		100,40					
			100,50					
CL5	20,10	20,05	100,01	100,25	7893,30	159,8	20,2	205,88
	20,00		100,84					
	20,05		100,32					
			100,30					
CL6	20,00	20,02	100,11	100,50	7932,72	212,4	26,8	273,72
	20,05		100,61					
	20,00		100,33					
			100,52					

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

Nota: El gráfico de la resistencia del Concreto con Limadura se encuentra en el apartado R6 (Gráfico 8).

**Cuadro 78. Resistencia de cilindros de concreto con limadura fallados a 14 días.**

Muestra	Altura (±0,05cm)	Promedio (±0,05mm)	Diámetro (±0,05mm)	Promedio (±0,25mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )
CL7	20,00	20,00	100,02	100,25	7893,30	236,0	29,9	304,63
	20,00		100,53					
	20,00		100,20					
			100,59					
CL8	20,10	20,03	100,02	100,25	7893,30	240,4	30,5	310,96
	20,00		100,26					
	20,00		100,32					
			100,18					
CL9	20,00	19,98	99,79	100,25	7893,30	244,1	30,9	315,14
	20,00		100,59					
	19,95		100,40					
			100,30					
CL10	19,95	19,98	100,65	100,25	7893,30	219,5	27,8	283,51
	20,00		99,66					
	20,00		100,22					
			100,48					
CL11	20,00	20,00	100,48	100,25	7893,30	236,8	30,0	305,75
	20,00		100,01					
	20,00		100,40					
			100,40					
CL12	20,00	19,65	100,08	100,25	7893,30	246,6	31,1	317,69
	19,00		100,58					
	19,95		100,41					
			100,31					

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

**Cuadro 79. Resistencia de cilindros de concreto con limadura fallados a 28 días.**

Muestra	Altura (±0,05cm)	Promedio (±0,05mm)	Diámetro (±0,05mm)	Promedio (±0,25mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )
CL13	20,00	19,83	100,16	100,25	7893,30	290,3	36,7	374,01
	19,50		100,31					
	20,00		100,64					
	-		99,96					
CL14	19,00	19,67	100,62	100,25	7893,30	271,8	34,4	350,95
	20,00		99,94					
	20,00		100,34					
	-		100,29					
CL15	20,00	19,50	99,86	100,25	7893,30	280,6	35,5	362,27
	19,50		100,66					
	19,00		100,28					
	-		100,43					
CL16	20,00	20,00	101,03	100,25	7893,30	279,1	35,3	359,72
	20,00		99,76					
	20,00		100,47					
	-		100,21					
CL17	20,00	19,83	99,99	100,25	7893,30	274,1	34,7	354,01
	19,50		100,48					
	20,00		100,26					
	-		100,45					
CL18	20,00	19,67	100,39	100,50	7932,72	282,3	35,7	363,80
	19,50		100,11					
	19,50		100,67					
	-		100,34					
<b>Cilindros magnetizados fallados a 28 días</b>								
CL19	19,00	19,83	100,18	100,25	7893,30	239,2	30,3	308,81
	20,00		100,18					
	20,50		100,55					
	-		100,10					
CL20	19,50	19,33	100,02	100,25	7893,30	262,3	33,3	339,32
	19,00		100,32					
	19,50		100,45					
	-		100,03					

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

## Fallados a 7 días



Figura R34. Cilindro de concreto con limadura. Identificación: CL1. Edad: 7 días.  
Fuente: Elaboración propia.

Observación sobre Figura R34: Agrietamientos verticales completos y desprendimiento de bordes en capa superior. No hay rastro de herrumbre.



Figura R36. Cilindro de concreto con limadura. Identificación: CL3. Edad: 7 días.  
Fuente: Elaboración propia.

Observación sobre Figura R36: Agrietamientos verticales completos y desprendimiento de los bordes en la cara superior. Algunas grietas cortas en la sección media del cilindro. No hay rastro de herrumbre.



Figura R35. Cilindro de concreto con limadura. Identificación: CL2. Edad: 7 días. Observación: Grietas verticales.  
Fuente: Elaboración propia.

Observación sobre Figura R35: Grietas verticales completas y cortas, desprendimiento de bordes de la capa superior. No hay rastro de herrumbre.



Figura R37. Cilindro de concreto con limadura. Identificación: CL4. Edad: 7 días.  
Fuente: Elaboración propia.

Observación sobre Figura R37: Grietas verticales completas y desprendimiento de bordes de la cara superior. Algunas grietas con cierto grado de inclinación. No hay rastro de herrumbre.



Figura R38. Cilindro de concreto con limadura. Identificación: CL5. Edad: 7 días.  
Fuente: Elaboración propia.

Observación sobre Figura R38: Agrietamientos verticales completos y algunos cortos. Desprendimiento de capas superficiales en la sección superior. No hay rastro de herrumbre.



Figura R39. Cilindro de concreto con limadura. Identificación: CL6. Edad: 7 días.  
Fuente: Elaboración propia.

Observación sobre Figura R39: Grietas verticales completas en cierto grado de inclinación y desprendimiento de bordes de la cara superior. Grietas cortas en la sección media y superior del cilindro. No hay rastro de herrumbre.

#### Fallados a 14 días



Figura R40. Cilindro de concreto con limadura. Identificación: CL7. Edad: 14 días.  
Fuente: Elaboración propia.

Observación sobre Figura R40: Agrietamientos verticales completos y ligero hinchamiento en la sección superior. Desprendimiento de bordes en la cara superior y grietas cortas en la sección superior. No hay rastro de herrumbre.



Figura R41. Cilindro de concreto con limadura. Identificación: CL8. Edad: 14 días.  
Fuente: Elaboración propia.

Observación sobre Figura R41: Agrietamientos verticales completos con un grado de inclinación, grietas cortas en la sección superior del cilindro. No hay rastro de herrumbre.



Figura R42. Cilindro de concreto con limadura de acero. Identificación: CL9. Edad: 14 días. Fuente: Elaboración propia.

Observación sobre Figura R42: Agrietamiento en forma de "U". Grietas cortas en diferentes secciones del cilindro, ninguna completa. No hay rastro de herrumbre.



Figura R44. Cilindro de concreto con limadura de acero. Identificación: CL11. Edad: 14 días. Fuente: Elaboración propia.

Observación sobre Figura R44: Agrietamientos verticales completos y agrietamientos cortos en la sección superior del cilindro. Desprendimiento de los bordes en la cara superior. No hay rastro de herrumbre.



Figura R43. Cilindro de concreto con limadura de acero. Identificación: CL10. Edad: 14 días. Fuente: Elaboración propia.

Observación sobre Figura R43: Agrietamientos verticales cortos ninguno completo. Desprendimiento de secciones superficiales y bordes de la cara superior. No hay rastro de herrumbre.



Figura R45. Cilindro de concreto con limadura de acero. Identificación: CL12. Edad: 14 días. Fuente: Elaboración propia.

Observación sobre Figura R45: Ligero hinchamiento en sección superior y grietas verticales cortas. Desprendimiento de capas superficiales del cilindro. No hay rastro de herrumbre.

## Fallados a 28 días



Figura R46. Cilindro de concreto con limadura. Identificación: CL13. Edad: 28 días.  
Fuente: Elaboración propia.

Observación sobre Figura R46: Agrietamientos verticales completos y desprendimiento de los bordes de la cara superior. No hay rastro de herrumbre.



Figura R48. Cilindro de concreto con limadura. Identificación: CL14. Edad: 28 días.  
Fuente: Elaboración propia.

Observación sobre figuras R47 y R48: Ninguna grieta atravesó hasta la parte inferior completamente, agrietamiento en forma de "V" y en forma de "U", respectivamente. No hay rastro de herrumbre.



Figura R47. Cilindro de concreto con limadura. Identificación: CL14. Edad: 28 días.  
Fuente: Elaboración propia.



Figura R49. Cilindro de concreto con limadura de acero. Identificación: CL15. Edad: 28 días.  
Fuente: Elaboración propia.

Observación sobre Figura R49: Agrietamientos verticales, pero ninguno atraviesa completamente hasta la cara inferior. Hinchamiento en la sección superior. No hay rastro de herrumbre.



Figura R50. Cilindro de concreto con limadura. Identificación: CL16. Edad: 28 días.  
Fuente: Elaboración propia.

Observación sobre Figura R50: Agrietamientos verticales, pero ninguno atraviesa completamente hasta la cara inferior. Desprendimiento de bordes de la cara superior.



Figura R52. Cilindro de concreto con limadura. Identificación: CL18. Edad: 28 días.  
Fuente: Elaboración propia.

Observación sobre Figura R52: Agrietamientos verticales completos y desprendimientos superficiales en la sección superior. No hay rastro de herrumbre.



Figura R51. Cilindro de concreto con limadura. Identificación: CL17. Edad: 28 días.  
Fuente: Elaboración propia.

Observación sobre Figura R51: Agrietamientos verticales completos, desprendimientos superficiales en la sección superior. No hay rastro de herrumbre.



Figura R53. Cilindro de concreto con limadura. Identificación: CL19. Edad: 28 días.  
Fuente: Elaboración propia.

Observación sobre Figura R53: Agrietamientos verticales y desprendimiento de los bordes de la cara superior. No hay rastro de herrumbre.



Observación sobre Figura R54: Agrietamientos verticales, pero ninguno atraviesa completamente hasta la cara inferior. Ligeró hinchamiento en la sección superior y desprendimiento de los bordes en la cara superior del cilindro.

Figura R54. Cilindro de concreto con limadura de acero.  
Identificación: CL20. Edad: 28 días.  
Fuente: Elaboración propia.

## Concreto con viruta

Del Concreto con Viruta se tienen 6 cilindros fallados a cada edad y 2 adicionales a los 28 días, los cuales se magnetizaron antes de fallarse. A cada uno se les tomaron las medidas de altura y diámetro como lo especifica la norma. Al igual que con el Concreto Base, la resistencia se reporta en MPa y kg/cm<sup>2</sup>.

<b>Cuadro 80. Resistencia de cilindros de concreto con viruta fallados a 7 días.</b>								
Muestra	Altura (±0,05cm)	Promedio (±0,05mm)	Diámetro (±0,05mm)	Promedio (±0,25mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )
CV2	19,50	19,33	100,82	100,25	7893,30	87,9	11,2	113,75
	19,50		99,66					
	19,00		100,27					
			99,94					
CV4	20,30	23,33	101,23	101,00	8011,85	67,5	8,4	85,70
	20,35		100,97					
	20,35		101,04					
			101,07					
CV5	20,25	22,83	100,90	101,00	8011,85	76,6	9,5	97,33
	20,30		101,31					
	20,30		101,14					
			101,11					
CV7	20,35	23,17	101,00	101,00	8011,85	74,8	9,3	95,29
	20,30		101,15					
	20,30		101,04					
			100,91					
CV8	20,20	22,00	100,94	101,00	8011,85	72,9	9,1	92,74
	20,20		101,05					
	20,20		100,92					
			100,93					
CV10	20,20	22,33	101,20	101,00	8011,85	65,6	8,2	83,45
	20,25		101,00					
	20,25		101,10					
			100,75					

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

Nota: El gráfico de la resistencia del Concreto con Viruta se encuentra en el apartado R6 (Gráfico 12).

<b>Cuadro 81. Resistencia de cilindros de concreto con viruta fallados a 14 días.</b>								
Muestra	Altura (±0,05cm)	Promedio (±0,05mm)	Diámetro (±0,05mm)	Promedio (±0,25mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )
CV11	20,30	20,25	101,11	101,00	8011,85	82,2	10,2	104,47
	20,20		101,05					
	20,25		101,11					
			101,01					
CV12	20,30	20,32	101,24	101,00	8011,85	88	11,0	111,81
	20,30		100,88					
	20,35		101,06					
			101,06					
CV13	20,30	20,28	100,96	101,00	8011,85	81,2	10,1	103,24
	20,30		101,30					
	20,25		100,95					
			101,22					
CV14	20,40	20,38	101,35	101,25	8051,56	92,1	11,5	116,81
	20,35		101,09					
	20,40		101,12					
			101,04					
CV15	20,35	20,33	101,10	101,00	8011,85	71,1	8,9	90,39
	20,35		101,05					
	20,30		101,00					
			101,19					
CV16	20,30	20,33	100,85	101,00	8011,85	81,9	10,2	104,26
	20,40		100,99					
	20,30		101,10					
			100,92					

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

<b>Cuadro 82. Resistencia de cilindros de concreto con viruta fallados a 28 días.</b>								
Muestra	Altura (±0,05cm)	Promedio (±0,05mm)	Diámetro (±0,05mm)	Promedio (±0,25mm)	Área (mm <sup>2</sup> )	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )
CV1	20,00	20,00	99,90	100,25	7893,30	124,3	15,7	160,58
	20,00		100,80					
	20,00		100,48					
			99,99					
CV19	20,20	20,27	101,10	101,00	8011,85	82,9	10,3	105,39
	20,30		101,12					
	20,30		101,03					
			100,99					
CV20	20,35	20,37	101,21	101,25	8051,56	85,7	10,7	108,75
	20,40		101,08					
	20,35		101,21					
			101,12					
CV21	20,30	20,27	100,93	101,00	8011,85	92,5	11,5	117,73
	20,25		101,03					
	20,25		100,81					
			101,18					
CV22	20,30	20,25	100,88	101,00	8011,85	74,6	9,3	94,88
	20,20		101,33					
	20,25		100,96					
			101,13					
CV23	20,25	20,27	101,22	101,00	8011,85	84,7	10,6	107,63
	20,25		100,96					
	20,30		101,21					
			101,07					
<b>Cilindros magnetizados fallados a 28 días</b>								
CV17	20,30	20,30	101,23	101,25	8051,56	98,5	12,3	125,18
	20,30		101,12					
	20,30		101,01					
			101,17					
CV18	20,25	20,23	101,08	101,25	8051,56	102,8	12,8	130,59
	20,25		101,10					
	20,20		101,25					
			101,13					

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

## Fallados a 7 días



Figura R55. Cilindro de concreto con viruta. Identificación: CV2.  
Edad: 7 días.  
Fuente: Elaboración propia.



Figura R57. Cilindro de concreto con viruta. Identificación: CV4.  
Edad: 7 días.  
Fuente: Elaboración propia.



Figura R56. Cilindro de concreto con viruta. Identificación: CV2.  
Edad: 7 días.  
Fuente: Elaboración propia.

Observación sobre figuras R55 y R56: Abultamiento en la sección superior y grietas cortas tanto diagonales, verticales y horizontales. Rastros de herrumbre en alguna de la viruta superficial. Evidencia de oxidación de partículas de acero más expuestas.

Observación sobre Figura R57: Grieta vertical completa. Algunos rastros de herrumbre en la viruta expuesta en la superficie.



Figura R58. Cilindro de concreto con viruta. Identificación: CV5.  
Edad: 7 días.  
Fuente: Elaboración propia.



Figura R59. Cilindro de concreto con viruta. Identificación: CV5.  
Edad: 7 días.  
Fuente: Elaboración propia.



Figura R61. Cilindro de concreto con viruta. Identificación: CV7.  
Edad: 7 días.  
Fuente: Elaboración propia.



Figura R60. Cilindro de concreto con viruta. Identificación: CV5.  
Edad: 7 días. Observación: No hay presencia de marcas de herrumbre a lo interno del cilindro.  
Fuente: Elaboración propia.

Observación sobre figuras R58, R59 y R60: Desprendimiento de secciones superficiales, debido a hinchamiento en sección media del cilindro. Rastro de herrumbre en viruta expuesta en la superficie del cilindro. Falla en forma de "V" a la mitad del cilindro. No hay rastro de herrumbre a lo interno del cilindro.

Observación sobre Figura R61: Ligero hinchamiento en la sección media del cilindro, no hay grietas evidentes. Ligero rastro de herrumbre en la viruta superficial del cilindro.



Figura R62. Cilindro de concreto con viruta. Identificación: CV8.  
Edad: 7 días.  
Fuente: Elaboración propia.

Observación sobre Figura R62: Grieta por expansión de sección transversal y presencia de herrumbre en la viruta superficial.



Figura R63. Cilindro de concreto con viruta. Identificación: CV10. Edad: 7 días.  
Fuente: Elaboración propia.

Observación sobre Figura R63: Pequeño abultamiento en la sección inferior del cilindro. No hay grietas visibles a simple vista.

#### Fallados a 14 días



Figura R64. Cilindro de concreto con viruta. Identificación: CV11. Edad: 14 días.  
Fuente: Elaboración propia.

Observación sobre Figura R64: Abultamiento en sección inferior. No hay desprendimiento de material ni grietas visibles a simple vista. Hay rastro de herrumbre en la viruta superficial.



Figura R65. Cilindro de concreto con viruta. Identificación: CV12. Edad: 14 días.  
Fuente: Elaboración propia.

Observación sobre Figura R65: No hay evidencias de falla notorias en la superficie del cilindro ni desprendimiento de material. Hay rastro de herrumbre en la viruta superficial.



Figura R66. Cilindro de concreto con viruta. Identificación: CV13. Edad: 14 días.  
Fuente: Elaboración propia.

Observación sobre Figura R66: Grietas verticales aparentemente completas y abultamiento en sección media y baja. Hay rastro de partículas de viruta herrumbrosa en la superficie, no hay diferencia en la cantidad de herrumbre visible a los 7 días.



Figura R68. Cilindro de concreto con viruta de acero. Identificación: CV15. Edad: 14 días.  
Fuente: Elaboración propia.

Observación sobre Figura R68: Ligero abultamiento en la sección media del cilindro. No hay grietas visibles a simple vista. Los rastros de herrumbre se mantienen en cantidad similares a los cilindros fallados a 7 días.



Figura R67. Cilindro de concreto con viruta. Identificación: CV14. Edad: 14 días.  
Fuente: Elaboración propia.

Observación sobre Figura R67: Fallado, pero sin manifestaciones notorias de agrietamientos ni desprendimiento de material. Con rastros de herrumbre en la superficie.



Figura R69. Cilindro de concreto con viruta de acero. Identificación: CV16. Edad: 14 días.  
Fuente: Elaboración propia.

Observación sobre Figura R69: Sin rastros superficiales de falla. Con rastros de herrumbre en la superficie.

### Fallados a 28 días



Figura R70. Cilindro de concreto con viruta de acero.  
Identificación: CV1. Edad: 28 días.  
Fuente: Elaboración propia.

Observación sobre Figura R70: Fallado sin marcas superficiales notorias y con marcas de herrumbre en la superficie.



Figura R72. Cilindro de concreto con viruta de acero.  
Identificación: CV20. Edad: 28 días.  
Fuente: Elaboración propia.

Observación sobre Figura R72: Desprendimiento de los bordes de la cara inferior, sin grietas notorias a simple vista y con herrumbre en la viruta de la superficie.



Figura R71. Cilindro de concreto con viruta de acero.  
Identificación: CV19. Edad: 28 días.  
Fuente: Elaboración propia.

Observación sobre Figura R71: Fallado sin marcas superficiales notorias y con marcas de herrumbre en la superficie.



Figura R73. Cilindro de concreto con viruta de acero.  
Identificación: CV21. Edad: 28 días.  
Fuente: Elaboración propia.

Observación sobre Figura R73: Sin marcas superficiales de falla. Con rastros de herrumbre en la superficie.



Figura R74. Cilindro de concreto con viruta de acero. Identificación: CV22. Edad: 28 días. Fuente: Elaboración propia.



Figura R75. Cilindro de concreto con viruta de acero. Identificación: CV23. Edad: 28 días. Fuente: Elaboración propia.

Observación sobre Figura R74: Desprendimiento de los bordes de la cara inferior, poco herrumbre superficial a diferencia de los otros cilindros a 28 días.

Observación sobre Figura R75: Sin marcas superficiales de falla. Con rastros de herrumbre en la superficie.

Cuadro 83. Tipo de falla de los distintos cilindros.								
Concreto	Cilindro	Tipo de falla	Concreto	Cilindro	Tipo de falla	Concreto	Cilindro	Tipo de falla
Base	CB13	Type 3	Con limadura	CL1	Type 3	Con Viruta	CV2	-
	CB14	Type 3		CL2	Type 3/Type 5		CV4	Type 3
	CB15	Type 3		CL3	Type 3		CV5	Type 2
	CB16	Type 3		CL4	Type 3/Type 5		CV7	-
	CB17	Type 3		CL5	Type 2		CV8	Type 3
	CB18	Type 3		CL6	Type 3/Type 4		CV10	-
	CB7	Type 3		CL7	Type 3/Type 5		CV11	-
	CB8	Type 3		CL8	Type 4		CV12	-
	CB9	Type 3		CL9	Type 3		CV13	Type 3/Type 4
	CB10	Type 3		CL10	Type 3/Type 5		CV14	-
	CB11	Type 3		CL11	Type 3		CV15	-
	CB12	Type 3		CL12	Type 3		CV16	-
	CB1	Type 3		CL13	Type 3/Type 5		CV1	-
	CB2	Type 2		CL14	-		CV19	-
CB3	Type 3	CL15		Type 5	CV20	Type 6		
CB4	Type 3	CL16		Type 6	CV21	-		
CB5	Type 2	CL17		Type 3/Type 6	CV22	Type 6		
CB6	Type 3	CL18		Type 3/Type 5	CV23	-		
		CL19		Type 3/Type 5	CV17	-		
		CL20		Type 3/Type 5	CV18	-		

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

Durante el proceso de moldeo hubo algunas acciones que no eran parte del proceso establecido por la norma. En el siguiente cuadro se muestran dichas acciones y qué espécimen o especímenes fueron afectados en cada una. Estas se toman en cuenta en caso de que haya mucha varianza entre las resistencias de los cilindros.

<b>Cuadro 84. Observaciones del proceso de moldeo.</b>	
Acción	Cilindros
Se agregó concreto adicional luego de los 25 envarillados y los 12 golpes con el mazo para poder enrazar.	CL4, CL6, CL12, CL13, CL14, CL15, CL16, CL17, CL18, CL19, CB1, CB6, CB7, CB8, CB9, CB11, CB13, CB14, CB15, CB16, CB17, CB18
Se dieron 27 envarillados en la segunda capa.	CL7
Se dificultó el envarillado, debido a la composición gruesa de la mezcla.	Todos los cilindros de CV

Fuente: Elaboración propia.

## R6. Comportamiento estadístico sobre los resultados de resistencia a la compresión.

Se obtuvieron valores estadísticos para observar la normalidad o no de los datos y si cumplen o no con lo especificado en las normas ASTM C39-18, ASTM C670-15 y ACI 214RS-11. Se obtuvo un histograma y un boxplot para cada grupo de datos. También, los valores de desviación estándar, media, varianza y coeficiente de variación.

### Resistencias de Concreto Base

<b>Cuadro 85. Estadística descriptiva para Resistencias de Concreto Base.</b>				
Edad (días)	s (MPa)	v (%)	$\bar{x}$	Cv (%)
7	2,29	5,26	17,9	12,83
14	1,05	1,11	27,2	3,87
28	1,17	1,37	28,0	4,17

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

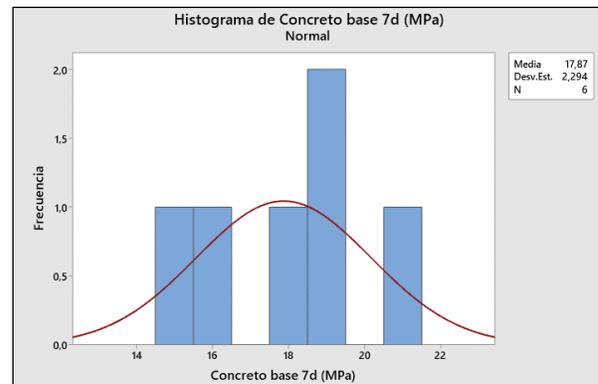


Figura R76. Histograma para las resistencias a 7 días del concreto base.

Fuente: Elaboración propia a partir del software Minitab 19.

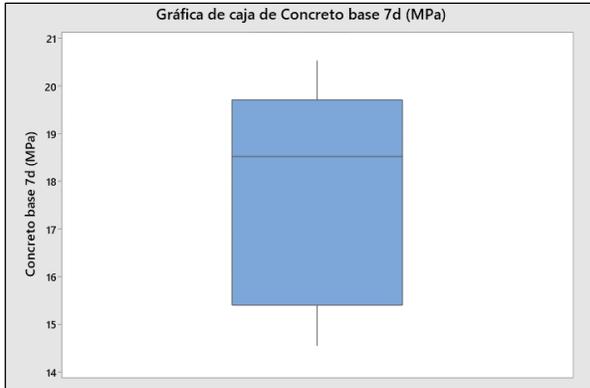


Figura R77. Boxplot para las resistencias a 7 días del concreto base.  
Fuente: Elaboración propia a partir del software Minitab 19.

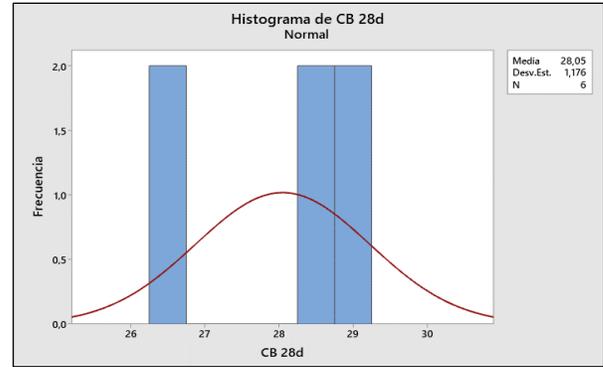


Figura R80. Histograma para las resistencias a 28 días del concreto base.  
Fuente: Elaboración propia a partir del software Minitab 19.

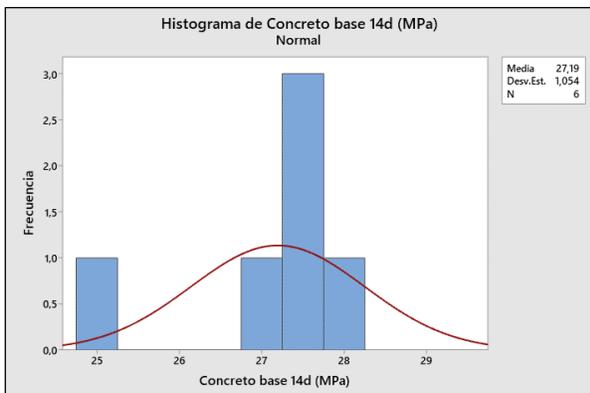


Figura R78. Histograma para las resistencias a 14 días del concreto base.  
Fuente: Elaboración propia a partir del software Minitab 19.

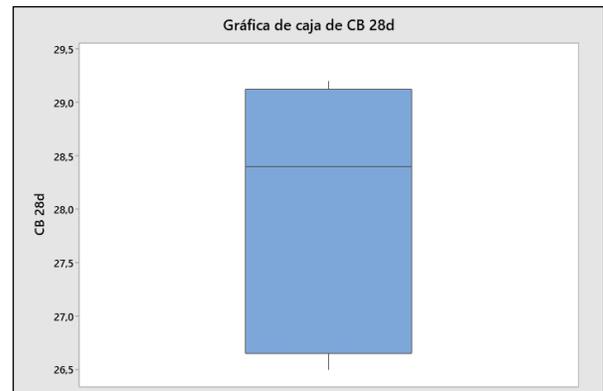


Figura R81. Boxplot para las resistencias a 28 días del concreto base.  
Fuente: Elaboración propia a partir del software Minitab 19.

Se graficó la resistencia del Concreto Base a sus distintas edades.

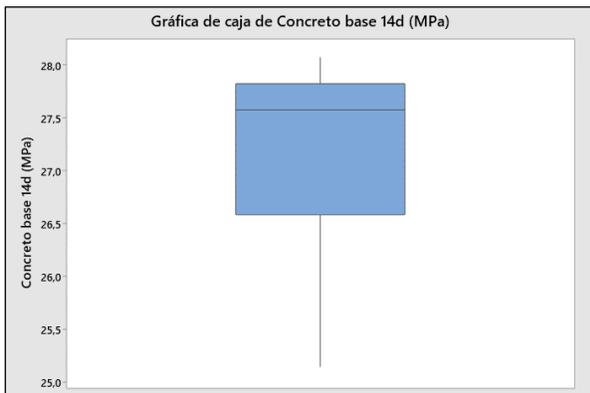
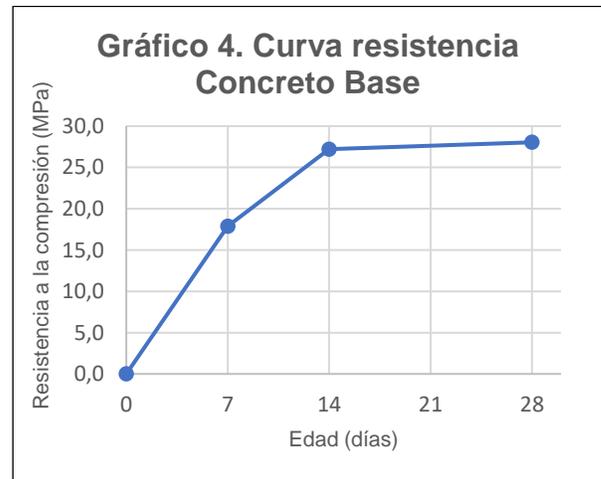


Figura R79. Boxplot para las resistencias a 14 días del concreto base.  
Fuente: Elaboración propia a partir del software Minitab 19.



Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

Los siguientes, son multiplicadores para la desviación estándar o el coeficiente de variación que otorga la norma ASTM C670-15 para los límites aceptables según el número de cilindros realizados.

<b>Cuadro 86. Multiplicadores para el rango aceptable de la desviación estándar según la norma ASTM C670-15.</b>	
Nº cilindros	Factor
2	2,8
3	3,3
4	3,6
5	3,9
6	4,0
7	4,2
8	4,3
9	4,4
10	4,5

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

<b>Cuadro 87. Rango aceptable máximo para la desviación estándar del Concreto Base (norma ASTM C670-15).</b>			
Edad (días)	Tamaño especímenes	Coeficiente de variación según ASTM C39-18 (%)	Rango aceptable
7	100x200	3,2	9,17
14	100x200	3,2	4,21
28	100x200	3,2	4,68

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

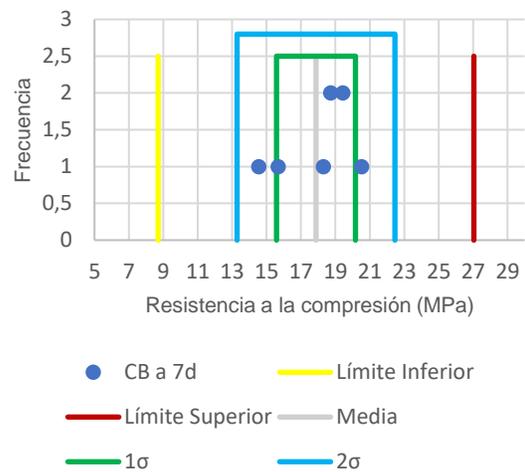
Se estudiaron las resistencias a distintas edades por separado. Comprendiendo la distribución de los datos obtenidos en las fallas a la compresión y observando que se mantengan dentro de los límites de  $2\sigma$  y el rango establecido por la norma ASTM C670-15.

**Cuadro 88. Condiciones de variación de los datos de resistencia a los 7 días del Concreto Base (norma ASTM C39-18).**

Coeficiente de variación de resistencias a 7 días		Coeficiente de variación según ASTM C39-18	Condición
12,83		3,2	No cumple
Límite d2s%		Rango aceptable entre 2 cilindros según ASTM C39-18	Condición
Resistencias (MPa)	Valor d2s%		
20,5 - 14,6	29,13	9,0%	No cumple
20,5 - 15,7	23,62	9,0%	No cumple
20,5 - 18,3	10,86	9,0%	No cumple
20,5 - 18,7	8,72	9,0%	Cumple

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

**Gráfico 5. Límites de rango máximo aceptable para 6 especímenes de Concreto Base fallados a 7 días. ASTM C670-15.**



Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

**Cuadro 89. Condiciones de variación de los datos de resistencia a los 14 días del Concreto Base (norma ASTM C39-18).**

Coeficiente de variación de resistencias a 14 días		Coeficiente de variación según ASTM C39-18	Condición
3,87		3,2	No cumple
Límite d2s%		Rango aceptable entre 2 cilindros según ASTM C39-18	Condición
Resistencias (MPa)	Valor d2s%		
28,1 - 25,2	10,40		
28,1 - 27,1	3,60	9,0%	Cumple

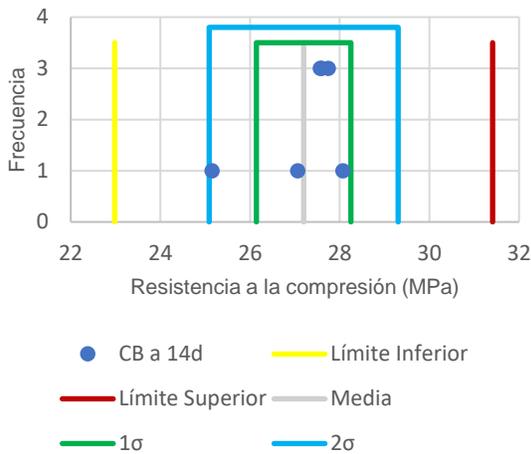
Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

**Cuadro 90. Condiciones de variación de los datos de resistencia a los 28 días del Concreto Base (norma ASTM C39-18).**

Coeficiente de variación de resistencias a 28 días		Coeficiente de variación según ASTM C39-18	Condición
4,17		3,2	No cumple
Límite d2s%		Rango aceptable entre 2 cilindros según ASTM C39-18	Condición
Resistencias (MPa)	Valor d2s%		
29,2 - 26,5	9,22		
29,2 - 26,7	8,50	9,0%	Cumple

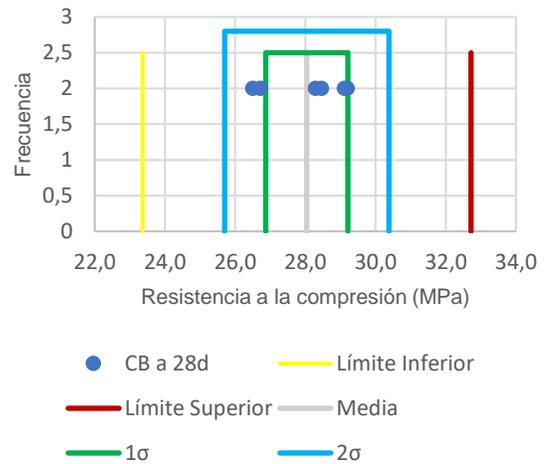
Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

**Gráfico 6. Límites de rango máximo aceptable para 6 especímenes de Concreto Base fallados a 14 días. ASTM C670-15.**



Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

**Gráfico 7. Límites de rango máximo aceptable para 6 especímenes de Concreto Base fallados a 28 días. ASTM C670-15.**



Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

**Cuadro 91. Control del Concreto Base según la Tabla 4.3 del ACI 214RS-11.**

Cv de f'c CB	Condición
4,17	Regular

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

## Resistencias de Concreto con Limadura

Aquí se muestran los resultados estadísticos de los datos obtenidos en las fallas a 7, 14 y 28 días para el concreto con limadura, tanto la estadística descriptiva como la distribución de los datos con sus respectivos límites.

**Cuadro 92. Estadística descriptiva para Resistencias de Concreto con Limadura.**

Edad (días)	s (MPa)	v (%)	$\bar{x}$	Cv (%)
7	2,38	5,68	24,0	9,92
14	1,20	1,44	30,0	4,00
28	0,80	0,63	35,4	2,25

Fuente: Elaboración propia.

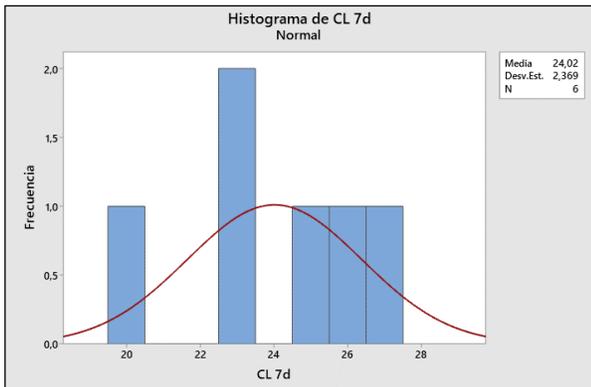


Figura R82. Histograma para las resistencias a 7 días del concreto con limadura.

Fuente: Elaboración propia a partir del software Minitab 19.

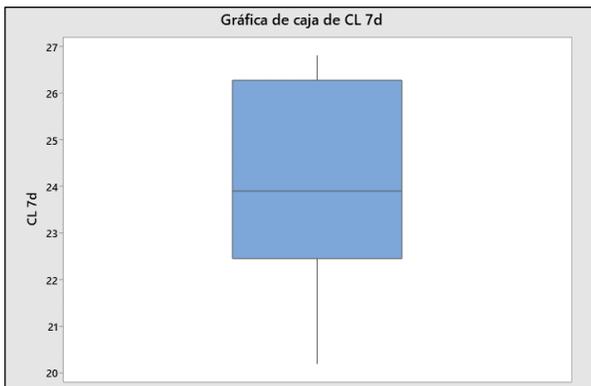


Figura R83. Boxplot para las resistencias a 7 días del concreto con limadura.

Fuente: Elaboración propia a partir del software Minitab 19.

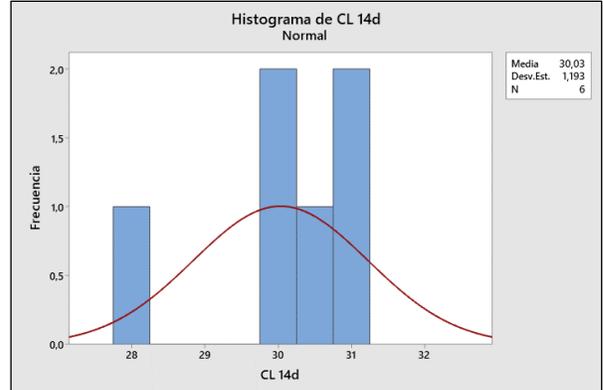


Figura R84. Histograma para las resistencias a 14 días del concreto con limadura.

Fuente: Elaboración propia a partir del software Minitab 19.

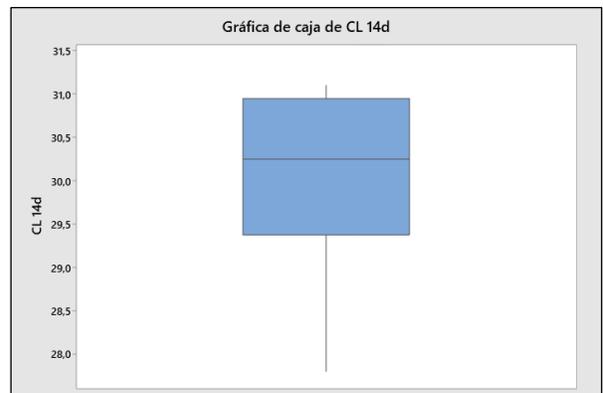


Figura R85. Boxplot para las resistencias a 14 días del concreto con limadura.

Fuente: Elaboración propia a partir del software Minitab 19.

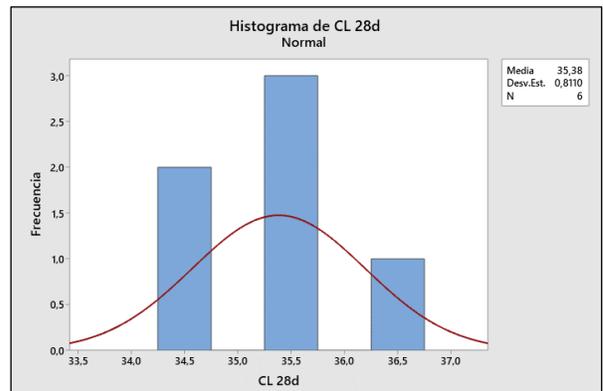


Figura R86. Histograma para las resistencias a 28 días del concreto con limadura.

Fuente: Elaboración propia a partir del software Minitab 19.

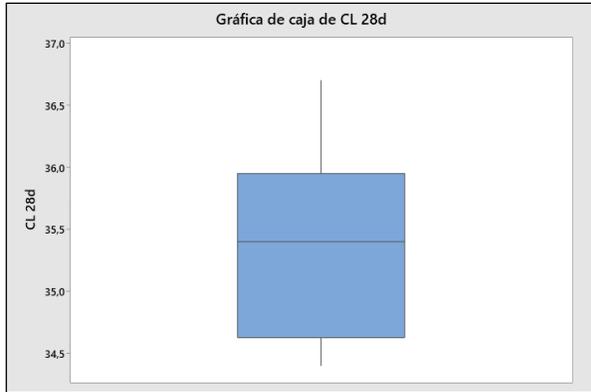
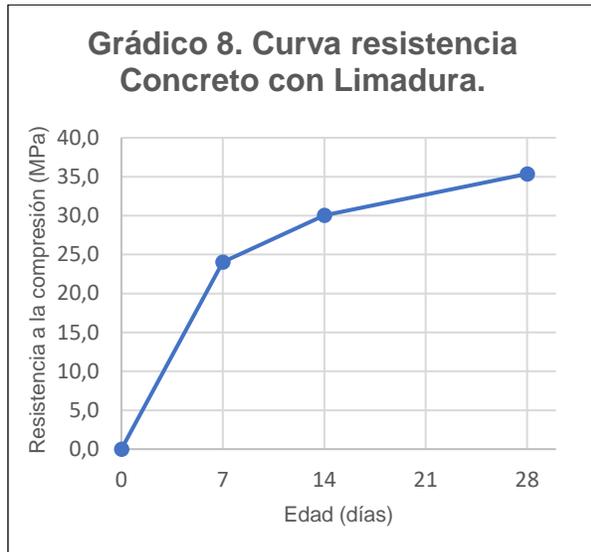


Figura R87. Boxplot para las resistencias a 28 días del concreto con limadura.  
Fuente: Elaboración propia a partir del software Minitab 19.

En el siguiente gráfico no se consideran las resistencias de los cilindros magnetizados.



Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

<b>Cuadro 93. Rango aceptable máximo para la desviación estándar del Concreto con Limadura (norma ASTM C670-15).</b>			
Edad (días)	Tamaño especímenes	Coefficiente de variación (%)	Rango aceptable
7	100x200	3,2	9,53
14	100x200	3,2	4,81
28	100x200	3,2	3,18

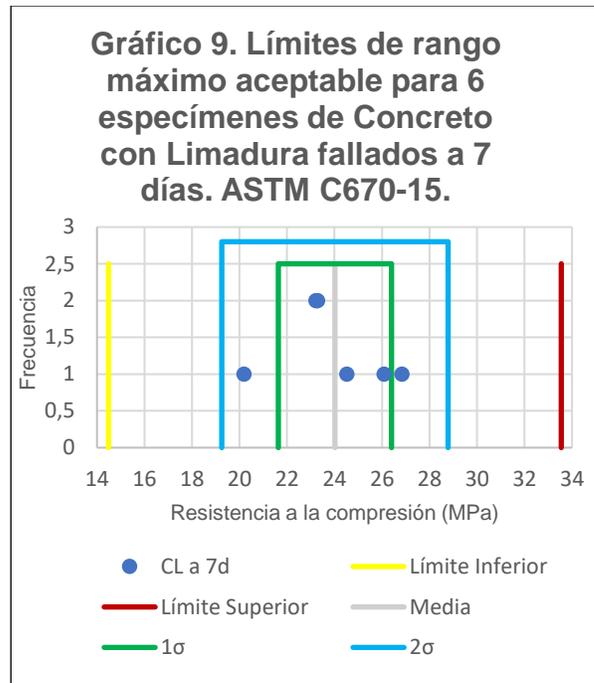
Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

Los datos obtenidos para cada edad se graficaron y analizaron por separado estableciendo los límites para cada uno.

**Cuadro 94. Condiciones de variación de los datos de resistencia a los 7 días del Concreto con Limadura (norma ASTM C39-18).**

Coeficiente de variación de resistencias a 7 días		Coeficiente de variación según ASTM C39-18	Condición
9,92		3,2	No cumple
Límite d2s%		Rango aceptable entre 2 cilindros según ASTM C39-18	Condición
Resistencias (MPa)	Valor d2s%		
26,8 - 20,2	24,79	9,0%	No cumple
26,8 - 23,2	13,49	9,0%	No cumple
26,8 - 23,3	13,23	9,0%	No cumple
26,8 - 24,5	8,61	9,0%	Cumple

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.



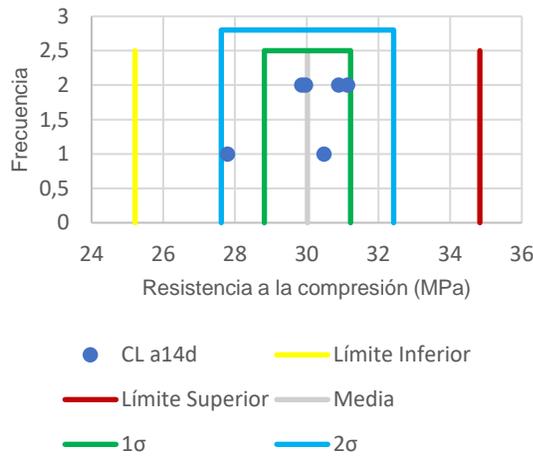
Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

**Cuadro 95. Condiciones de variación de los datos de resistencia a los 14 días del Concreto con Limadura (norma ASTM C39-18).**

Coeficiente de variación de resistencias a 14 días		Coeficiente de variación según ASTM C39-18	Condición
4,00		3,2	No cumple
Límite d2s%		Rango aceptable entre 2 cilindros según ASTM C39-18	Condición
Resistencias (MPa)	Valor d2s%		
31,1 - 27,8	10,76	9,0%	No cumple
31,1 - 29,9	4,11	9,0%	Cumple

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

**Gráfico 10. Límites de rango máximo aceptable para 6 especímenes de Concreto con Limadura fallados a 14 días. ASTM C670-15.**



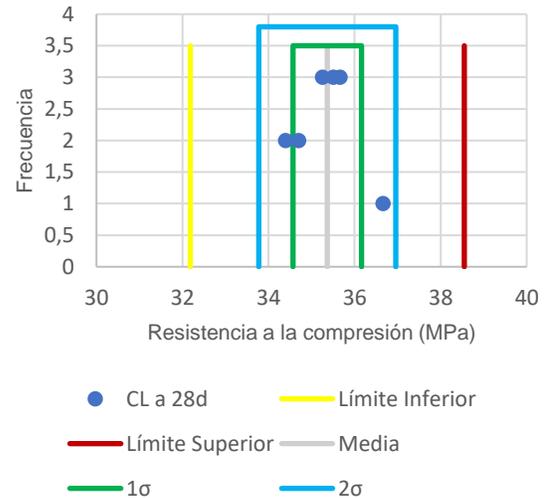
Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

**Cuadro 96. Condiciones de variación de los datos de resistencia a los 28 días del Concreto con Limadura (norma ASTM C39-18).**

Límite d2s%		Rango aceptable entre 2 cilindros según ASTM C39-18	Condición
Resistencias (MPa)	Valor d2s%		
36,7 - 34,4	6,16	9,0%	Cumple

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

**Gráfico 11. Límites de rango máximo aceptable para 6 especímenes de Concreto con Limadura fallados a 28 días. ASTM C670-15.**



Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

**Cuadro 97. Control del Concreto con Limadura según la Tabla 4.3 del ACI 214RS-11.**

Cv de f'c CB	Condición
2,25	Muy bueno

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

**Cuadro 98. Estadística descriptiva para Resistencias de Concreto con Limadura Magnetizado (CL M).**

Condición	s (MPa)	v (%)	$\bar{x}$	Cv (%)
CL M	2,11	4,47	31,8	6,66

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

**Cuadro 99. Comparación de las medias entre el f'c del Concreto con Limadura y los cilindros magnetizados.**

Especímenes	Valor p	Nivel de significancia	Conclusión
Concreto magnetizado fallado a 28 días (CL M)	0,258	0,05	No hay diferencia entre las medias
f'c de Concreto con Limadura			

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

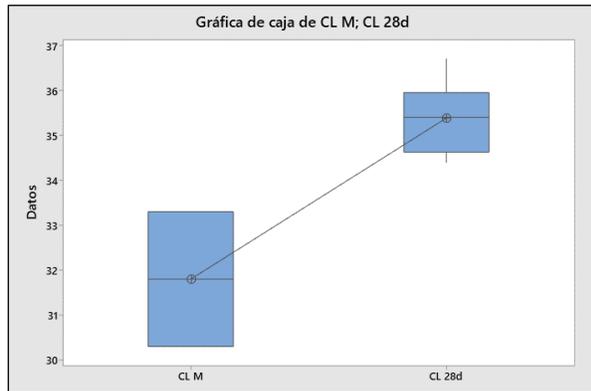


Figura R88. Boxplot para la comparación de la media entre el f'c del concreto con limadura y los cilindros magnetizados. Fuente: Elaboración propia a partir del software Minitab 19.

**Resistencias de Concreto con Viruta**

**Cuadro 100. Estadística descriptiva para Resistencias de Concreto con viruta.**

Edad (días)	s (MPa)	v (%)	$\bar{x}$	Cv (%)
7	1,06	1,12	9,3	11,39
14	0,88	0,77	10,3	8,54
28	2,27	5,13	11,4	19,96

Fuente: Elaboración propia.

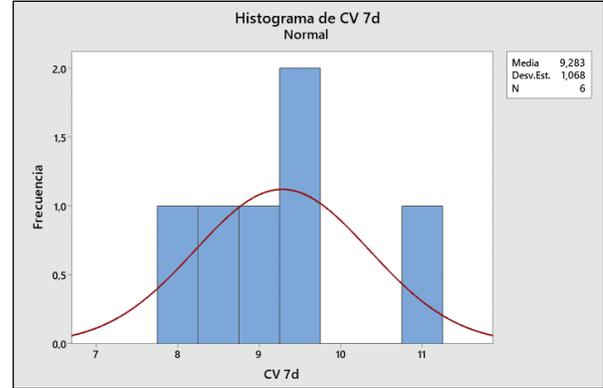


Figura R89. Histograma para las resistencias a 7 días del concreto con viruta. Fuente: Elaboración propia a partir del software Minitab 19.

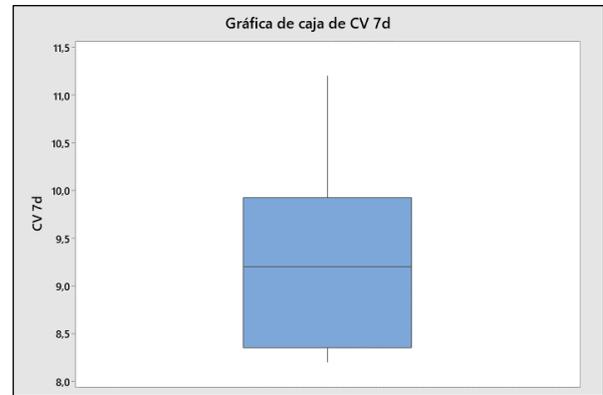


Figura R90. Boxplot para las resistencias a 7 días del concreto con viruta. Fuente: Elaboración propia a partir del software Minitab 19.

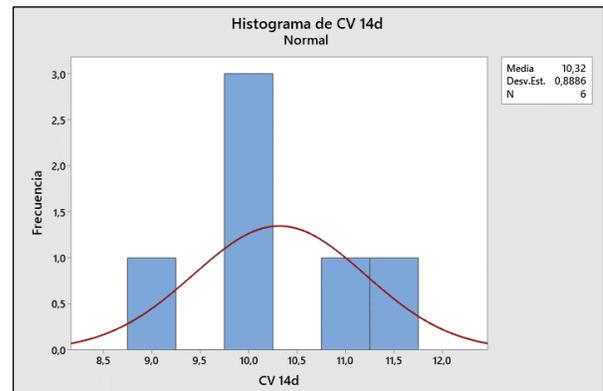


Figura R91. Histograma para las resistencias a 14 días del concreto con viruta. Fuente: Elaboración propia a partir del software Minitab 19.

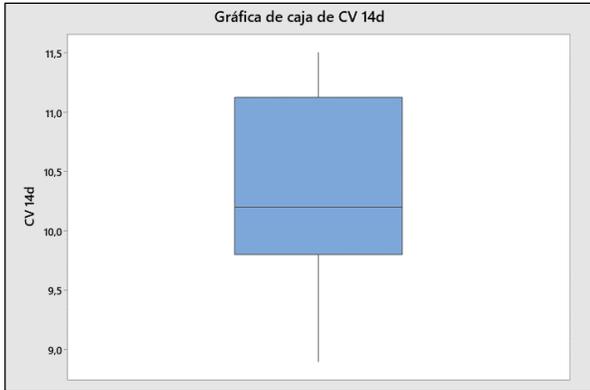


Figura R92. Boxplot para las resistencias a 14 días del concreto con viruta.  
Fuente: Elaboración propia a partir del software Minitab 19.

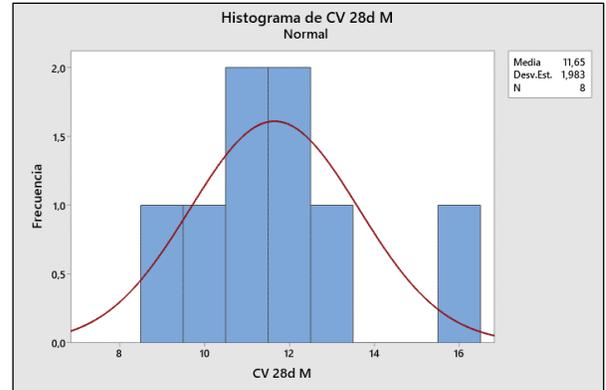


Figura R95. Histograma para las resistencias a 28 días del concreto con viruta incluidos los cilindros magnetizados.  
Fuente: Elaboración propia a partir del software Minitab 19.

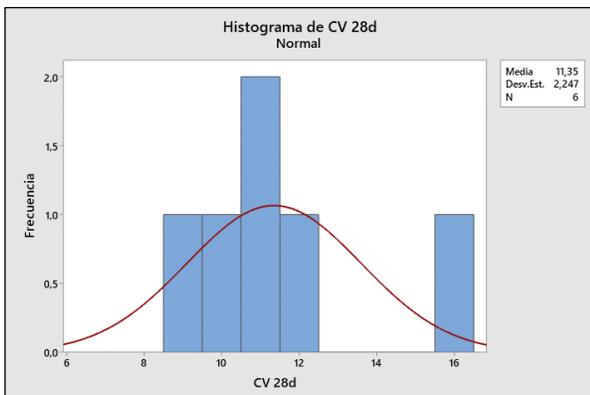


Figura R93. Histograma para las resistencias a 28 días del concreto con viruta.  
Fuente: Elaboración propia a partir del software Minitab 19.

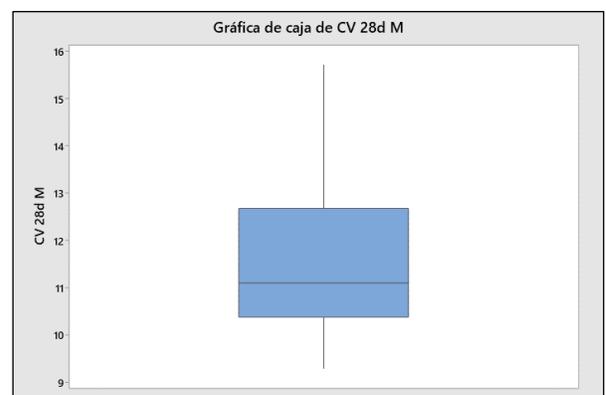


Figura R96. Boxplot para las resistencias a 28 días del concreto con viruta incluidos los cilindros magnetizados.  
Fuente: Elaboración propia a partir del software Minitab 19.

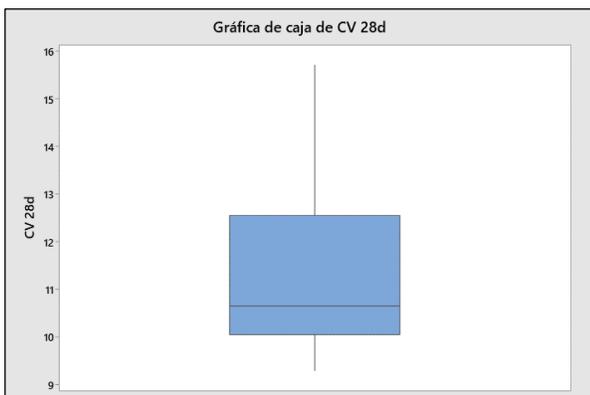
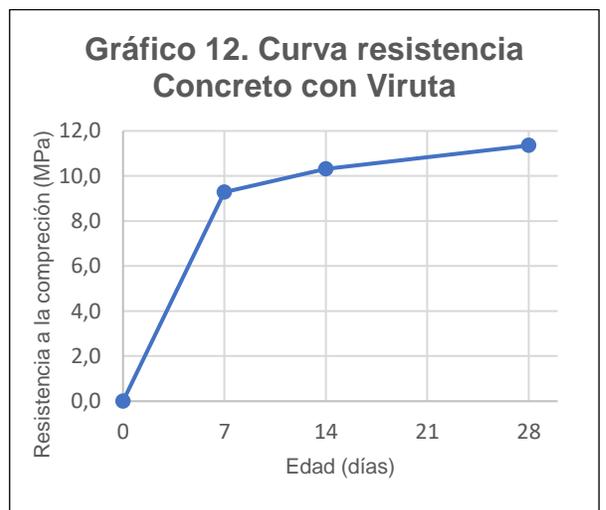


Figura R94. Boxplot para las resistencias a 28 días del concreto con viruta.  
Fuente: Elaboración propia a partir del software Minitab 19.



Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

**Cuadro 101. Rango aceptable máximo para la desviación estándar del Concreto con Viruta (norma ASTM C670-15).**

Edad (días)	Tamaño especímenes	Coefficiente de variación (%)	Rango aceptable
7	100x200	3,2	4,12
14	100x200	3,2	3,43
28	100x200	3,2	8,84

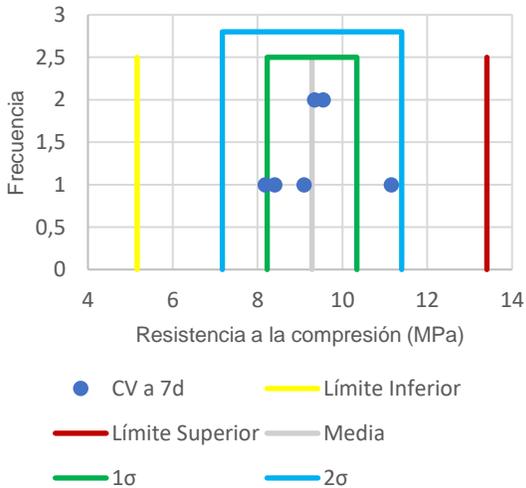
Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

**Cuadro 102. Condiciones de variación de los datos de resistencia a los 7 días del Concreto con Viruta (norma ASTM C39-18).**

Límite d2s%		Rango aceptable entre 2 cilindros según ASTM C39-18	Condición
Resistencias (MPa)	Valor d2s%		
11,2 - 8,2	26,64	9,0%	No cumple
9,5 - 8,2	14,26	9,0%	No cumple
9,5 - 8,4	11,95	9,0%	No cumple
9,5 - 9,1	4,72	9,0%	Cumple

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

**Gráfico 13. Límites de rango máximo aceptable para 6 especímenes de concreto con viruta fallados a 7 días. ASTM C670-15.**



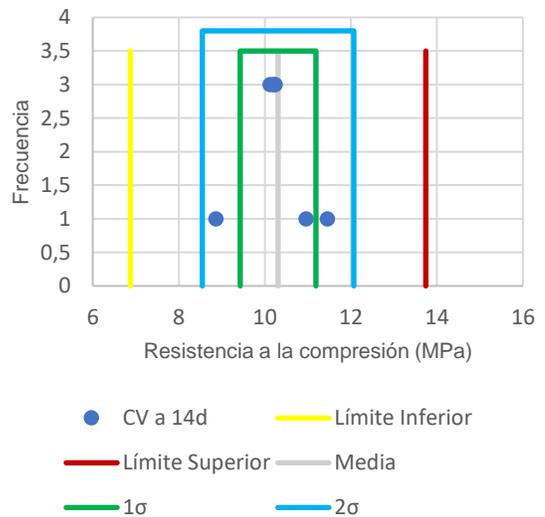
Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

**Cuadro 103. Condiciones de variación de los datos de resistencia a los 14 días del Concreto con Viruta (norma ASTM C39-18).**

Límite d2s%		Rango aceptable entre 2 cilindros según ASTM C39-18	Condición
Resistencias (MPa)	Valor d2s%		
11,5 - 8,9	22,62	9,0%	No cumple
11,0 - 8,9	19,16	9,0%	No cumple
11,0 - 10,1	7,66	9,0%	Cumple

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

**Gráfico 14. Límites de rango máximo aceptable para 6 especímenes de concreto con viruta fallados a 14 días. ASTM C670-15.**



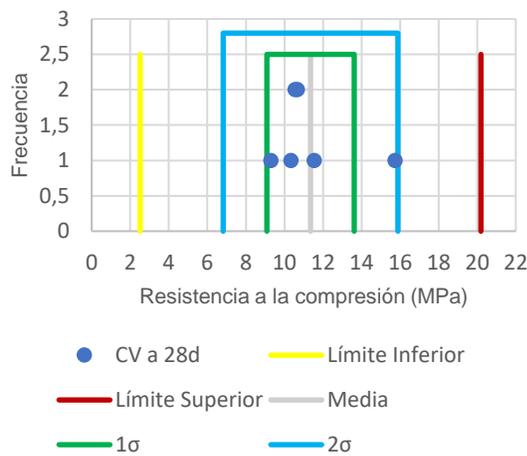
Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

**Cuadro 104. Condiciones de variación de los datos de resistencia a los 28 días del Concreto con Viruta (norma ASTM C39-18).**

Límite d2s%		Rango aceptable entre 2 cilindros según ASTM C39-18	Condición
Resistencias (MPa)	Valor d2s%		
15,7 - 9,3	40,91	9,0%	No cumple
11,5 - 9,3	19,41	9,0%	No cumple
11,5 - 10,3	10,49	9,0%	No cumple
11,5 - 10,6	8,58	9,0%	Cumple

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

**Gráfico 15. Límites de rango máximo aceptable para 6 especímenes de concreto con viruta fallados a 28 días. ASTM C670-15.**



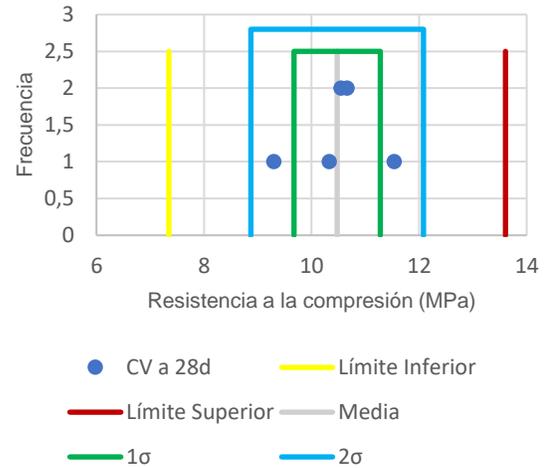
Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

**Cuadro 105. Condiciones de variación de los datos de resistencia a los 28 días del Concreto con Viruta eliminando el dato atípico.**

Límite d2s%		Rango aceptable entre 2 cilindros según ASTM C39-18	Condición
Resistencias (MPa)	Valor d2s%		
11,5 - 9,3	19,41	9,0%	No cumple
11,5 - 10,3	10,49	9,0%	No cumple
11,5 - 10,6	8,58	9,0%	Cumple

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

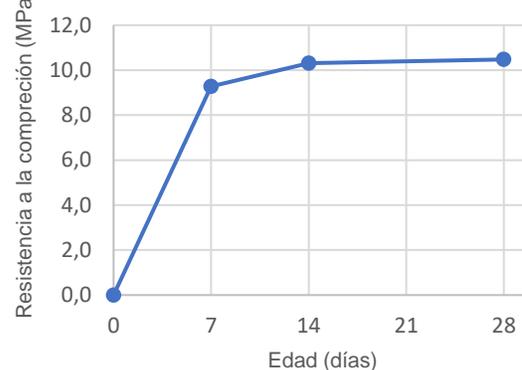
**Gráfico 16. Límites de rango máximo aceptable para 5 especímenes de concreto con viruta fallados a 28 días al eliminar el dato atípico. ASTM C670-15.**



Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

Con el dato atípico fuera del promedio que determina el f'c del Concreto con Viruta se vuelve a graficar la curva de resistencia para este concreto.

**Gráfico 17. Curva resistencia Concreto con Viruta eliminando el dato atípico.**



Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

<b>Cuadro 106. Estadística descriptiva para Resistencias de Concreto con Viruta Magnetizado (CV M) y f'c eliminando el dato atípico (28 S.a.).</b>				
Condición	s (MPa)	v (%)	$\bar{x}$	Cv (%)
28 S.a.	0,80	0,64	10,5	7,66
CV M	0,37	0,14	12,5	2,99

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

<b>Cuadro 107. Comparación de las medias entre el f'c del Concreto con Viruta y los cilindros magnetizados.</b>			
Especímenes	Valor p	Nivel de significancia	Conclusión
Concreto magnetizado fallado a 28 días (CV M)	0,009	0,05	Hay diferencia significativa entre las medias
Concreto fallado a 28 días sin dato atípico (28 S.a.)			

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

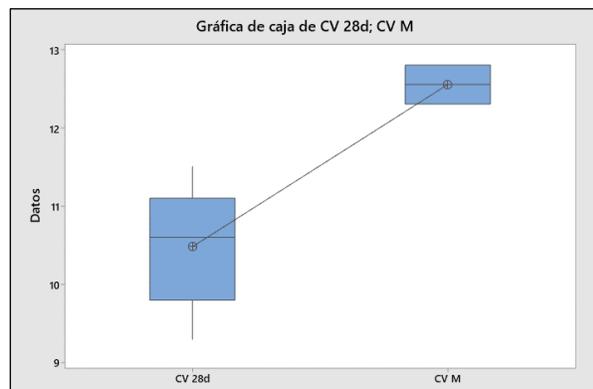


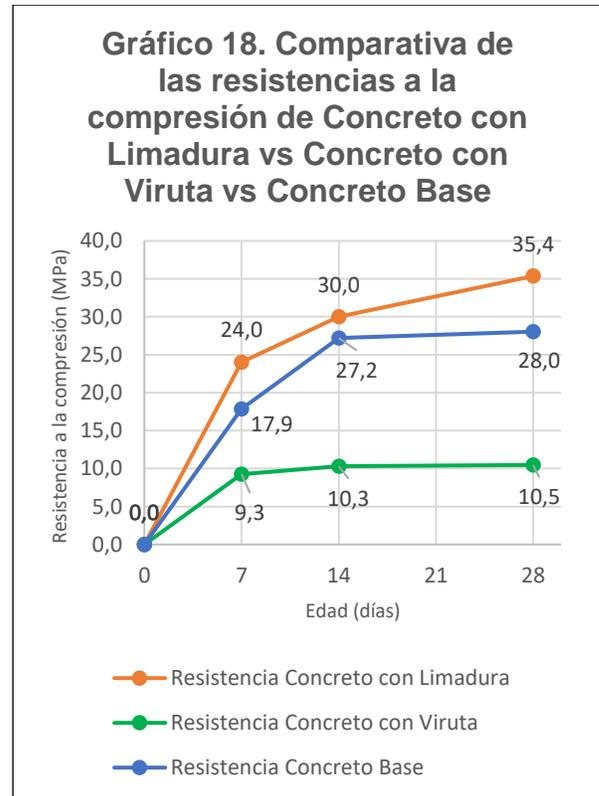
Figura R97. Boxplot para la comparación de la media entre el f'c del concreto con viruta y los cilindros magnetizados.  
Fuente: Elaboración propia a partir del software Minitab 19.

<b>Cuadro 108. Control del Concreto con Viruta según la Tabla 4.3 del ACI 214RS-11.</b>	
Cv de f'c CB	Condición
7,66	Malo

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

## R7. Rendimiento físico-mecánico de la viruta y la limadura en la resistencia del concreto hidráulico.

Primeramente, se grafican las 3 curvas de resistencia a la compresión para comparar de manera gráfica la diferencia entre una y otra.



Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

Se compararon las medias del Concreto Base (f'c patrón) contra el f'c del Concreto con Limadura y contra el f'c del Concreto con Viruta, para establecer si dicha diferencia es significativa. Dicha comparación se realizó en el software Minitab 19 con una prueba t de dos muestras.

**Cuadro 109. Comparación de las medias entre el f'c del Concreto Base con respecto al f'c del Concreto con Limadura.**

Especímenes	Valor p	Nivel de significancia	Conclusión
f'c de Concreto Base	0,000	0,05	Hay diferencia significativa entre las medias
f'c de Concreto con Limadura			

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

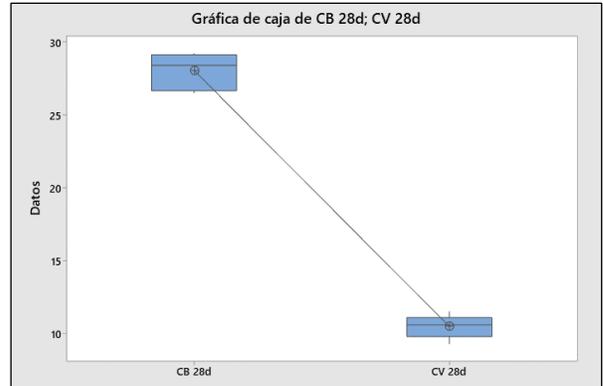


Figura R99. Boxplot para la comparación de la media entre el f'c del concreto con viruta y el f'c del concreto base.

Fuente: Elaboración propia a partir del software Minitab 19.

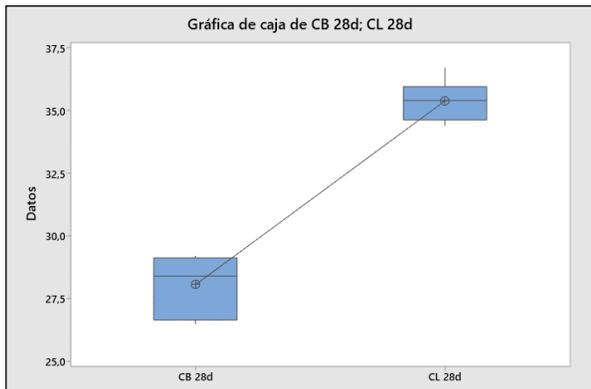


Figura R98. Boxplot para la comparación de la media entre el f'c del concreto con limadura y el f'c del concreto base.

Fuente: Elaboración propia a partir del software Minitab 19.

Recordemos que para el f'c del Concreto con Viruta no se toma en cuenta el valor atípico.

**Cuadro 110. Comparación de las medias entre el f'c del Concreto Base con respecto al f'c del Concreto con Viruta.**

Especímenes	Valor p	Nivel de significancia	Conclusión
f'c de Concreto Base	0,000	0,05	Hay diferencia significativa entre las medias
f'c de Concreto con Viruta sin dato atípico (28 S.a.)			

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

## R8. Diseño teórico de un electroimán con mismas dimensiones de especímenes de concreto.

Se diseñó un electroimán con las dimensiones de 100 milímetros de diámetro y 200 milímetros de altura, cuyo núcleo fuera completamente acero 1020, cuya permeabilidad magnética relativa ronda un valor de 2000.

Con este diseño se tendrán las fuerzas de magnetización teóricas que alcanzaría el electroimán. Estas se compararán con las obtenidas en el concreto.

<b>Cuadro 111. Características teóricas del electroimán.</b>			
Altura	0,18	m	
Diámetro	0,10	m	
Área	0,008	m <sup>2</sup>	
Volumen	0,002	m <sup>3</sup>	

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

<b>Cuadro 112. Propiedades teóricas aplicadas al electroimán.</b>			
Corriente (A)	Espiras	$\mu_0$	Voltaje (V)
6	400	0,0025	21

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

<b>Cuadro 113. Resultados teóricos obtenidos del electroimán.</b>				
B extremo (T)	F extremo (N)	F extremo (kgf)	P (W)	L (H)
16,67	453,96	46,29	126,00	18,16

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.



Figura R100. Elaboración de solenoide con alambre de aluminio #16 por empresa SJ Transformadores. Fuente: Elaboración propia.



Figura R101. Solenoide con salida a 400, 500 y 600 espiras elaborado y donado por empresa SJ Transformadores. Fuente: Elaboración propia.

## R9. Campo magnético aportado por los especímenes de concreto con acero.

Dos de los cilindros realizados se sometieron a pruebas para determinar su capacidad magnética al ser sometidos a un campo magnético producido por un solenoide.



Figura R102. Medición de fuerzas de adherencia en el concreto.

Fuente: Elaboración propia.

### Concreto con Viruta

<b>Cuadro 114. Medición de la fuerza de adherencia del imán sobre el Concreto con Viruta magnetizado (CV9).</b>					
Medición	Cilindro	F <sub>a</sub> (grf)	F <sub>m</sub> (grf)	I (A)	V (V)
A	CV9	406,57	0,00	0	0,0
	CV9	408,91	0,00		0,0
B	CV9	414,82	8,25	1	3,0
	CV9	417,96	9,05		3,0
C	CV9	423,67	17,10	2	6,5
	CV9	424,52	15,61		6,5
D	CV9	430,75	24,18	3	9,5
	CV9	429,72	20,81		9,5
E	CV9	436,35	29,78	4	13,0
	CV9	433,24	24,33		13,0
F	CV9	443,15	36,58	5	17,0
	CV9	439,38	30,47		17,0
G	CV9	444,60	38,03	6	20,5
	CV9	445,81	36,90		20,5

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

Los valores de la columna 4 del Cuadro 114 se promedian para cada medición y se obtienen los valores del siguiente cuadro.

<b>Cuadro 115. Fuerza magnetización (F<sub>m</sub>) promedio y campo magnético obtenidos del Cilindro CV9.</b>				
I (A)	F <sub>m</sub> prom. (grf)	F <sub>m</sub> prom. (kgf)	F <sub>m</sub> prom. (N)	B (T)
0	0,00	0,0000	0,0000	0,0000
1	8,65	0,0086	0,0848	0,2278
2	16,36	0,0164	0,1604	0,3133
3	22,50	0,0225	0,2206	0,3674
4	27,06	0,0271	0,2653	0,4029
5	33,53	0,0335	0,3288	0,4485
6	37,47	0,0375	0,3674	0,4741

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

### **Cuadro 116. Medición de la fuerza de adherencia de un imán sobre el Concreto con Viruta magnetizado (CV6).**

Medición	Cilindro	F <sub>a</sub> (grf)	F <sub>m</sub> (grf)	I (A)	V (V)
A	CV6	245,76	0,00	0	0,0
	CV6	246,52	0,00		0,0
B	CV6	247,64	1,88	1	3,5
	CV6	248,31	1,79		5,0
C	CV6	259,00	13,24	2	6,5
	CV6	254,85	8,33		10,0
D	CV6	259,36	13,60	3	10,0
	CV6	270,74	24,22		10,0
E	CV6	280,40	34,64	4	13,5
	CV6	273,53	27,01		13,5
F	CV6	284,81	39,05	5	17,5
	CV6	281,58	35,06		17,5
G	CV6	290,04	44,28	6	21,0
	CV6	301,93	55,41		21,0

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

Los valores de la columna 4 del Cuadro 116 se promedian para cada medición y se obtienen los valores del siguiente cuadro.

**Cuadro 117. Fuerza magnetización (F<sub>m</sub>) promedio y campo magnético obtenidos del Cilindro CV6.**

I (A)	F <sub>m</sub> prom. (grf)	F <sub>m</sub> prom. (kgf)	F <sub>m</sub> prom. (N)	B (T)
0	0,00	0,0000	0,0000	0,0000
1	1,83	0,0018	0,0180	0,1049
2	10,79	0,0108	0,1058	0,2544
3	18,91	0,0189	0,1854	0,3369
4	30,83	0,0308	0,3023	0,4301
5	37,06	0,0371	0,3634	0,4715
6	49,85	0,0498	0,4888	0,5469

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

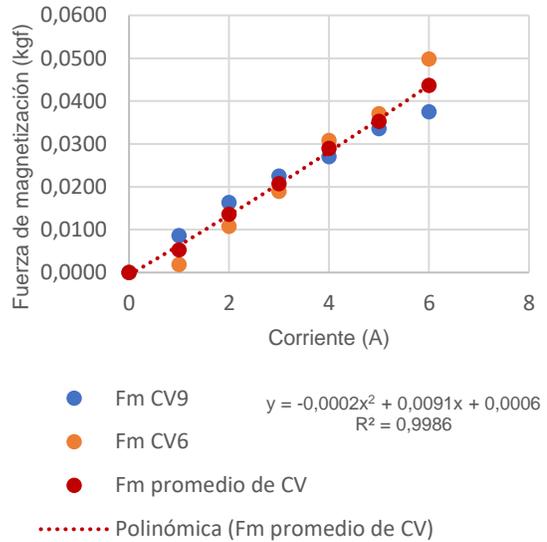
Una vez calculadas las fuerzas de magnetización (F<sub>m</sub>) para cada cilindro, estas se promedian para obtener una fuerza de magnetización representativa del Concreto con Viruta como material. Se promedian los valores de la segunda columna de los cuadros 115 y 117 para generar los valores de la columna

**Cuadro 118. Fuerza magnetización (F<sub>m</sub>) resultante y campo magnético representativos del Concreto con Viruta.**

I (A)	F <sub>m</sub> resul. (grf)	F <sub>m</sub> resul. (kgf)	F <sub>m</sub> resul. (N)	B (T)
0	0,00	0	0	0
1	5,24	0,0052	0,0514	0,1774
2	13,57	0,0136	0,1331	0,2854
3	20,70	0,0207	0,2030	0,3525
4	28,94	0,0289	0,2838	0,4167
5	35,29	0,0353	0,3461	0,4602
6	43,66	0,0437	0,4281	0,5118

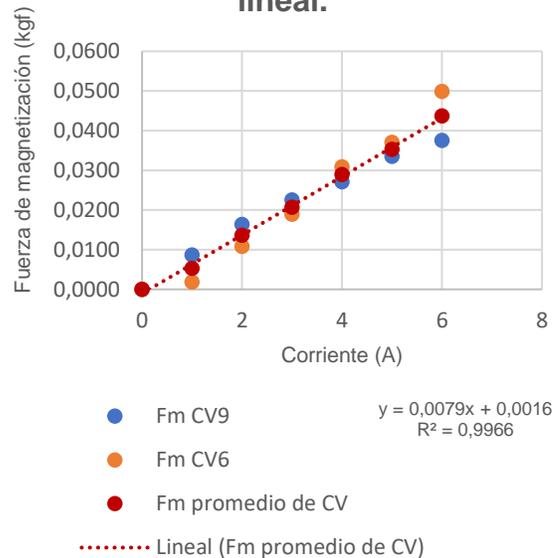
Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

**Gráfico 19. Curva de fuerza magnetizante para Concreto con Viruta con proyección polinómica.**



Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

**Gráfico 20. Curva de fuerza magnetizante para concreto con viruta con proyección lineal.**



Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

**Cuadro 119. Proyección de  $F_m$  a distintos amperajes para las ecuaciones obtenidas en los gráficos 19 y 20 para Concreto con Viruta.**

Proyección Polinómica		Proyección Lineal	
Amperios	$F_m$ (kgf)	Amperios	$F_m$ (kgf)
22	0,104	40	0,3176
23	0,104	50	0,3966
42	0,030	60	0,4756
43	0,022	70	0,5546
44	0,014	80	0,6336
45	0,005	90	0,7126
46	-0,004	100	0,7916

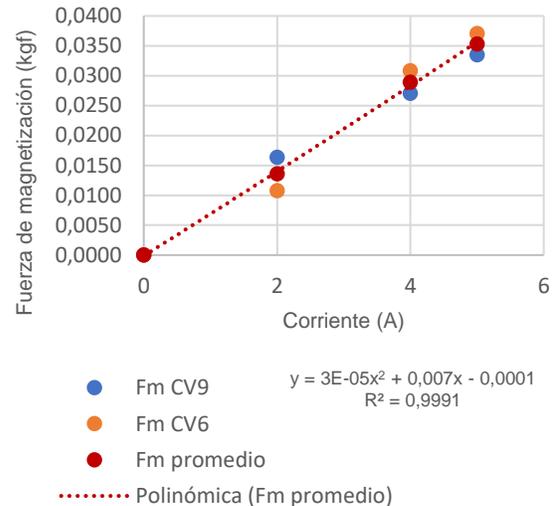
Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

**Cuadro 120. Alfa de Cronbach obtenido para los datos de  $F_m$  del Concreto con Viruta.**

Medición	Cilindro	$F_m$ (grf)	Alfa de Cronbach
A	CV9	0,00	-
	CV9	0,00	
	CV6	0,00	
	CV6	0,00	
B	CV9	8,25	-0,5713
	CV9	9,05	
	CV6	1,88	
	CV6	1,79	
C	CV9	17,10	0,7144
	CV9	15,61	
	CV6	13,24	
	CV6	8,33	
D	CV9	24,18	-2,7240
	CV9	20,81	
	CV6	13,60	
	CV6	24,22	
E	CV9	29,78	0,9722
	CV9	24,33	
	CV6	34,64	
	CV6	27,01	
F	CV9	36,58	0,9559
	CV9	30,47	
	CV6	39,05	
	CV6	35,06	
G	CV9	38,03	-0,5031
	CV9	36,90	
	CV6	44,28	
	CV6	55,41	

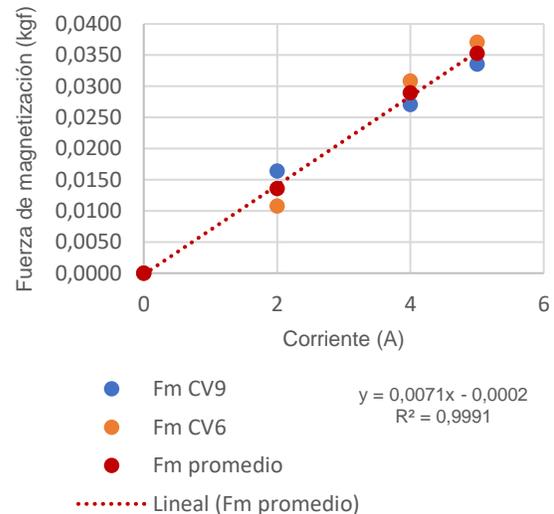
Fuente: Elaboración propia a partir del software Minitab 19.

**Gráfico 21. Curva de fuerza magnetizante para concreto con viruta con proyección polinómica utilizando solo los datos confiables.**



Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

**Gráfico 22. Curva de fuerza magnetizante para concreto con viruta con proyección lineal utilizando solo los datos confiables.**



Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

**Cuadro 121. Proyección de  $F_m$  a distintos amperajes para las ecuaciones obtenidas en los gráficos 21 y 22 para Concreto con Viruta.**

Proyección Polinómica		Proyección Lineal	
Amperios	$F_m$ (kgf)	Amperios	$F_m$ (kgf)
2	0,014	40	0,2838
4	0,027	50	0,3548
8	0,054	60	0,4258
16	0,104	70	0,4968
32	0,193	80	0,5678
<b>116</b>	<b>0,408</b>	90	0,6388
<b>117</b>	<b>0,408</b>	100	0,7098
230	0,023	110	0,7808
231	0,016	120	0,8518
232	0,009	130	0,9228
233	0,002	140	0,9938
234	-0,005	150	1,0648

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

### Concreto con Limadura

**Cuadro 122. Medición de la fuerza de adherencia de un imán sobre el Concreto con Limadura magnetizado (CL21).**

Medición	Cilindro	$F_a$ (grf)	$F_m$ (grf)	I (A)	V (V)
A	CL21	153,60	0,00	0	0,0
	CL21	152,91	0,00		0,0
B	CL21	158,13	4,53	1	3,5
	CL21	158,38	5,47		3,5
C	CL21	164,03	10,43	2	6,5
	CL21	165,45	12,54		6,5
D	CL21	172,68	19,08	3	10,0
	CL21	170,59	17,68		10,0
E	CL21	177,47	23,87	4	13,0
	CL21	179,56	26,65		13,0
F	CL21	182,36	28,76	5	17,5
	CL21	181,65	28,74		17,5
G	CL21	185,78	32,18	6	21,0
	CL21	180,63	27,72		21,0

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.



Figura R103. Medición de fuerzas de adherencia en el concreto embobinado con corriente eléctrica.

Fuente: Elaboración propia.

**Cuadro 123. Fuerza magnetización ( $F_m$ ) promedio y campo magnético obtenidos del Cilindro CL21.**

I (A)	$F_m$ (grf)	$F_m$ (kgf)	$F_m$ (N)	B (T)
0	0,00	0,0000	0,0000	0,0000
1	5,00	0,0050	0,0490	0,1732
2	11,49	0,0115	0,1126	0,2625
3	18,38	0,0184	0,1802	0,3321
4	25,26	0,0253	0,2477	0,3893
5	28,75	0,0288	0,2819	0,4154
6	29,95	0,0300	0,2937	0,4239

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

**Cuadro 124. Medición de la fuerza de adherencia de un imán sobre el Concreto con Limadura magnetizado (CL22).**

Medición	Cilindro	F <sub>a</sub> (grf)	F <sub>m</sub> (grf)	I (A)	V (V)
A	CL22	159,87	0,00	0	0,0
	CL22	160,20	0,00		0,0
B	CL22	164,35	4,48	1	3,5
	CL22	162,28	2,08		3,0
C	CL22	171,62	11,75	2	6,5
	CL22	174,06	13,86		6,5
D	CL22	178,21	18,34	3	9,5
	CL22	178,25	18,05		10,0
E	CL22	187,47	27,60	4	13,0
	CL22	186,83	26,63		13,0
F	CL22	195,47	35,60	5	17,5
	CL22	195,68	35,48		17,5
G	CL22	200,35	40,48	6	21,0
	CL22	201,71	41,51		21,0

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

**Cuadro 125. Fuerza magnetización (F<sub>m</sub>) promedio y campo magnético obtenidos del Cilindro CL22.**

I (A)	F <sub>m</sub> (grf)	F <sub>m</sub> (kgf)	F <sub>m</sub> (N)	B (T)
0	0,00	0,0000	0,0000	0,0000
1	3,28	0,0033	0,0322	0,1403
2	12,81	0,0128	0,1256	0,2772
3	18,20	0,0182	0,1784	0,3304
4	27,12	0,0271	0,2659	0,4034
5	35,54	0,0355	0,3485	0,4618
6	41,00	0,0410	0,4020	0,4960

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

Una vez calculadas las fuerzas de magnetización para cada cilindro, estas se promedian para obtener una fuerza de magnetización representativa del Concreto con Viruta como material.

**Cuadro 126. Fuerza magnetización (F<sub>m</sub>) resultante y campo magnético representativos del Concreto con Limadura.**

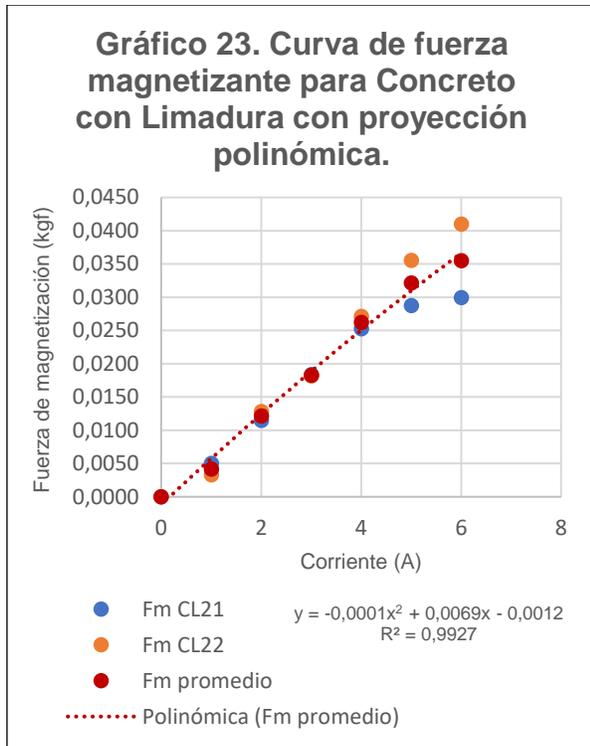
I (A)	F <sub>m</sub> (grf)	F <sub>m</sub> (kgf)	F <sub>m</sub> (N)	B (T)
0	0,00	0,0000	0,0000	0,0000
1	4,14	0,0041	0,04060	0,1576
2	12,15	0,0121	0,1191	0,2700
3	18,29	0,0183	0,1793	0,3313
4	26,19	0,0262	0,2568	0,3964
5	32,15	0,0321	0,3152	0,4392
6	35,47	0,0355	0,3479	0,4614

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

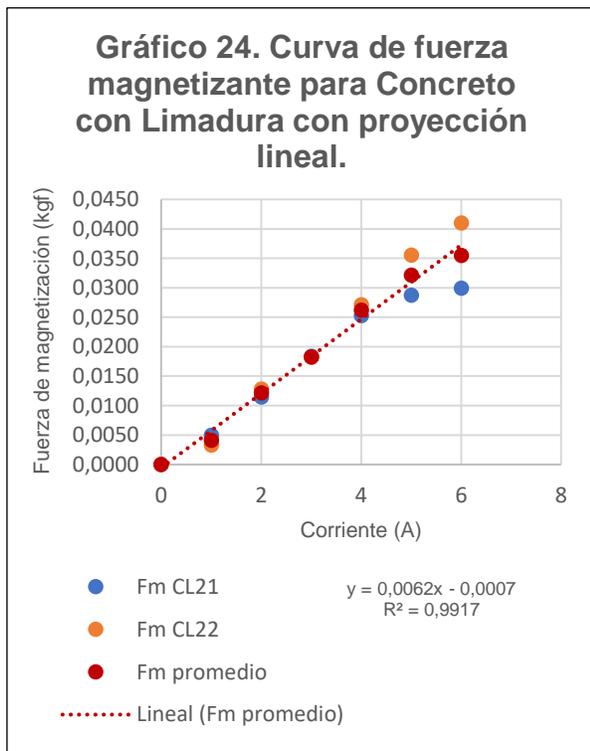


Figura R104. Balines metálicas utilizadas para la medición de las fuerzas de adherencia en el concreto.

Fuente: Elaboración propia.



Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.



Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

**Cuadro 127. Proyección de  $F_m$  a distintos amperajes para las ecuaciones obtenidas en los gráficos 23 y 24 para Concreto con Limadura.**

Proyección Polinómica		Proyección Lineal	
Amperios	$F_m$ (kgf)	Amperios	$F_m$ (kgf)
34	0,118	100	0,6193
35	0,118	110	0,6813
65	0,025	120	0,7433
66	0,019	130	0,8053
67	0,012	140	0,8673
68	0,006	150	0,9293
69	-0,001	160	0,9913

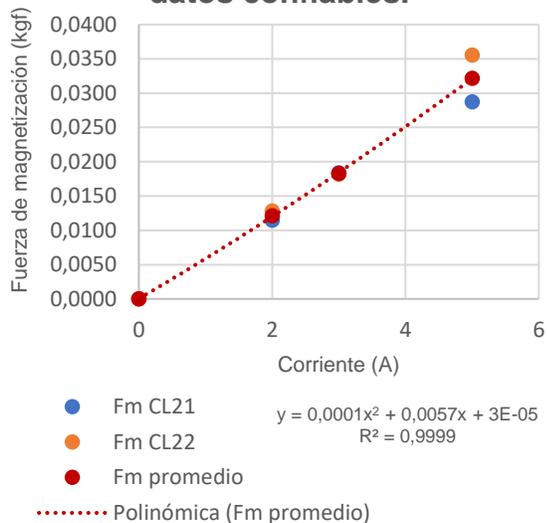
Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

**Cuadro 128. Alfa de Cronbach obtenido para los datos de  $F_m$  del Concreto con Limadura.**

Medición	Cilindro	$F_m$ (grf)	Alfa de Cronbach
A	CL21	0,00	-
	CL21	0,00	
	CL22	0,00	
	CL22	0,00	
B	CL21	4,53	-4,2330
	CL21	5,47	
	CL22	2,08	
C	CL21	10,43	1,0000
	CL21	12,54	
	CL22	13,86	
D	CL21	19,08	0,5686
	CL21	17,68	
	CL22	18,05	
E	CL21	23,87	-3,2920
	CL21	26,65	
	CL22	26,63	
F	CL21	28,76	0,4898
	CL21	28,74	
	CL22	35,48	
G	CL21	32,18	-1,5620
	CL21	27,72	
	CL22	41,51	

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

**Gráfico 25. Curva de fuerza magnetizante para concreto con limadura con proyección polinómica utilizando solo los datos confiables.**



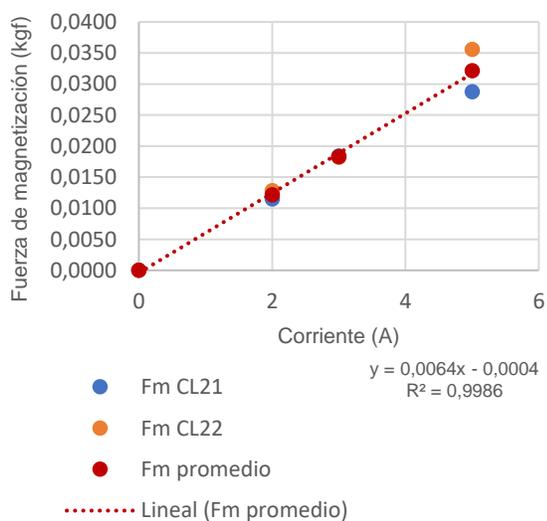
Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

**Cuadro 129. Proyección de  $F_m$  a distintos amperajes para las ecuaciones obtenidas en los gráficos 25 y 26 para Concreto con Limadura.**

Proyección Polinómica		Proyección Lineal	
Amperios	Fm (kgf)	Amperios	Fm (kgf)
2	0,012	50	0,3196
4	0,024	60	0,3836
8	0,052	70	0,4476
16	0,117	80	0,5116
32	0,285	90	0,5756
64	0,774	100	0,6396
120	2,124	110	0,7036
230	6,601	120	0,7676
231	6,653	130	0,8316
232	6,705	140	0,8956
233	6,757	150	0,9596
234	6,809	160	1,0236

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

**Gráfico 26. Curva de fuerza magnetizante para concreto con limadura con proyección lineal utilizando solo los datos confiables.**



Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

## R10. Fuerza magnética para especímenes de concreto de 100x200 mm con distintas dosificaciones de acero.

Se realiza una interpolación entre la fuerza obtenida experimentalmente con los especímenes de acero relacionado al porcentaje de acero aproximado que poseen cada uno. Con estos y la fuerza teórica del electroimán, se estima la fuerza que podría alcanzar el concreto si los especímenes tuvieran entre un 20 y 40 porciento de acero en la mezcla.

Material	Porcentaje acero en un cilindro (%)	Fm en extremo (kgf)	Amperaje
CL	10,53	0,035	6
CV	10,53	0,044	6
Electroimán teórico	100	46,290	6
Interpolación CL	20	4,931	6
	25	7,516	6
	30	10,101	6
	35	12,686	6
	40	15,271	6
Interpolación CV	20	4,939	6
	25	7,523	6
	30	10,108	6
	35	12,692	6
	40	15,276	6

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

## R11. Costos de extracción de limadura y viruta de acero para la elaboración de agregado fino ferromagnético.

El principal gasto económico es con respecto a la extracción de la materia prima ferromagnética.

Descripción	Monto (Colones)
Barras de acero 1020	68929,00
Extracción de limadura de acero	188600,00
Discos de corte y desbaste	150940,00
Fresas para fresadora	52070,00
<b>Total</b>	<b>460539,00</b>

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

Para la extracción de Limadura no se está tomando en cuenta el costo del esmerilador angular ni del consumo de electricidad.

Descripción	Monto (Colones)
Barras de acero 1020	49235
Extracción de limadura de acero	188600
Discos de corte y desbaste	150940
<b>Total</b>	<b>388775</b>
Costo por cilindro	8639
Adición de limadura de acero 1020 con un 35% de sustitución de agregado fino en un metro cúbico de concreto.	5500041

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.



Figura R105. Desbaste de acero 1020 para la obtención de limadura.

Fuente: Elaboración propia.

En la extracción de viruta no se cuenta mano de obra. Sin embargo, conlleva mucho menos tiempo la extracción de viruta que la extracción de limadura.



Figura R106. Corte de acero 1020 para la obtención de viruta.  
Fuente: Elaboración propia.

### Cuadro 133. Costo de extracción de viruta.

Descripción	Monto (Colones)
Barras de acero 1020	19694
Fresas para fresadora	52070
<b>Total</b>	<b>71764</b>
Costo por cilindro	3120
Adición de viruta de acero 1020 con un 35% de sustitución de agregado fino en un metro cúbico de concreto.	1986364

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

# Análisis de los resultados

## Agregados

### Granulometría (ASTM C136-19)

Los ensayos para los agregados nos permiten conocer propiedades que nos ayuden a determinar si estos son apropiados para utilizarse en una mezcla de concreto cumpliendo con los parámetros establecidos en las mismas normas y de ser así, contar con los datos que se requieren para realizar un diseño de mezcla de concreto hidráulico.

En las figuras de la R1 a la R7, se observa la extracción de muestras representativas de cada uno de los 3 materiales.

Siguiendo la metodología, se realizó el lavado de finos con base en la norma ASTM C117-17. En los cuadros 1 y 11 se muestran los resultados de dicho lavado para la arena y el polvo de piedra respectivamente, donde se obtuvo un 15% de finos para la arena y un 8,2% para el polvo de piedra. Con respecto a la norma ASTM C33-18, se muestra en estos mismos cuadros que el porcentaje de finos es mucho mayor al máximo permitido por esta. Estos pesos de finos luego se toman en cuenta en los porcentajes pasando en los cuadros 3 y 13, observándose en el peso retenido en la charola.

Se puede destacar que por granulometría ninguno de los 3 agregados cumple para ser utilizado en una mezcla de concreto, según la norma ASTM C33-18, por parte principalmente de los límites de porcentaje pasando como se muestra en los gráficos 1, 2 y 3. Un concreto requiere de agregados que cumplan con las especificaciones, pues estas son básicamente las conclusiones de los parámetros aceptables obtenidos luego de muchos ensayos y pruebas en investigaciones, en este caso realizados por la ASTM. Esto quiere decir que los concretos se comportarán mejor cuando los agregados cumplan dichos parámetros, para evitar

segregaciones, burbujas de aire, bajas resistencias y dificultades en la compactación.

Según se observa en el Gráfico 1, la arena posee más material grueso, principalmente para los tamices de 4,75 y 2,36 mm, donde se tiene un porcentaje pasando de 88% y 74% respectivamente, es decir que al pasar menos material hay más retenido, dejando saber que tiene más material grueso retenido del que se requiere. Esto quiere decir que es un material con muchas partículas gruesas en los tamices mayores, sin embargo, se observa en el Cuadro 3 que en los tamices de 0,15 y 0,075 pasa más material del que debería según los límites que se ven en el Cuadro 6, pues se tienen porcentajes pasando de 20% y 14% respectivamente, es decir, hay mucho material fino, porque está pasando más de lo que debería, en conclusión, la arena no está bien proporcionada granulométricamente.

En el Gráfico 2, se puede apreciar que el polvo de piedra también presenta incumplimiento en los límites de porcentajes pasando. Básicamente no cumple los límites en ningún tamiz. Como se observa en el Cuadro 13, hay incumplimiento en los tamices de 4,75, 2,36, 1,18, 0,60 y 0,075, con porcentajes pasando de 67%, 40%, 26%, 17% y 7,9% respectivamente. Todos estos, a excepción del último valor, están por debajo de límite inferior observado en el Gráfico 2, lo que indica que es un material aún más grueso que la arena, lo cual es entendible pues se trata de polvo de piedra. Por supuesto, este tampoco se puede utilizar en una mezcla de concreto hidráulico, pues dicho incumplimiento afectará su resistencia.

El módulo de finura (MF), se cumple para la arena como se puede observar en el Cuadro 4, cuyo valor es 2,88 y se encuentra entre los límites establecidos en la norma ASTM C33-18, que establece un mínimo de 2,3 y un máximo de 3,1. También, se cumple el porcentaje de error cuyo valor obtenido es de 0,24% y está por debajo de 0,3% como lo establece la norma ASTM C136-19. Para el polvo de piedra este no es el caso, ya que

en el Cuadro 14 se obtuvo un MF de 4,27, muy por encima del máximo, de igual manera con el porcentaje de error, que superó el máximo establecido por la norma con un 0,38%. Por esto, la arena posee un mayor porcentaje de finos con respecto al polvo de piedra, lo que explica que en el Gráfico 1 los tamices 0,15 y 0,075 estén por encima del máximo.

Al tener dos arenas gruesas no es posible mezclarlas con el método gráfico para combinación de arenas, pues para esto se requiere una arena fina y por otro lado una gruesa. Lo que correspondería practicarles a estos materiales, es una construcción granulométrica, es decir, preparar el agregado tamiz por tamiz, para que en cada uno se retenga el material requerido y así lograr que el producto final sea un agregado fino que cumpla con lo especificado en la norma ASTM C33-18 (Cuadro 6).

Como se quería formar un agregado fino con sustitución de partículas ferromagnéticas, la construcción granulométrica debía aplicarse, pues esta sustitución se realiza tamiz por tamiz permitiendo que en cada tamaño de partícula se pueda extraer una parte del material rocoso e introducir una parte igual (del mismo peso) de material ferromagnético. Además, debido a la inconsistencia en los porcentajes pasando de cada material y sabiendo que este debía mezclarse con acero, se decidió no obtener la suficiencia de tamizado ni la precisión en el lavado de finos, pues de cualquier manera se construiría un agregado con porcentajes pasando bien establecidos. El Módulo de finura (M.f.) se consideró también, al momento de realizar las construcciones granulométricas para los distintos diseños de mezcla, asegurando que cayera dentro del parámetro establecido por la norma.

Sin embargo, al querer formar un agregado con propiedades ferromagnéticas, permite que la construcción granulométrica se realice entre el metal y alguno de los 2 materiales finos. En este caso se escogió el polvo de piedra, el cual se tamizó completamente y se separó por tamaño de partículas. De igual manera se hizo con la viruta y limadura de acero. Esta decisión es aleatoria, pues al ser ambos materiales gruesos cualquiera puede fungir como el material base.

La piedra quinta se comporta de una mejor manera como se observa en el Gráfico 3. Todos los límites del material se cumplen a excepción del tamiz de 12,5 mm, el cual está un poco debajo del mínimo que se muestra en el Cuadro 22. En el

Cuadro 20 se observa que este tamiz posee un porcentaje pasando de 85%, cuando el mínimo es de 90%. A pesar de esto, por tratarse solo de un 5% y considerando que el resto de los tamices sí cumplen se toma como aceptable y no se busca corregir.

## **Colorimetría (ASTM C40-20)**

Por parte del ensayo de colorimetría se tuvo un buen resultado para ambos materiales. Como se observa en las figuras R8 y R9, ambas muestras, luego de 24 horas sumergidas en hidróxido de sodio como lo indica la norma, no variaron el color del líquido. Incluso al compararlo con la placa de colores, se puede apreciar que los dos son aún más claros que el nivel 1 de la placa orgánica, por lo que están limpios y libres de contenido orgánico.

## **Gravedad Específica (ASTM C127-15 y ASTM C128-15)**

En cuanto a las gravedades específicas se logró determinar tanto la densidad relativa seca al horno, como la aparente y la saturada superficie seca, esto para la arena, el polvo de piedra y la piedra quinta. Esta propiedad es la que determina la relación entre la densidad del agregado y la densidad del agua. Si la gravedad específica es menor a 1, esto significa que el material flotaría en la sustancia de referencia, agua en este caso; al tener un valor para la gravedad específica mayor a 1, significa que el material se hundiría en la sustancia de referencia. Por lo tanto, entre mayor sea el valor de la gravedad específica, mayor el peso del material, por lo que se hundirá con mayor facilidad. Los valores de estos parámetros para la arena se muestran en el Cuadro 7, en donde están las 2 mediciones realizadas, las cuales cumplen con las desviaciones estándar tanto en las densidades como en la absorción según establece la norma ASTM C128-15 en la tabla 1 de la sección 12. Estas densidades se observan en el Cuadro 8. El porcentaje de absorción permite realizar una correcta dosificación de la mezcla en cuanto a la cantidad de agua requerida. En el Cuadro 15 se puede apreciar para el polvo de piedra, que posee muy bajo porcentaje de absorción comparado a la arena, siendo favorable si se usara en una mezcla de concreto, debido a que reduce la cantidad de agua a utilizarse. Al comparar las gravedades

específicas entre la arena y el polvo de piedra, nos percatamos que el polvo de piedra es más denso, pues los valores de las gravedades específicas son mayores. Esto también, genera que la arena absorba más agua que el polvo de piedra, debido a que, al ser un material menos denso, significa que posee más vacíos a lo interno de sus partículas, espacios que por la porosidad se llenan de agua. En el Cuadro 16 se muestra la desviación estándar para los valores de densidades y absorción del Cuadro 15, las cuales cumplen según la norma ASTM C128-15.



Figura A1. Determinación de la condición saturada superficie seca en el polvo de piedra.  
Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la piedra quinta, se pueden observar los resultados en el Cuadro 23. Este posee valores de gravedad específica intermedios entre los de la arena y el polvo de piedra, lo que quiere decir que es un material más liviano que el polvo de piedra y más pesado que la arena y esto se puede observar más adelante al comparar los pesos unitarios; su porcentaje de absorción es menor al del polvo de piedra, este refleja que es un material más grueso que requiere más volumen, pero con una porosidad baja que le impide absorber tanta agua. En el Cuadro 24 de igual manera se muestra la desviación estándar para las densidades y absorción mostrados en el Cuadro 23. Estas desviaciones cumplen según lo establecido en la norma ASTM C127-15 en la tabla 1 de la sección 11.



Figura A2. Medición de gravedad específica para piedra quinta.  
Fuente: Elaboración propia.

También, se obtuvo la gravedad específica de la viruta y la limadura de acero, en los cuadros 38 y 41 respectivamente. De estas solo se tomó una medida por dos razones: la primera, porque al ser una materia prima limitada, se quería desperdiciar lo menos posible; segundo, el material no se podía recuperar, debido a que una vez mojado, este se oxidaba antes de que se lograra secar y tampoco servía el secado en horno.

Las densidades relativas por supuesto tendrán el mismo valor para la condición saturada superficie seca, como para la seca al horno y la aparente, ya que el metal no es un material poroso y no va a absorber agua, como se muestra en la última fila de ambos cuadros. En ambos materiales se utilizó el método del picnómetro al tratarse de un material fino. Además, por el corto período que dura la prueba, no habría problemas de oxidación del material durante el ensayo pues su duración no excede la media hora en este caso. A diferencia del proceso convencional que se sigue si se tratara de una arena, el metal al no absorber agua permite que se eliminen los pasos: saturar el material 24 horas, secar hasta saturado superficie seca (S.S.S) y secar en el horno 24 horas. Si no que se deposita de una vez en el picnómetro con el agua, se le retiran las burbujas y se afora hasta la marca para pesarlo.

Por supuesto, el valor de gravedad específica para la viruta y la limadura va a ser bastante alto pues corresponde a un metal, el cual

se hunde con mucha facilidad en el agua, debido a su peso.

En los cuadros 55 y 66 se muestran los valores de la gravedad específica saturada superficie seca y gravedad específica seca al horno para el agregado con limadura de acero y para el agregado con viruta de acero, respectivamente; en ambos casos se utilizó la ecuación "Ec.6". Se calcularon solo la  $G_{bs}$  y  $G_{bss}$  ya que son las requeridas para el diseño de mezcla. Por supuesto, la  $G_{bs} = G_{bss}$  en el caso del metal, así que los valores son 5,47 para la limadura y 6,73 para la viruta.

### Peso Unitario (ASTM C29-17a)

El peso unitario de la arena se puede observar en los cuadros 9 y 10, que corresponden respectivamente a peso unitario suelto y peso unitario compactado, para cada uno se realizaron tres mediciones, las cuales cumplen con la desviación estándar establecida por la norma que solicita un valor menor a  $14 \text{ kg/m}^3$  para agregados finos con un único operador. Junto a esto, el porcentaje de vacíos del material que depende de la densidad relativa seca al horno y del peso unitario. Esto es por lo que se tienen dos valores de porcentajes de vacíos para el mismo material, uno corresponde al material cuando está suelto y el otro a cuando este material se compacta, disminuyendo su porcentaje de vacíos, debido a que se acomoda de mejor manera el material ocupando menor volumen y cerrando esos espacios vacíos. Esto se comprueba comparando ambos cuadros, donde el peso unitario compactado promedio de la arena posee mayor peso por  $\text{m}^3$  y menor porcentaje de vacíos que en estado suelto.

Así, la arena tiene un peso unitario suelto de  $1330 \text{ kg/m}^3$  y 34% de vacíos, mientras que compactado aumenta el peso unitario a  $1510 \text{ kg/m}^3$  y el porcentaje de vacíos baja a 25%.



Figura A3. Equipo para elaboración de peso unitario de los agregados.

Fuente: Elaboración propia.

Con el polvo de piedra ocurre lo mismo y se puede apreciar al comparar los valores de peso unitario promedio y porcentaje de vacíos de los cuadros 17 y 18. Estos valores serían de  $1420 \text{ kg/m}^3$  con un porcentaje de vacíos de 41% en estado suelto, mientras que compactado sucede lo mismo que con la arena, el peso unitario sube a  $1630 \text{ kg/m}^3$  y el porcentaje de vacíos disminuye a 33%. Algo notable es que el polvo de piedra posee porcentajes de vacíos mucho mayores que la arena, sin embargo, el porcentaje de absorción es menor que el de la arena, aun cuando esta tiene mayor porcentaje de vacíos. Esto se da, porque la absorción depende de los vacíos dentro de las partículas de cada material. El porcentaje de vacíos toma no solo estos, sino también los vacíos entre una partícula y otra, los cuales no son considerados al calcular la absorción. El polvo de piedra posee un alto porcentaje de vacíos, porque como ya se mencionó el material es muy grueso, por esto la curva de porcentajes pasando del Gráfico 2 queda muy por debajo de los límites mínimos. Al ser un material tan grueso, las partículas no se pueden acomodar tan fácilmente, lo que ocasiona que entre las partículas queden mayor cantidad de vacíos. Esto se puede apreciar mejor en la Figura A4. Cuando se tiene una correcta proporción en los tamaños de las partículas, las más pequeñas se acomodan entre las más grandes permitiendo un buen acomodo del material, pero cuando hay muchas partículas grandes y pocas finas, el acomodo no se logra dejando más vacíos entre partículas.

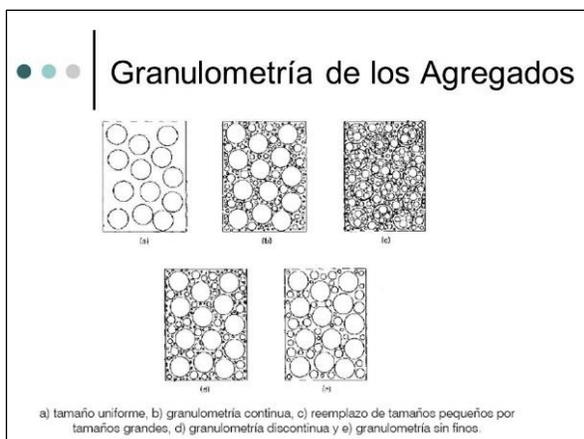


Figura A4. Distintos acomodos de un agregado según su granulometría.  
Fuente: (Cáceres, 2011)

El agregado grueso posee para el estado suelto un peso unitario de  $1230 \text{ kg/m}^3$  con un porcentaje de vacíos de 46%, mientras que compactado como es de esperar sube a  $1310 \text{ kg/m}^3$  y el porcentaje de vacíos baja a 42%, como se aprecia en los cuadros 25 y 26 respectivamente, esto demuestra que posee un bajo peso unitario, debido al alto porcentaje de vacíos, lo que quiere decir que el acomodo de las partículas, debido a su tamaño, deja mucho espacio libre entre ellas. También, recordemos que su gravedad específica es menor que la del polvo de piedra, por esto es un material un poco más liviano. Por otro lado, los valores medidos cumplen también con la desviación estándar establecida en la misma norma ASTM C29-17a para agregado grueso.

Se calcularon también los pesos unitarios de la limadura y la viruta de acero, junto con su porcentaje de vacíos. En los cuadros 39 y 40, se muestran los pesos unitarios suelto ( $690 \text{ kg/m}^3$ ) y compactado ( $960 \text{ kg/m}^3$ ) respectivamente, para la viruta de acero. Ambos ensayos con dos mediciones cada uno y ambas cumplen con la desviación estándar para agregado fino. Para la limadura de acero, el peso unitario suelto se muestra en el Cuadro 42 cuyo valor es de  $2210 \text{ kg/m}^3$  y el compactado en el Cuadro 43 con un valor de  $2730 \text{ kg/m}^3$ ; estas mediciones también cumplieron con la desviación estándar establecida por la norma.

Fue necesario calcular el peso unitario también para los agregados finos construidos, ya que para estos no se puede hacer una correlación como para las gravedades específicas. En los

cuadros 53 y 54 se muestran respectivamente el peso unitario suelto ( $1500 \text{ kg/m}^3$ ) y compactado ( $1830 \text{ kg/m}^3$ ) del agregado fino con limadura de acero. Este posee un mayor valor de peso unitario, debido a que la limadura tiene casi 1,6 veces más peso unitario compactado con respecto al polvo de piedra y al ser un agregado compuesto por estos dos, el peso unitario aumentará entre mayor sea el porcentaje de sustitución del acero.

Si se observa el porcentaje de vacíos, este aumenta en 1,5 veces, esto se da, porque la sustitución de polvo de piedra por acero se hace por peso, no por volumen. Al comparar 1 kilo de limadura con 1 kilo de polvo de piedra, la limadura ocupa mucho menos volumen, es por esto que se mantienen los mismos pesos por tamiz en la construcción granulométrica, pero el volumen del agregado como tal disminuye, y como ya se mencionó al haber menos volumen de partículas finas, que son las que mayormente se sustituyen, va a haber mayor espacio vacío entre partículas más grandes.

Cuando se observa el Cuadro 64 y 65, que corresponden a peso unitario suelto ( $1090 \text{ kg/m}^3$ ) y compactado ( $1410 \text{ kg/m}^3$ ) respectivamente para el agregado fino con viruta de acero, hay un incremento aún mayor en los porcentajes de vacíos pues ya no es limadura sino viruta, que por su forma alargada de viruta (Figura A5), no se acomodan tan bien como las partículas redondeadas de un material rocoso como el polvo de piedra. Esto ocasiona también que su peso unitario se reduzca, siendo incluso inferior al peso unitario del polvo de piedra como tal.



Figura A5. Tamizaje de viruta de acero para su separación por tamiz.  
Fuente: Elaboración propia.

## Abrasión (ASTM C131-20)

La piedra quinta se sometió a la prueba de abrasión según la norma ASTM C131-20. Este

ensayo se realizó 2 veces para verificar el dato de porcentaje de material perdido con la precisión establecida por la norma en la sección 12. En el Cuadro 27 se muestra cuánto se extrajo de material de cada tamiz (1/2" y 3/8") para el primer ensayo, que según la Tabla 1 de la norma se requeriría una graduación de tipo B, debido a la granulometría del material. Este material luego se procesaría, lavando cada una de las muestras para eliminar los finos, luego el material se pondría a secar a 110°C a 24 horas hasta llegar a masa constante. Una vez que el material esté lavado y seco, se extraen los 2500±10 gr que establece la norma de cada uno para el ensayo de abrasión, como se muestra en los cuadros 29 y 30. En el Cuadro 28 se demuestra que los balines cumplen con el peso establecido por la norma, además se utilizó el número de balines que se establece en la sección 6.4.1 de la misma norma.



Figura A6. Máquina de los ángeles usada para ensayo de abrasión.

Fuente: Elaboración propia.

Por último en el Cuadro 31 se muestra el resultado del ensayo con el porcentaje de pérdida de material en el que se reporta una pérdida de un 33% de material, el cual se toma como aceptable ya que para mezclas de pavimento de concreto compactado con rodillo, el Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT) acepta hasta un 35% de pérdida en el agregado grueso, según el Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras caminos y puentes (CR-2010). De igual manera, un valor límite más estándar es de 50% de pérdida máximo, como el mismo manual de especificaciones lo indica para otras condiciones.

Además, la norma ASTM C33-18 en la Tabla 4, establece que el máximo porcentaje de pérdida por abrasión es de 50% para cualquier uso que vaya a tener el concreto, mencionados en esa tabla.

Para el segundo ensayo se repitió el proceso, teniendo como resultados lo mostrado en los cuadros del 32 al 36, donde al final se obtuvo una pérdida de 31%. Con estos 2 valores se obtiene la desviación estándar, que se muestra en el Cuadro 37, el cual cumple con lo establecido en la sección 12 de esta norma.

## Construcción Granulométrica

Para el concreto base (sin partículas ferromagnéticas) los resultados de la construcción granulométrica se muestran en el Cuadro 50. En este se calculan las cantidades de material retenido a partir de los porcentajes pasando. Con estos se obtienen los porcentajes retenidos que permiten a partir del total de agregado a construir, en este caso 24700 gr, obtener cuánto se debe tener de cada tamaño de partícula para poder construir el agregado. Se puede ver que el material retenido de la columna 1 corresponde al porcentaje retenido de la columna 2, dejando por consiguiente que los porcentajes pasando serán los de la columna 4. Al realizar la mezcla de los pesos retenidos en cada tamiz, el agregado resultante no requiere pasar de nuevo por el proceso del ensayo de granulometría, pues se garantiza que cumplirá con los porcentajes pasando y el módulo de finura, siempre que hayan respetado los pesos calculados. En otras palabras una construcción granulométrica, es armar un agregado añadiendo por tamaño de partícula, la cantidad requerida para que el total construido cumpla con los porcentajes pasando para los que fue diseñado.

Para los agregados contruidos con limadura y viruta de acero, sí hay que preparar previamente una cantidad basada en el agregado requerido para el concreto base (24700 gr), pues al poseer un material distinto, van a cambiar las propiedades del agregado como el peso unitario y la gravedad específica, afectando así el diseño de mezcla y por ende las dosificaciones necesarias. En el siguiente apartado de Diseños de Mezcla, se analiza para cada uno cómo se procedió con el desarrollo de estos agregados finos ferromagnéticos.



Figura A7. Separación granulométrica del polvo de piedra para su posterior construcción con limadura y viruta de acero.  
Fuente: Elaboración propia.

## Diseños de Mezcla (ACI 211.1-91)

Se realizó un diseño de mezcla de concreto hidráulico base, que sirvió de guía para realizar una comparación entre las resistencias de un concreto hidráulico convencional y uno con partículas de un material ferromagnético.

En el Cuadro 44 se muestran los porcentajes pasados y retenidos que se esperan tener en el agregado fino para los distintos diseños de mezcla. Allí también se muestra el módulo de finura correspondiente a esos porcentajes retenidos acumulados, ya que este es necesario en el diseño de mezcla. En los cuadros 45 y 46 se muestra el porcentaje de humedad del polvo de piedra y de la piedra quinta respectivamente, medidos el día que se realizaba la mezcla, esto para obtener un valor real que permitiera realizar correcciones en la cantidad de agua por agregar en la mezcla. Para obtener este valor el mismo día y no esperar el secado de 24 horas del horno, se secó en una plantilla eléctrica, este mismo proceso se realiza en las siguientes mezclas de concreto, tal como lo permite la norma ASTM C566-19. La ecuación para calcular la humedad es Ec.15.

Con los valores de entrada del Cuadro 47, donde se muestran las propiedades del agregado fino, grueso y cemento utilizados, se calcularon las dosificaciones para desarrollar 18 cilindros de concreto de 100 x 200 milímetros, teniendo así 6 especímenes para fallar a 3 edades distintas: 7, 14 y 28. Cabe mencionar que los valores de la humedad del agregado (%W) son 0 para ambos agregados pues al momento de realizar los ensayos de peso unitario de esos materiales, estaban secos al horno, por lo que no poseían humedad.

En el Cuadro 48 se muestra la resistencia esperada a los 28 días, es decir, el  $f'_c$  de diseño y el  $f'_c$  crítico con el que se asegura que ningún espécimen quede con una resistencia menor al  $f'_c$  de diseño. Se utilizó un asentamiento de 75 mm pues al tener partículas metálicas, es importante que la mezcla sea plástica, asegurando así que no habrá una segregación de estas partículas. En el caso de ser muy líquida, le será más fácil a los metales de la mezcla asentarse, debido a su gravedad específica. Aunque el concreto base no lleve partículas metálicas, debe hacerse con el mismo asentamiento que se utilizaría con el diseño que incorpore metal, para poder hacer un estudio comparativo.

En el Cuadro 49 se muestran las dosificaciones requeridas para elaborar el Concreto Base a partir de las condiciones y propiedades de los cuadros 47 y 48. Se incluye un 20% de desperdicio para cada dosificación obteniendo los valores de la columna 4, que son 15,5 kg de cemento, 24,7 kg de agregado fino, 23,4 kg de agregado grueso y 8 kg de agua. En el Cuadro 50 se muestra la cantidad de material por tamiz, requeridos para poder construir 24,7 kg de agregado fino. Por último, en el Cuadro 51 se muestra la cantidad de agua extra requerida, es decir, el agua que se tuvo que agregar durante la fase de mezclado una vez que se acabó el agua dosificada en el diseño, con el propósito de alcanzar una consistencia plástica en la mezcla. Esta agua adicional, cambia la cantidad dosificada por el diseño de mezcla, lo cual aplica para los 3 concretos realizados, por lo que en el Cuadro 134 se muestra cómo varió la relación agua/cemento esta cantidad de agua adicional.

<b>Cuadro 134. Relación agua/cemento experimental.</b>				
Mezcla	Agua extra (gr)	Agua total (gr)	Nueva relación a/c	Incremento
Concreto Base	440	8491	0,55	0,03
Concreto con Limadura	725	9675	0,59	0,04
Concreto con Viruta	515	9298	0,57	0,03

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

Lo que se aumentó la relación agua cemento fue de 0,03 y 0,04. Aunque parezca poco puede tener un efecto en la resistencia del concreto como lo indica el ACI 211.1-91 en el punto 3.5, que la resistencia de un concreto está dada por la cantidad de agua neta utilizada por cantidad de cemento (a/c). Al ver que en todas las mezclas se aumentó una cantidad similar de agua, significa que todas debieron sufrir algún efecto similar en la resistencia, pero este factor común no pudo haber influido, pues solo la del concreto con viruta tuvo una verdadera afectación. Para haber dicho que la adición de agua afectó las resistencias de los concretos, debió haberse notado la misma afectación o similar en las tres mezclas realizadas. Además, el ACI 211.1-91, solo funciona como una guía de diseño, que fue elaborada a partir de agregados y cementos producidos en Estados Unidos. Esta guía se adapta para otros tipos de cemento, como esta lo permite a partir de la norma ASTM C595-20, que incluye diversos tipos de cementos, y aunque el cemento FuerteMax utilizado entre dentro de alguna de estas categorías, es distinto a los cementos estadounidenses. Por esta razón, Las dosificaciones de agua obtenidas con esta guía estándar pueden no siempre ajustarse a los requerimientos del tipo de cemento o agregado utilizados. En las mezclas, como ya se mencionó, se debió añadir, debido a que una vez agregada toda el agua de diseño, el concreto no tenía una consistencia plástica lo suficientemente manejable que permitiera moldear los cilindros antes de que la mezcla fraguara.

En el apartado R3, se muestra todo lo referente al diseño de mezcla del concreto hidráulico con limadura de acero. Para este, con base en la cantidad de agregado fino utilizado en el diseño de mezcla del concreto base, se inicia desarrollando 24,7 kg de agregado fino con limadura de acero, utilizando una sustitución de

35,23%, tal como se muestra en el Cuadro 52. Este porcentaje de sustitución responde a la cantidad de materia prima disponible al momento de realizar la construcción granulométrica, sustituyendo todo lo posible en cada uno de los tamices, sin superar el peso de material retenido que se requería para cada uno. Una vez construida esta cantidad de agregado, se le realizan los ensayos de peso unitario, se obtiene la gravedad específica con la Ec.6 y se obtiene la humedad en sitio. Esta última se obtiene el día que se desarrolla la mezcla, cuyos resultados se muestran en los cuadros 56 para agregado fino y 57 para agregado grueso, cuyos valores son 1,49% y 1,86% respectivamente.

En el Cuadro 58 se encuentran los valores de entrada para la mezcla de concreto con limadura, esta se diseñará para 19 cilindros de concreto, donde 15 se destinarían a fallas a la compresión y 4 para las pruebas de magnetización. Sin embargo, como se mencionó en la metodología, se pudieron moldear con esta cantidad de material 22 cilindros, por lo que se destinaron 18 a fallas y 4 a las pruebas de magnetización. Aquí el valor de la humedad del agregado fino (%W) no es 0, pues el peso unitario de los cuadros 53 y 54 del agregado construido mostrado en el Cuadro 52, se hizo en condición húmeda y esa humedad era de 1,49%. También, involucran los pesos unitarios y gravedades específicas del agregado fino con limadura de acero. Las cantidades de cada material para desarrollar estos cilindros se muestran en el Cuadro 59, en el cual se aprecia que la cantidad de agregado fino requerido es mayor a los 24,7 kg ya desarrollados, pues pasó de una dosificación de 1,59 del Concreto Base a 1,98 para el Concreto con Limadura, este se debe a que su peso unitario establece que en menos volumen entra más peso, por lo que para completar el volumen de concreto requerido, se debe añadir más peso de agregado para ocupar ese volumen, por lo tanto, se construyó más para obtener los 32,4 kg totales requeridos. En el Cuadro 60 se muestran las cantidades de limadura y polvo de piedra totales para completar dichos 32,4 kg de agregado fino, manteniendo siempre el 35,23% de sustitución de acero. De este cuadro, la segunda columna corresponde al total de material retenido que se requiere por tamiz para cumplir con los porcentajes pasando del Cuadro 44. Posteriormente se tiene la columna con los pesos de material retenido de acero disponible para

realizar la construcción granulométrica. En la columna tres y cuatro se muestran los pesos de polvo de piedra y de limadura, respectivamente, utilizados para cada tamiz.

En el Cuadro 61 se muestra la cantidad de agua extra agregada durante la mezcla para alcanzar la consistencia plástica deseada en la mezcla, que corresponde a 725 gr de agua.

Por último, en el Cuadro 62 se muestran los porcentajes de acero en distintas presentaciones, es decir, cuánto acero hay presente en distintos productos del diseño de mezcla. Con respecto a la cantidad de agregado fino, se tiene un 35,23% de limadura de acero. Con respecto a la mezcla total de concreto, un 10,53% corresponde a la limadura de acero. Por último, para cada cilindro de concreto moldeado, se tiene el mismo valor de 10,53% de limadura de acero, ya que la proporción considerando que la mezcla es homogénea se mantendrá en cualquier cantidad que se agarre de la mezcla realizada. Para calcular esto se montaron las siguientes ecuaciones:

$$P.A_m = \frac{V_{a.f.} * 100}{V_T} * \frac{P_{s.a.}}{100} \quad \text{Ec.16.}$$

Donde:

- P.A<sub>m</sub>: Porcentaje de acero en la mezcla.
- V<sub>a.f.</sub>: Volumen de agregado fino de la mezcla.
- V<sub>T</sub>: Volumen total de concreto.
- P<sub>s.a.</sub>: Porcentaje de sustitución de acero en el agregado fino.

$$P.A_c = \left[ \left( \frac{V_c * 100}{V_T} * V_{a.f.} \right) * \frac{P_{s.a.}}{100} \right] * \frac{100}{V_c} \quad \text{Ec.17.}$$

Donde:

- P.A<sub>c</sub>: Porcentaje de acero en el cilindro de concreto.
- V<sub>c</sub>: Volumen del cilindro (interior del molde)

En el apartado R4, se encuentra el diseño de mezcla realizado con viruta de acero. En el Cuadro 63, se muestra la primera construcción granulométrica, basada en la cantidad de agregado fino que se utilizó en la mezcla de concreto base, pero haciendo la sustitución de

35,23% con viruta de acero, de igual manera que como se realizó con el Concreto con Limadura. Con esta cantidad se realiza el ensayo de peso unitario, cuyos resultados están en los cuadros 64 y 65 previamente analizados al igual que la gravedad específica de este material que se encuentra en el Cuadro 66. Las humedades de agregado fino con viruta y agregado grueso se encuentran en los cuadros 67 y 68 cuyos valores son 1,58% y 2,53% respectivamente. Estas humedades de igual manera se obtuvieron secando el material en una plantilla eléctrica como lo permite la norma ASTM C566-19.

En el Cuadro 69 se encuentran los valores de entrada para el diseño de mezcla del Concreto con Viruta de acero. Esta mezcla también se diseñó para 19 cilindros de concreto, pero de igual manera se lograron moldear 22 cilindros con dicha mezcla. Aquí se muestra también una humedad del agregado (%W) de 1,58%, que era la humedad que poseía el agregado fino al momento de realizarse el peso unitario que corresponde al del agregado fino con viruta de acero.

En el Cuadro 70 se muestran las cantidades de material con un 20% de desperdicio para desarrollar estos 19 cilindros. Se ve en la columna dos del Cuadro 71 que se requieren 33,7 kg de agregado fino, por lo que se procede a completar esta cantidad con la que ya se había realizado en el Cuadro 63, manteniendo de igual manera una sustitución por viruta de acero del 35,23%.

En el Cuadro 72 se muestra que se debió agregar 515 gr o ml adicionales a la cantidad de agua dosificada en el Cuadro 70, para alcanzar la consistencia plástica deseada.

De igual manera que con la mezcla correspondiente a la limadura de acero, se calculó el porcentaje de viruta de acero presentes en el agregado fino, en toda la mezcla de concreto y en un cilindro moldeado con esta mezcla, dichos valores se encuentran en el Cuadro 73 y son 35,23%, 10,53% y 10,53% respectivamente, igual que con el concreto con limadura de acero, esto utilizando las ecuaciones Ec.16 y Ec.17.

Los tres diseños de mezcla llevaron un procedimiento similar de elaboración, pues todos poseían la misma base de los parámetros de diseño, como si se tomara una receta, pero además de realizarla tal cual es, se desarrolla otras dos veces, pero variando algunos ingredientes para ver cómo resulta. En este caso, ese "ingrediente" que se varió fue el agregado fino,

utilizando uno con viruta de acero y otro con limadura de acero.

En el siguiente cuadro se muestra en comparativa, las resistencias para las cuales se desarrollaron los tres diseños de mezcla y los resultados experimentales de cada una. Estos resultados se analizan más adelante.

<b>Cuadro 135. Comparación entre resistencias teóricas de los diseños de mezcla y las experimentales obtenidas en las fallas de cilindros.</b>			
Diseño de mezcla	$f_c$	$f_{cr}$	$f_c$ experimental
Concreto Base	27,4586	35,7586	28,0417
Concreto con Limadura	27,4586	35,7586	35,3650
Concreto con Viruta	27,4586	35,7586	10,4760

Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

## Elaboración de mezcla y moldeo de especímenes de concreto (ASTM C192-19)

Para las 3 mezclas de concreto realizadas en el laboratorio, se siguieron los mismos pasos, de igual manera con el moldeo.

En estos procesos de moldeo se presentaron algunos inconvenientes, los cuales se muestran en el Cuadro 84, donde se aprecia que a algunos cilindros de concreto base y concreto con limadura de acero (CB y CL) se les debió agregar concreto al final del proceso de moldeo para poder enrazar adecuadamente los especímenes y que la superficie quedara lisa, pues en algunos casos el nivel del concreto quedaba por debajo del borde del molde. De no haberse hecho así, los resultados en las fallas no serían confiables pues una superficie irregular en alguna de las caras del cilindro ocasiona lecturas erróneas y genera variaciones atípicas entre los datos, como lo menciona el ACI 214RS-11. También, en uno de los cilindros se dieron dos envarillados de más para la segunda capa, sin embargo, no parece haber tenido efecto alguno en las resistencias obtenidas. Por último, con respecto al concreto con viruta, este presenta una composición gruesa, debido a que la viruta ocasionó que el concreto se apilotara, ya que las partículas poseen forma alargada y no circular,

impidiendo un adecuado acomodo de los elementos en la mezcla. Debido a esto quedó en los cilindros, una superficie bastante porosa, con vacíos perceptibles a simple vista. Por supuesto, los grumos generados por la viruta dificultaron su envarillado, ya que era muy difícil lograr que la varilla penetrara lo suficiente y un ineficiente envarillado puede afectar la resistencia a los 28 días, tal como lo indica el ACI 214RS-11 en la Tabla 3.1 donde se menciona una "Colocación y consolidación deficientes". Sin embargo, no podían darse más de los 25 envarillados por capa y al haber varios que no penetraban hasta atravesar a la capa inferior, afectó su compactación, a pesar de luego vibrar con el mazo. Luego con el cilindro CL7, se dieron 2 envarillados de más en la última capa, aunque esto no tuvo algún efecto adverso en su resistencia. Por último, algunos de los cilindros de Concreto Base y Concreto con Limadura requirieron más mezcla en la superficie una vez finalizados los procesos de envarillado y vibrado, para poder enrazar la superficie final del cilindro pues en el proceso de enrazaado no quedaba al nivel del molde, dejando vacíos que afectarían las fallas de compresión.

Todos los cilindros cumplían con la relación longitud-diámetro (L/D) mayor a 1,75 establecido por la norma ASTM C39-18.



Figura A8. Envarillado de la mezcla para la elaboración de los especímenes de concreto según la norma ASTM C192-19. Fuente: Elaboración propia.



Figura A9. Vibrado por medio de los golpes con el mazo al molde para la elaboración de los especímenes de concreto según la norma ASTM C192-19.  
Fuente: Elaboración propia.



Figura A10. Enrazado de la cara superior del cilindro de concreto según la norma ASTM C192-19.  
Fuente: Elaboración propia.

## Fallas a la compresión de Cilindros (ASTM C39-18)

Para el Concreto Base, cuyo diseño de mezcla se realizó para un  $f'_c$  de  $280 \text{ kg/cm}^2$  o  $27,46 \text{ MPa}$ , sí se alcanzó a los 28 días.

La resistencia de los especímenes se obtuvo a los 7, 14 y 28 días. El Cuadro 74 muestra las características de los especímenes fallados a 7 días y las resistencias obtenidas. En el Cuadro 75 se muestran los datos para las fallas a 14 días y en el Cuadro 76 se muestran los datos obtenidos en las fallas a 28 días ( $f'_c$ ). Se puede observar a nivel general que las resistencias a los 7 días oscilan entre  $14,6$  y  $20,5 \text{ MPa}$ , teniendo así valores cercanos y algunos superando un poco los valores esperados, esto pues el cemento FuerteMax es de alta resistencia inicial permitiendo que el concreto a los 7 días logre una resistencia mínima de  $20 \text{ MPa}$ , según la ficha técnica del cemento. A los 14 días las resistencias oscilaron los  $27 \text{ MPa}$  aproximadamente, alcanzando ya la resistencia de diseño, por lo que a los 28 días por supuesto el  $f'_c$  se alcanzaría, llegando incluso a los  $29 \text{ MPa}$ .

Cada espécimen fallado se fotografió y se analizó para observar el tipo de falla según la Figura R12. También, se buscaban señales de mala compactación, problemas de segregación de agregados o burbujas de aire internas. En las figuras de la R13 a la R33 se muestran los cilindros de Concreto Base fallados.

A nivel general, la mayoría de estos cilindros quedaron con algunos vacíos o grietas superficiales en la sección inferior del cilindro que pudo ser producto de la consistencia del concreto o de alguna inconsistencia en el envarillado de la primera capa del moldeo, pero a lo interno no se observó burbujas de aire ni una mala compactación. La mayoría generaron grietas verticales y algunos desprendimientos de los bordes, como se muestra en el Cuadro 83, el tipo de falla que dominó, según la Figura R12, fue la Tipo 3.

Para el concreto con limadura, se muestra en los cuadros 77, 78 y 79, los resultados de la falla a compresión para 7, 14 y 28 días respectivamente. Al comparar las resistencias con el concreto base es muy notorio que este concreto lo superó, tanto a los 7, 14 y 28 días, debido a la limadura sustituida en el agregado fino, pues fue el único "ingrediente" o componente de la mezcla que se modificó. Con el Cuadro 79 sí se tiene una

pequeña diferencia y es que se añaden 2 cilindros más, para un total de 8 cilindros fallados a los 28 días. Estos 2 cilindros, como se menciona en el mismo cuadro, son magnetizados, es decir, se sometieron al campo magnético del solenoide con 400 espiras y alimentado con 6A (máxima capacidad de la fuente), por un lapso de un minuto, antes de fallarlos a compresión. Al magnetizarlo por un tiempo dado, las partículas pueden que generen cierta atracción entre sí, incluso cuando se retire el campo magnético, por esto se realiza para evaluar si tienen algún efecto en la resistencia  $f_c$ , pues si las partículas quedan con cierta atracción, esta leve fuerza se hace más grande al sumar todas las interacciones que haya entre 2 partículas, de ser así, puede aumentar la resistencia pues existe una fuerza interna que retrasa la falla. En caso contrario, si no hubiera una fuerza interna producto de la magnetización, las resistencias deberían ser similares a las del concreto que no se magnetizó.

En cuanto a los cilindros fallados, estos se muestran en las figuras de la R34 a la R54. En su mayoría presentan una combinación de falla de tipo 3 y tipo 5. A pesar de que poseen metal en la mezcla, no se observó marcas de oxidación ni a nivel superficial ni a nivel interno.

En las figuras de la R92 a la R123, se puede observar que en los cilindros fallados, incluso desde el día 7, ya muestran marcas de oxidación en las partículas de acero más expuestas. A nivel interno del cilindro, esto no ocurre, pues al cubrirse la viruta con material cementicio (pasta de la mezcla) esto ayuda a evitar que se oxide, o al menos retarda ese proceso de corrosión.

También, debido a la porosidad a causa de la superficie irregular del cilindro, a diferencia de la limadura que posee partículas redondeadas y forman un polvo, la viruta posee partículas alargadas, las cuales forman una especie de "telaraña" pues se traban entre sí. Esto además, como se analizó con la Figura A4, no va a permitir un correcto acomodo de las partículas para llenar los vacíos entre el agregado grueso. Esto sumado a la dificultad para envarillar la mezcla en el proceso de mezclado, debido a la traba que genera la misma viruta, lo cual ocasionó que las resistencias de esta mezcla de concreto no cumplieran con el diseño de mezcla e incluso que quedarán muy por debajo de lo esperado, es decir, de las resistencias del concreto base que se utilizan como patrón. Esto se puede observar en

los cuadros 80, 81 y 82 para 7, 14 y 28 días respectivamente. El Cuadro 82, también muestra dos cilindros más que fueron magnetizados por el campo magnético del solenoide con 400 espiras y alimentado con 6A por un lapso de un minuto, para evaluar si esta exposición afecta o varía la resistencia con respecto al  $f_c$ .

La mayoría de los cilindros elaborados con viruta de acero, no mostraron evidencia superficial de falla, aunado a que la superficie de estos, por su porosidad, no permitían evidenciar dichas fallas. De los pocos cilindros a los que se les pudo visualizar un patrón de falla, variaban mucho, habiendo fallas de tipo 2, 3, 4 y 6, como se muestra en el Cuadro 83. Al momento de las fallas, se determinaba que el cilindro había fallado, debido a que la lectura del equipo de falla dejaba de leer resistencia y este era detenido por el técnico, la mayoría de los cilindros no presentaron deformaciones o grietas visibles, por lo que se puede pensar que la viruta en la matriz puede generar una especie de malla que junto a la porosidad del cilindro le permite tener mayor elasticidad evitando fallas excesivas. Entonces al obtener la lectura de falla, esta puede ser interna o superficial, pero no visible, debido a la superficie tan rugosa y porosa.

## **Análisis estadístico para datos de resistencia a compresión**

Los grupos de datos son de pocas muestras cada uno y de primera entrada algunos grupos parecen tener mucha variación o irregularidad. Por supuesto, no se puede determinar si tienen un comportamiento normal por la poca cantidad de muestras, por lo que se estudian los datos con respecto a los parámetros de los análisis de datos de las normas. Iniciando con la resistencia patrón (Concreto Base) a las 3 edades de fallas a la compresión en el Cuadro 85, donde se muestra la desviación estándar ( $s$ ), la varianza ( $v$ ), la media ( $\bar{x}$ ) y el coeficiente de variación ( $C_v$ ).

Para los datos a 7 días se tiene un coeficiente de variación de 12,83%, lo que indica que la desviación estándar es alta con respecto al promedio de los datos, lo cual refleja que estos están separados unos de otros y hay una variación considerable entre ellos. Esto refleja que a los 7 días no se obtuvieron datos precisos de las resistencias del concreto base. A los 14 y 28 días

esto cambió, pues los valores de desviación estándar disminuyeron, obteniendo valores menores a 2 MPa, los cuales se compararán con los parámetros que establecen las normas. Si se analiza el coeficiente de variación para el  $f_c$  con la norma ACI 214RS-11, veremos en el Cuadro 91, que el control de calidad se cataloga como “regular”, pues podemos ver en la Figura A13 que un coeficiente de variación con un valor entre 4-5 cae en esta categoría. Esto quiere decir que no hubo tanta homogeneidad en la preparación de los especímenes y pudo haber factores que alteraron la varianza de estos resultados.

De acuerdo con la Tabla 3.1 de esta misma guía, mostrada en la Figura 11 de este documento, la única posible fuente de variación que se considera dentro de la tanda para el Concreto Base es “Colocación y consolidación deficientes” como ya se mencionó anteriormente, y esto se debe a que la parte inferior o base de la mayoría de los cilindros moldeados con Concreto Base, principalmente en los especímenes CB9 y CB13-CB18, no quedaron lisos en su superficie, indicando quizás un deficiente proceso de envarillado o golpeteo con el mazo para el vibrado. Otra posible causa, puede ser la cantidad de agua necesaria para una correcta trabajabilidad tal como lo indica el ACI 211.1-91, en donde por el tiempo de moldeo, la mezcla pudo haberse fraguado un poco reduciendo su trabajabilidad, afectando principalmente a los últimos cilindros moldeados.

En cuanto a la falla de los cilindros, esto no se considera dentro de las fuentes de error ya que el equipo de falla fue calibrado antes de que las fallas se llevaran a cabo, además de que el personal que las ejecutó estaba calificado para esto y todos los cilindros fueron desmoldados a  $24 \pm 6$  horas después del moldeo.



Figura A11. Cilindros moldeados y cubiertos para un curado inicial adecuado previo a su desmolde.  
Fuente: ASTM C192-19.

En la Figura A11 se puede observar que los cilindros una vez moldeados, se cubrieron para

evitar que el agua de mezcla se evapore, antes de ser desmoldados. El curado se llevó siempre bajo control en una cámara húmeda la cual mantenía su temperatura y humedad como se muestra en la Figura A12. Allí se mantuvieron los cilindros hasta la edad de falla de cada uno. También, una vez desmoldados, se incorporaron de inmediato a dicha cámara para un curado eficiente.



Figura A12. Temperatura y humedad de la Cámara húmeda donde se llevó a cabo el curado de los especímenes.  
Fuente: ASTM C192-19.

Para cada edad, se realizó también un histograma y un boxplot para observar el comportamiento de los datos. Para los datos a 7 días, en las figuras R76 y R77, se puede notar un leve sesgo en los datos. El histograma muestra la media corrida hacia la derecha que es donde están la mayor cantidad de datos agrupados, que por la frecuencia sabemos que son dos datos. De igual manera que en el boxplot, la mediana se encuentra más cerca del tercer cuartil que del primer cuartil.

Para los 14 días, las figuras R78 y R79, muestran el histograma y boxplot respectivamente, mostrando en ambos un dato que a primera vista parece ser atípico y genera sesgo en los datos, pues como se observa se aleja del resto de datos, generando en el Boxplot que el bigote inferior se extienda. A pesar de esto la varianza y desviación estándar se encuentran por debajo de 2 y el coeficiente de variación es el menor de las tres edades lo que indica que no hay mucha variación entre los datos a excepción de este que se aleja un poco del resto. Si se observa el Gráfico 6, podemos ver que todos los datos se

encuentran dentro de  $2\sigma$ . Por esto no se considerará este dato de 25,2 atípico, en especial, porque son las resistencias a 14 días.

Cuando observamos las resistencias a 28 días para este concreto, se ve un leve sesgo en las figuras R80 y R81, a pesar de una distribución homogénea de los datos como se observa en el histograma. Sin embargo, observando el Gráfico 7, los datos se encuentran casi todos dentro de  $1\sigma$  y ninguno por fuera de  $2\sigma$ . Siendo este el límite máximo de aceptación para considerar los datos aceptables pues el ACI 214RS-11 indica que dentro de  $2\sigma$  debe entrar el 95,45% de los datos y al tratarse en este caso de muestras tan pequeñas, las varianzas y desviaciones pueden ser mayores, por lo que se amplía el rango de aceptación a  $2\sigma$ . Esto junto con la desviación estándar, pues si algún dato está dentro de los límites de  $2\sigma$  y la desviación estándar del grupo es alta, quiere decir que el dato puede estar generando mucha variación.

Para corroborar los datos también se muestran los cuadros 88, 89 y 90 donde se muestra el límite para el coeficiente de variación aceptable para la norma ASTM C39-18, que es la variación esperada en la resistencia de un grupo de especímenes elaborados a partir de una misma mezcla de concreto y con la misma edad. También, se muestra el rango aceptable entre dos cilindros ( $d2s\%$ ) con el cuál se establece si los cilindros pueden ser o no parte de la muestra. En el Cuadro 88 se puede observar que entre las resistencias de 20,5 y 18,7 MPa sí entran en este rango de 9%, lo que quiere decir que el resto de las resistencias fuera de este rango deberían ser descartadas. En los cuadros 89 y 90 sucede lo mismo con los datos, quedando al menos un valor fuera de la muestra. Sin embargo, al ser pocas las muestras, se acepta que la dispersión se de en un rango de hasta  $2\sigma$  para aceptar que los datos sean parte de la muestra, teniendo en cuenta que la norma ASTM C670-15 permite para 6 cilindros hasta  $4\sigma$ , debido a esto no se eliminará ningún dato por el  $d2s\%$ . Este rango de aceptación para el  $d2s\%$  se calcula con la ecuación Ec. .

El coeficiente de variación según la norma ASTM C39-18, no se cumple en ninguna de las 3 edades lo que quiere decir que la desviación estándar es alta para el valor promedio de los datos, pero al evaluar la permisibilidad de la norma ASTM C670-15, los tres grupos de datos entran dentro del rango de  $4\sigma$  y en los gráficos de límites

para 1 y 2 sigma, todos caen dentro de estos parámetros.

Los gráficos 6, 7 y 8 muestran los datos de cada edad en forma de histograma utilizando frecuencia en el "eje y", pero mostrando la media, los límites  $1\sigma$ ,  $2\sigma$  y el máximo y mínimo permitido por la norma ASTM C670-15. Estos últimos datos son los mostrados en el Cuadro 87 en la columna cuatro.

Ya en el gráfico 4 se muestra la curva de resistencia del Concreto Base con las 3 edades de falla, cumpliendo con el  $f'c$  del diseño de mezcla.

Para el Concreto con Limadura, se tiene un mejor comportamiento de los datos. En las figuras de la R82 a la R87 se pueden observar los histogramas y boxplot para las tres edades, siendo los datos obtenidos a los 28 días, los que presentan un comportamiento normal, beneficioso por ser los datos que determinan el  $f'c$ .

Ahora bien, en el Cuadro 92 se encuentra la estadística descriptiva para este concreto, donde se evidencia la disminución del coeficiente de variación para las edades, donde por supuesto, según lo mencionado el párrafo anterior, los datos a 28 días ( $f'c$ ) poseen la menor varianza. Este comportamiento de los datos, como se observa en el Cuadro 96 permite que cumpla con lo estipulado en la ASTM C670-15. Para estos datos no se considera comparar el coeficiente de variación con el estipulado por la norma ASTM C39-18, ya que esta indica que estos valores aplican para cilindros de 100x200mm con resistencias entre 17 y 32 MPa. Para las edades de 7 y 14 días como se muestra en los cuadros 94 y 95 respectivamente, no se cumple con el coeficiente de variación de la norma ASTM C39-18, pues el valor es mayor a 3,2, además de que con el rango para el  $d2s\%$  utilizando la Ec.7 quedarían algunos de los datos fuera de la muestra pues se encuentran fuera del 9%. En el Cuadro 96 no se muestra el límite de coeficiente de variación pues la norma establece que para cilindros de 100x200 mm este límite aplica solo para resistencias de entre 17-32 MPa, por lo que las resistencias obtenidas a 28 días no entran en este rango ya que están por encima llegando hasta 35 MPa, además con respecto al  $d2s\%$  no correspondería eliminar ningún dato pues todos entran dentro del 9% aceptable. Por otra parte para el rango del  $d2s\%$ , como ya se mencionó, no se eliminará ningún dato por la poca cantidad de muestras, siempre que cumplan también con el rango de  $2\sigma$ .

Al no haber datos atípicos considerables, una vez analizados los gráficos 9, 10 y 11, ya que todos los datos se encuentran dentro de los límites de  $2\sigma$ , el Gráfico 8 se mantiene tal cual, pero obsérvese bien que el  $f'c$  es mucho mayor al del diseño de mezcla.

En el Cuadro 97 se puede observar que, según la guía ACI 214RS-11, el coeficiente de variación da como resultado una condición de elaboración de especímenes o control de calidad "Muy bueno", según la Figura A14 para  $f'c > 35\text{MPa}$ .

Recordando que para el Concreto con Limadura, a los 28 días se fallaron 2 cilindros adicionales luego de haber sido magnetizados, se muestra en el Cuadro 98 la estadística descriptiva para estos 2 datos. Al comparar el  $f'c$  de los cilindros sin magnetizar ( $\bar{x}=35,4\text{ MPa}$ ) con los cilindros fallados luego de ser magnetizados ( $\bar{x}=31,8\text{ MPa}$ ), a simple vista se puede indicar que ambos datos difieren uno del otro. Para corroborar esto se aplicó una "Prueba t" en el software Minitab 19, y así comparar las medias de ambas muestras. En el Cuadro 99 se puede apreciar que el valor p de estas muestras es mayor al nivel de significancia de 0,05 por lo que la Hipótesis nula se acepta, concluyendo así que no hay diferencia entre las medias del  $f'c$  contra las resistencias de los cilindros fallados después de exponerse al campo magnético. En la Figura R88 se puede observar el boxplot de ambas muestras, donde el punto en cada caja marca la media de las muestras y curiosamente para ambas muestras coincide con la mediana. También, se puede apreciar que ambas muestras poseen una distribución normal pues no se evidencia gran sesgo en ninguno de los boxplot, lo que permite aceptar el valor de p al ser dos muestras pequeñas (<15 datos).

El Concreto con Viruta muestra valores más variables y esto se nota con solo observar el Cuadro 100 con la estadística descriptiva para las resistencias de este concreto. Las varianzas y coeficientes de variación son altos, pero especialmente para la edad de 28 días, es decir, para obtener el  $f'c$  que es el valor más importante.

Al analizar los datos en las figuras de la R89 a la R94, principalmente en los boxplot, se observa cierto sesgo, sin embargo, el mayor sesgo lo posee la resistencia a los 28 días, pues el bigote superior o "Ls" como aparece en algunos textos, pareciera tender a un dato atípico, pues se aleja mucho de la caja y puede ser la razón que

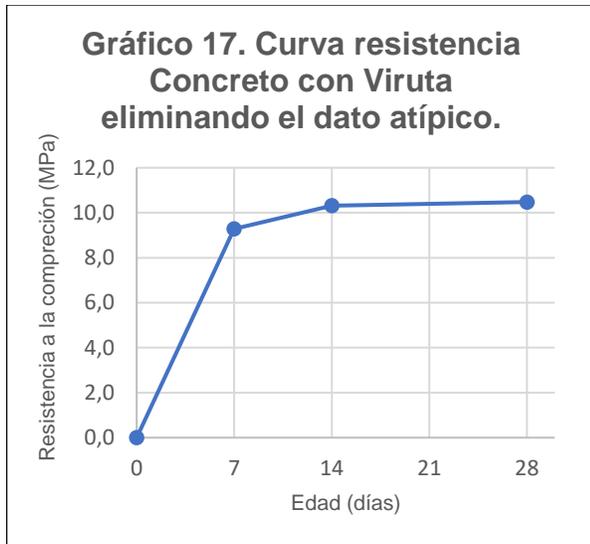
perjudica el coeficiente de variación y la varianza de los datos. En las figuras R95 y R96 se decide incorporar a las fallas a 28 días los datos de los cilindros magnetizados, sin embargo el comportamiento del boxplot continúa igual, es decir con un dato que extiende el bigote superior.

En el gráfico 12, se muestra una primera curva de resistencia para el Concreto con Viruta, donde se aprecia que las resistencias son mucho menores a las del Concreto Base y no se alcanzó la resistencia de diseño.

Este concreto al no superar los 17 MPa mínimos estipulados por la norma ASTM C39-18 a los 28 días, implica que tampoco se aplica el límite que esta establece para comparar el coeficiente de variación, por lo que solo se analiza el  $d2s\%$  con respecto a la ASTM C39-18, como se muestra en los cuadros 102, 103, 104 y 105. En la columna uno de cada cuadro, el último intervalo es el que cumple con la norma ASTM C39-18, con el límite aceptable del 9%. Esto quiere decir que los valores fuera de dicho rango de resistencias deberían eliminarse, sin embargo, siempre que la desviación estándar sea baja y los datos entren dentro de  $2\sigma$ , ningún dato será eliminado, debido a la poca cantidad. Se puede observar que en los gráficos 13 y 14, todos los valores están dentro de  $2\sigma$ .

En el Gráfico 15, donde se observan los datos para los 28 días, uno de los datos está casi sobre el límite de  $2\sigma$ , mientras el resto de datos todos caen dentro de  $1\sigma$ . Debido a esto, el dato de 15,7 MPa se considera atípico, considerando también que este aumenta la varianza y la desviación estándar, afectando el resultado para determinar si el  $f'c$  del Concreto con Viruta es estadísticamente correcto.

Al eliminar este dato atípico, se puede observar en el Gráfico 16, que ya no hay sesgo en los datos de resistencia a 28 días, quedando casi todos dentro de  $1\sigma$ . Sin embargo, eso repercute en el promedio del  $f'c$  pues disminuye su valor, obteniendo así en el Gráfico 17 la nueva curva de resistencia para el Concreto con Viruta.



Fuente: elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

Nota: este se encuentra también en la sección de Resultados.

En el Cuadro 106 se muestra la estadística descriptiva para los datos de las resistencias a los 28 días sin el valor atípico (28 S.a.) y para los cilindros fallados luego de magnetizados (CV M), también a 28 días. Estos poseen una muy baja desviación estándar y varianza, pero se puede notar que aun así el coeficiente de variación es alto pues la media de los datos es baja, entonces la desviación estándar respecto a la media, es más significativa, si los cilindros de concreto con

limadura hubieran alcanzado resistencias mayores y la media fuera por ejemplo la de diseño de 28 MPa, el coeficiente de variación para "CV M" sería  $(0,37/28) \cdot 100$  dando como resultado 1,32. Sin embargo, debido a la distribución de datos del gráfico 16 y las desviaciones y varianzas de las resistencias sin el dato atípico, se considera que los datos son estadísticamente aceptables pues no tienen tanta dispersión.

Con respecto a los datos de los cilindros fallados a los 28 días luego de haber sido magnetizados, se muestra en el Cuadro 7 la prueba t para dos muestras realizada en el software Minitab, donde se obtuvo un valor p menor al nivel de significancia, es por esto por lo que se rechaza la Hipótesis nula, concluyendo que hay una diferencia significativa entre las medias de las dos muestras. Esto también se valida con la Figura R97, pues se puede observar en ambos boxplot, que ninguno posee un sesgo significativo, siendo válido el p obtenido de la prueba t, a pesar de tener muestras con pocos datos (<15 datos).

Por último, comparando el coeficiente de variación de los datos de las resistencias a 28 días del Concreto con Viruta con la Tabla 4.3 (Figura A13), indica que el control de calidad en la elaboración de los especímenes es malo, debido a la resistencia alcanzada. Pero considerando la baja desviación estándar y varianza, también se podría decir que los resultados son consistentes, pues no difieren mucho uno de otros.

**Tabla 4.3—Estándares de control del concreto para  $f_c' \leq 35$  MPa (5000 lb./pulg.<sup>2</sup>)**

Variación general					
Clase de operación	Desviación estándar de diferentes estándares de control, MPa (lb./pulg. <sup>2</sup> )				
	Excelente	Muy buena	Buena	Regular	Mala
Ensayos generales de construcción	Por debajo de 400 (por debajo de 2.8)	400 a 500 (2.8 a 3.4)	500 a 600 (3.4 a 4.1)	600 a 700 (4.1 a 4.8)	Por encima de 700 (por encima de 4.8)
Tandas de ensayo en laboratorio	Por debajo de 200 (por debajo de 1.4)	200 a 250 (1.4 a 1.7)	250 a 300 (1.7 a 2.1)	300 a 350 (2.1 a 2.4)	Por encima de 350 (por encima de 2.4)
Variación dentro de la tanda					
Clase de operación	Coeficiente de variación de diferentes estándares de control, %				
	Excelente	Muy buena	Buena	Regular	Mala
Ensayos de control en obra	Por debajo de 3.0	3.0 a 4.0	4.0 a 5.0	5.0 a 6.0	Por encima de 6.0
Tandas de ensayo en laboratorio	Por debajo de 2.0	2.0 a 3.0	3.0 a 4.0	4.0 a 5.0	Por encima de 5.0

Figura A13. Tabla 4.3 del ACI 214RS-11 para estándares de control de calidad de los datos para obtener el  $f_c$  de una mezcla de concreto. Fuente: ACI 214RS-11.

Tabla 4.4—Estándares de control para $f'_c \geq 35$ MPa (5000 lb./pulg. <sup>2</sup> )					
Variación general					
Clase de operación	Coeficiente de variación de diferentes estándares de control, %				
	Excelente	Muy buena	Buena	Regular	Mala
Ensayos generales de construcción	Por debajo de 7.0	7.0 a 9.0	9.0 a 11.0	11.0 a 14.0	Por encima de 14.0
Tandas de ensayo en laboratorio	Por debajo de 3.5	3.5 a 4.5	4.5 a 5.0	5.0 a 7.0	Por encima de 7.0
Variación dentro de la tanda					
Clase de operación	Coeficiente de variación de diferentes estándares de control, %				
	Excelente	Muy buena	Buena	Regular	Mala
Ensayos de control en obra	Por debajo de 3.0	3.0 a 4.0	4.0 a 5.0	5.0 a 6.0	Por encima de 6.0
Tandas de ensayo en laboratorio	Por debajo de 2.0	2.0 a 3.0	3.0 a 4.0	4.0 a 5.0	Por encima de 5.0

Figura A14. Tabla 4.4 del ACI 214RS-11 para estándares de control de calidad de los datos para obtener el  $f'_c$  de una mezcla de concreto. Fuente: ACI 214RS-11.

## Comparación de los $f'_c$ de las distintas mezclas realizadas

Comenzando con el Gráfico 18, se puede observar la curva de resistencia de las tres mezclas de concreto realizadas. Podemos ver que el  $f'_c$  del Concreto con Limadura es mayor al Concreto Base y que el Concreto con Viruta es bastante deficiente pues su resistencia no alcanzó ni la mitad del valor del Concreto Base.

Para poder decir si la diferencia entre estos  $f'_c$  es realmente significativa, como para considerar una mejora en la resistencia por parte del Concreto con Limadura o definir que el Concreto con Viruta no es eficiente, se realiza una prueba t para dos muestras entre: Concreto con Limadura-Concreto Base y Concreto con Viruta-Concreto Base.

Para ambas comparaciones como se muestra en los cuadros 109 y 110 donde sus resultados, obtenidos con el software Minitab, declararon un valor de p para ambos casos igual a 0,000. Esto quiere decir, que al ser un valor menor al nivel de significancia, hay una diferencia significativa entre las medias de las muestras. De acá lo que se puede definir es que el Concreto con Limadura, aumentó su resistencia gracias a las partículas de limadura incorporadas en la mezcla. Dicho aumento de la resistencia representa aproximadamente un 26% respecto al concreto

patrón. Mientras que el Concreto con Viruta vio afectada su resistencia, debido a sustitución de viruta en el agregado fino. Esta afectación fue de

aproximadamente un 62% menos con respecto al concreto patrón.

Estos valores de p y por ende las conclusiones pueden ser tomadas como verdaderas para ambos casos, pues si se observan las figuras R98 y R99, los boxplot mostrados no evidencian sesgos significativos en los datos, siendo aceptable para muestras pequeñas (<15 datos).

## Electroimán teórico

Para poder realizar una bobina fue necesario diseñarla teóricamente con tal de establecer un comportamiento de esta para así, tener un punto de comparación con los resultados obtenidos a nivel experimental. La diferencia entre el resultado teórico y el experimental es la cantidad de acero y su presentación dentro del núcleo del solenoide. Con la bobina mostrada en la Figura R101, se calculó la fuerza y campo magnético que tendría esta bobina de tener un núcleo completamente en acero 1020. Sin embargo, a nivel experimental, el acero 1020 colocado en el núcleo fue en forma de viruta y limadura, envuelto

completamente en una matriz de concreto hidráulico homogéneo.

En el Cuadro 111 se muestran las características de este electroimán teórico. En el Cuadro 112 se muestra la alimentación del electroimán, que sería 6A y 21V circulando por 400 espiras, ya que esta era la corriente máxima alcanzada por la fuente de Corriente Directa que se tenía a disposición. Como resultado de esto, en el Cuadro 113 se muestran los valores del campo magnético que experimentaría este electroimán teórico en una de las caras, además de la fuerza de adherencia que tendría sobre la superficie de uno de los extremos.

### **Medición de fuerza de adherencia y campo magnético del Concreto con Viruta y Concreto con Limadura**

De los 22 cilindros realizados para cada mezcla de concreto ferromagnético, se destinaron 2 cilindros para realizar mediciones del campo magnético producido en el concreto. Sin embargo, no se contaba con un gaussímetro que permitiera medir dicho campo directamente.

Al intentar medir dicha fuerza en la máquina "Versa Tester", como se muestra en la Figura A15, no hubo lectura de fuerza alguna requerida para separar el imán de Neodimio de 10 milímetros de diámetro con el que se pretendía medir la fuerza de adherencia de este al concreto. Al no tener una alta sensibilidad el anillo utilizado en esta prueba se procedió a construir un instrumento que brindara valores más acertados.



Figura A15. Prueba de medición de adherencia al concreto de imán de Neodimio en máquina "Versa Tester".  
Fuente: Elaboración propia.

Este instrumento construido es el mostrado en la Figura R102, donde se creó una balanza de un apoyo ubicado justo en el centro y en uno de los extremos una pieza de acero en la cual se sujetaría el imán, mientras que en el otro una bandeja en la cual se pudiera agregar peso. Ambos extremos por supuesto debían pesar lo mismo para que el sistema estuviera en equilibrio como se muestra en las siguientes figuras.



Figura A16. Peso de la pieza de metal junto con los imanes y el alambre que los sujeta.  
Fuente: Elaboración propia.



Figura A17. Peso de la bandeja junto el alambre que la sujeta.  
Fuente: Elaboración propia.

El objetivo con este instrumento era medir la fuerza de adherencia que tenía el imán en el concreto ferromagnético con 0A, 1A, 2A, 3A, 4A, 5A y 6A. Con estas fuerzas de adherencia se podría despejar el campo magnético con la ecuación Ec.5. La que se interpreta como fuerza de adherencia es el peso adicional que se añadiera a la bandeja hasta el punto en que el imán se separara, dicho peso se consideró como la fuerza necesaria para despejar el imán o en otras palabras, la fuerza de adherencia.

En los cuadros 114 y 116, tenemos las mediciones hechas para los 2 especímenes de Concreto con Viruta CV6 y CV9. Se puede notar que para cada medición se tomaron 2 valores de fuerza de adherencia. Para obtener la fuerza de magnetización producto de la inducción electromagnética del solenoide, se calculó con la siguiente ecuación.

$$F_m = Fa_{Cn} - Fa_0 \quad \text{Ec.18.}$$

Donde:

- $F_m$ : Fuerza de magnetización.
- $Fa_{Cn}$ : Fuerza de adherencia para una corriente dada.
- $Fa_0$ : Fuerza de adherencia obtenida a 0A.

Ya luego en los cuadros 115 y 117 se muestran las fuerzas magnéticas promediadas, que corresponden, para cada amperaje, al promedio de las fuerzas de magnetización de la columna 4 de los cuadros 114 y 116 respectivamente. Estas fuerzas se dan en gramos fuerza (grf), kilogramos fuerza (kgf) y Newtons (N), siendo esta última unidad la requerida para despejar el campo magnético en unidades de Tesla (T).

Posteriormente, para obtener la fuerza de magnetización representativa del material, se promediaron los valores de los cuadros 115 y 117 ubicados en la segunda columna de cada uno. Y se obtuvo así los valores del Cuadro 118. Estos se graficaron para obtener una proyección de fuerza de magnetización versus corriente eléctrica. Estas fuerzas obtenidas son bastante pequeñas en comparación a lo que se hubiera esperado, debido a los cálculos teóricos, sin embargo, se posee un comportamiento creciente de los valores con forme se aumenta el amperaje, tal como sucede en los electroimanes. En los gráficos 19 y 20, se puede observar esas proyecciones. Para el Gráfico 19 fue una proyección polinómica, obteniendo así una ecuación de grado 2 con su respectivo  $R^2$  de valor 0,9986, esta ecuación es  $y = -0,0002x^2 + 0,0091x + 0,0006$  donde "y" es la fuerza de magnetización ( $F_m$ ) y "x" es la corriente. Para el Gráfico 20, la proyección es lineal donde su ecuación está asociada a un valor  $R^2$  igual a 0,9966, esta es  $y = 0,0079x + 0,0016$ . Recordando que entre más cercano a 1 esté el valor del  $R^2$  más acertada es la línea de tendencia a los valores del gráfico, por lo que ese ajuste, ya sea lineal, polinómico, exponencial, entre otros, corrobora que hay relación entre las variables de la ecuación. En caso de tener valores de  $r^2$  muy pequeños, indica que no hay relación entre las variables, pues la proyección no se ajusta de manera adecuada a los pares ordenados. Con estas ecuaciones, se hace una proyección de la fuerza de magnetización a distintos amperios, cuyos resultados se muestran en el Cuadro 119.

En este cuadro, en la columna 1 y 2 posee los primeros valores en negrita, estos representan el máximo valor alcanzado para la fuerza de adherencia con proyección polinómica, pues si se ve los siguientes amperajes, nos percatamos que conforme se aumente el amperaje, esta fuerza bajará hasta llegar a 0. En las columnas 3 y 4 se tiene que la proyección lineal para Concreto con Viruta permite que dicha fuerza aumente con forme se aumente el amperaje, sin embargo,

vemos que la fuerza ni siquiera alcanzaría 1 kgf con una corriente de 100A. Todo esto considerando el mismo sistema con el que se realizaron las mediciones.

Para validar estas fuerzas de magnetización, se aplicó en los datos de los cuadros 114 y 116, una prueba de confiabilidad en los datos. Estos se agruparon por medición tal y como se muestra en el Cuadro 120, donde por medio del software Minitab, se analizaron los datos para obtener el alfa de Cronbach, un parámetro que determina la confiabilidad de los datos. Los mostrados en esta tabla indican que los valores de las mediciones C, E y F son confiables, todos se encuentran por arriba de 0,7. Los demás, al ser negativos, indican que son inconsistentes, por lo que no son confiables para ser considerados en el análisis. Esta inconsistencia puede provenir de las lecturas obtenidas por el instrumento realizado, pues este era bastante empírico y el alfa de Cronbach determina la confiabilidad no solo de los datos, sino también la del instrumento, pues los datos provienen de este, de allí que en algunas mediciones pudo haber diferencias que a nivel estadístico no reflejan un comportamiento consistente o repetitivo. Por supuesto para la medición A, no es necesario el cálculo pues todos los valores son 0.

Con los datos confiables se volvieron a realizar los gráficos 21 y 22, los cuales representan una proyección polinómica y una lineal, respectivamente. Se puede apreciar que este caso, para ambas ecuaciones se tiene un valor de  $R^2$  igual 0,9991, mayor a los anteriores, indicando que mejoró el ajuste de la proyección para los datos de las variables que se buscan explicar. La ecuación polinómica es  $y = 3E - 05x^2 + 0,007x - 0,0001$  y la ecuación lineal es  $y = 0,0071x - 0,0002$ .

Utilizando estas nuevas ecuaciones para una proyección de fuerzas de magnetización versus amperaje, se obtienen los datos del Cuadro 121. Con este podemos apreciar que para la proyección polinómica también se tiene una curva cóncava hacia abajo, pues con forme se aumenta el amperaje se llega a un valor máximo de fuerza (marcados en negrita) y luego de estos comienza a bajar hasta llegar a 0. Con el caso de la proyección lineal, para lograr alcanzar apenas 1 kgf se requerirían 150A.

Todo esto con un 10,53 por ciento de acero en el cilindro, evidenciando que no es una cantidad suficiente para alcanzar una fuerza de

magnetización importante para montar un sistema de levitación con este material.

De la misma manera se desarrolló el estudio con los cilindros de Concreto con Limadura. En los cuadros 122 y 124 se muestran las mediciones realizadas, en las cuales se promediaron por medición en los cuadros 123 y 125, respectivamente. Posteriormente para que se obtuviera una fuerza representativa del material como tal, se promediaron los datos de ambos cilindros y así obtener un dato de fuerza de magnetización que identifique al Concreto con Limadura. Por lo tanto, se promediaron una vez más los valores de  $F_m$  de los cuadros 123 y 125 y este resultado se encuentra en el Cuadro 126.

Los gráficos 23 y 24, muestran las curvas de magnetización del Cuadro 126 y de igual manera para el primero se hizo una curva de ajuste polinómica, mientras para el segundo se hizo una lineal, siendo sus respectivas ecuaciones  $y = -0,0001x^2 + 0,0069x - 0,0012$  y  $y = 0,0062x - 0,0007$ . La ecuación polinómica tiene un  $R^2$  de 0,9927 y la ecuación lineal de 0,9917, lo que quiere decir que ambas se adaptan adecuadamente a los puntos proyectados, siendo ligeramente más apropiada la proyección polinómica por estar más cercano a 1. Para ambas se realizó una proyección de fuerzas de magnetización versus amperaje como se muestra en el Cuadro 127. Como se podía esperar, la proyección polinómica de grado 2, también posee una curva cóncava hacia abajo, presentando un crecimiento hasta un valor máximo de 0,118 kgf (marcados en negrita) y posterior a estos baja hasta un valor de 0. Con la proyección lineal siempre es creciente.

En el cuadro 128, se muestra el análisis de las fuerzas de magnetización para el Concreto con Limadura, este realizado de igual manera con el software Minitab. Se tuvo para las muestras C, D y F un alfa de Cronbach de 1, 0,57 y 0,49 respectivamente. Ahora bien, a pesar de que el valor uno señala que las mediciones C son muy confiables, los otros dos valores están por debajo de 0,6 lo que ya no se consideraría confiable, sin embargo, como ya se mencionó, el alfa de Cronbach es un reflejo del instrumento con el que se obtuvieron dichos datos. Al ser el instrumento de medición una balanza empírica construida en laboratorio se va a ser más permisible y se tomarán estos dos valores como confiables para este estudio. El resto de los datos al poseer un alfa

de Cronbach negativo se descartan pues indican inconsistencia.

Los gráficos 25 y 26 muestran las proyecciones polinómicas de grado 2 y lineal respectivamente, para los datos confiables, cuyas ecuaciones son " $y = 0,0001x^2 + 0,0057x + 3E-05$ " y " $y = 0,0064x - 0,0004$ ". Podemos ver que el  $R^2$  de la ecuación polinómica es 0,9999 y de la ecuación lineal es 0,9986. Esto indica que la curva de ajuste es aún más precisa y apegada a los datos del gráfico, resultando en una ecuación bastante confiable para dichos datos.

En el Cuadro 129 se muestra la proyección de fuerzas de magnetización versus amperaje para ambas ecuaciones. En este caso, la polinómica es creciente, pues como se observa en la columna 2, los datos siempre van en aumento, de igual manera basta con observar la ecuación del Gráfico 25, la cual no posee ninguno de sus factores negativo. En cuanto a la proyección lineal, estas fuerzas también van en crecimiento, sin embargo, aumenta más con la proyección polinómica, basta con observar las fuerzas en ambos casos proyectadas para 120A.

La razón por la cual el concreto con viruta presentó mayores fuerzas de magnetización, es debido a su porosidad, ya que es menos denso, permitiendo que las líneas de flujo del campo magnético fluyan mejor. Mientras el concreto con limadura, al ser más denso dificulta el flujo de estas líneas de campo magnético.

## Interpolación de fuerza magnética

Teniendo en cuenta que todas estas proyecciones anteriores serían para un cilindro del mismo tamaño, con el mismo solenoide y la misma cantidad de acero en el núcleo. La manera de aumentar considerablemente la fuerza de magnetización es variando la cantidad de acero del núcleo. Debido al costo de la obtención de materia prima, tanto económicamente como en tiempo, realizar pruebas con otras dosificaciones no fue posible realizarlo experimentalmente. Sin embargo, a partir de los cilindros realizados, se podría predecir, cuánto porcentaje de acero dentro del núcleo podría dar una fuerza de magnetización de magnitud "x". Esto, porque se conoce la fuerza de magnetización teórica con la que se diseñó el solenoide. Entonces se tiene un  $F_m$  para el electroimán con un 100% de acero 1020 en el

núcleo y también se tiene un  $F_m$  para el electroimán con un 10,53% de acero 1020 en el núcleo. Con esta interpolación se puede predecir, cuál sería el  $F_m$  para otro porcentaje de acero entre 10,53% y 100%.

En el Cuadro 130 se muestra dicha interpolación lineal, tomando en cuenta que el electroimán teórico, con 100% acero 1020 en el núcleo tiene una fuerza de magnetización de 46,290 kgf. La interpolación se trabaja de manera lineal, debido a que solo se tienen 2 pares ordenados, los obtenidos experimentalmente y el valor teórico de electroimán. Al solo haber 2 puntos, lo que se asume inicialmente es un comportamiento lineal. Con las pruebas hechas a los cilindros realizados, se logró medir una fuerza de 0,035 y 0,044 kgf para los cilindros de Concreto con Limadura y Concreto con Viruta respectivamente, teniendo ambos un 10,53% de acero en el núcleo. Si se realiza una interpolación entre estos valores, obtendríamos un valor teórico de la fuerza con otras dosificaciones de acero en el núcleo. Se realizaron interpolaciones a partir de un 20% de acero hasta un 40%, aumentando de 5 en 5, pues al 40% se alcanza una fuerza de 15 kgf. Por supuesto esta fuerza obtenida por medio de la interpolación debe ser comprobada experimentalmente, así también, con un tercer par ordenado, se descubriría si fue correcto asumir un comportamiento lineal.

Para el Concreto con Limadura podemos ver que para un porcentaje de acero de 30% o 40% en el núcleo, se alcanzaría una fuerza de magnetización suficiente para realizar un sistema de levitación a escala reducida. Como se puede apreciar, la diferencia de las fuerzas entre el concreto con limadura y el concreto con viruta es muy leve.

## Costo de extracción de materia prima

Para efectos de este proyecto, en el Cuadro 131 se puede observar el gasto que implicó obtener la materia prima tanto de limadura de acero como de viruta de acero. Dicho monto fue de 460.539 colones. A partir de estos montos, se separó cuánto corresponde a limadura y cuánto a viruta.

Para la limadura de acero se estima que del total, 388.775 colones fueron solo de la extracción de limadura, tomando en cuenta las

herramientas, acero y mano de obra. En el Cuadro 132, se puede ver este desglose en donde también se estimó el costo por elaboración de cilindro, solo en lo que respecta al acero, es decir, sin contar cemento y agregados. Este sería el monto total entre la cantidad de cilindros elaborados, que si se toma en cuenta los 23 cilindros moldeados que se descartaron por un error en el diseño de mezcla, estamos hablando de 45 cilindros en total, dando como resultado que por cilindro de 100x200 milímetros se incrementaría en aproximadamente 8639 colones su elaboración solo por la adhesión de limadura de acero.

Viendo el Cuadro 133, solo se toma en cuenta el acero y las herramientas para la obtención de viruta, ya que para este no se requirió pagar mano de obra y su obtención era más rápida. De igual manera se estimó el costo por cilindro, que aumentaría en aproximadamente 3120 colones su elaboración solo por la adhesión de viruta de acero.

Obteniendo el volumen de un cilindro y viendo cuántas veces cabe este en un metro cúbico de concreto, para saber cuántas veces se multiplicaría el costo por cilindro. Al hacer esto, se tiene que para el Concreto con Viruta, aumentaría el costo de un metro cúbico en 1.986.364 colones aproximadamente solo por la adherencia de viruta de acero 1020, sin contemplar los costos que ya implica elaborar 1 m<sup>3</sup> de concreto convencional (cemento, arena, piedra, agua, mano de obra), en otras palabras, si en un metro cúbico de concreto hidráulico se quisiera adicionar viruta de acero como un "aditivo" para que abarque el 10,53% del concreto, solo esta viruta tendría un valor de 1.986.364 colones. Para el Concreto con Limadura, este aumento en el costo de un metro cúbico de concreto sería de aproximadamente 5.500.041 colones solo por la adherencia de limadura de acero para que esta cubra un 10,53% del concreto elaborado. Añadiéndolo por medio de sustitución en el agregado fino. Sin embargo, se debe aclarar que estos costos por metro cúbico, se darían realizando los mismos procedimientos artesanales en laboratorio de este proyecto, es decir, si se magnificaran a un proceso industrializado, por supuesto los costos serían menores.

Si relacionamos los costos con los efectos en la magnetización y resistencia, se podrá identificar relaciones interesantes. El Concreto con Viruta por ejemplo, obtuvo una muy baja resistencia, la cual no es aceptable para un

concreto en términos estructurales. Debido a esto, el dinero invertido en la creación de este concreto es muy elevado para la resistencia obtenida, es decir, la relación costo/resistencia del Concreto con Viruta es bastante deficiente. Sin embargo, este concreto fue el que manifestó una mayor fuerza de magnetización alcanzando una fuerza de 43,66 grf, por lo que se puede decir que la relación costo/magnetización es mejor que el de Concreto con Limadura el cual alcanzó una  $F_m$  de 35,47 grf, pues de los dos concretos modificados, el desarrollo del concreto con viruta fue el más económico y obtuvo una mayor magnetización en términos de fuerza.

Por otro lado, el Concreto con Limadura, tuvo dos buenas relaciones. La relación de costo/resistencia pues a pesar del costo elevado, su resistencia incluso se incrementó con respecto a la del Concreto Base. También, tuvo una muy buena relación resistencia-magnetización, lo que quiere decir que con el incremento en la resistencia, la magnetización siempre se manifestó, lo que quiere decir que cumplió con ambos aspectos.

# Conclusiones

- Se optó que el agregado fino fuera elaborado por medio de construcción granulométrica, sustituyendo material pétreo (partículas del polvo de piedra) por material ferromagnético (partículas del acero) para que así el concreto tuviera como parte de su composición de diseño al material ferromagnético y generarle así propiedades magnéticas, en lugar de hacerlo añadido como un aditivo.
- Se puede obtener la gravedad específica de una limadura o una viruta adaptando a estas la norma ASTM C128-15, utilizando el método del picnómetro, con la única desventaja de que la muestra utilizada en este ensayo debe ser desechada de manera consciente y ambiental, debido a que por su contacto con el agua durante el ensayo se oxida. Los valores de esta gravedad específica fueron 6,73 y 5,47 para la viruta y la limadura respectivamente.
- Construir un agregado que involucre 2 materiales distintos altera su peso unitario y porcentaje de vacíos. El agregado fino con viruta de acero presenta más porcentaje de vacíos que el agregado compuesto por limadura de acero, siendo estos valores 84% suelto y 79% compactado para la viruta, y 73% suelto y 67% compactado, para la limadura.
- El agregado grueso se consideró apto para el diseño de mezcla, debido a que los porcentajes de abrasión no superaron el 35% de pérdida de material y los límites granulométricos se cumplían 4 de los 5 tamices, lo cual se consideró aceptable ya que solo incumplía por un 5%.
- En la elaboración de mezclas de concreto, para las tres mezclas realizadas fue necesario agregar más agua de la estimada en el diseño de mezcla para alcanzar la consistencia plástica. Esto, debido a que las tablas de relación A/C del ACI 211.1-91 no están calculadas con cementos producidos en Costa Rica, por lo que brindan es apenas una aproximación.
- Se determinó que la relación agua/cemento experimental no fue un factor de afectación para la resistencia de las mezclas de concreto, debido a que el aumento fue muy similar en las 3.
- El porcentaje de acero sustituido en el agregado fino (35,23%), no es igual al porcentaje de acero que se encuentra en la mezcla de concreto o en los cilindros moldeados (10,53%), por tanto el porcentaje de acero que se encontraba en el concreto era de 10,53%.
- El Concreto Base (concreto patrón), sí alcanzó el  $f'c$  para el cual fue diseñado, permitiendo así que las otras dos mezclas desarrolladas se pudieran comparar a partir de este.
- La adición de limadura de acero 1020 en la mezcla de concreto, realizando una sustitución en el agregado fino por medio de construcción granulométrica, benefició las propiedades mecánicas del concreto aumentando su resistencia ( $f'c$ ) en aproximadamente un 26%.
- La adición de viruta de acero 1020 en la mezcla de concreto, realizando sustitución en el agregado fino por medio de construcción granulométrica, no fue beneficioso para las propiedades mecánicas del concreto, pues la forma alargada de

su partícula genera vacíos en el concreto y no permite una buena compactación en el proceso del moldeo de cilindros afectando el valor del  $f'c$  del mismo en aproximadamente un 62%.

- El agregado fino ferromagnético presentó un mejor comportamiento con limadura de acero 1020 que con viruta de acero 1020 en lo que respecta a las propiedades mecánicas del concreto.
- En cuanto a las propiedades magnéticas tuvo ligeramente mejores resultados el concreto realizado con viruta de acero 1020, sin embargo, en cuanto a la relación resistencia-magnetización, el concreto con limadura de acero, fue el más acertado.
- Someter cilindros de concreto con un 10,53% de limadura de acero 1020 en su interior a un campo electromagnético de aproximadamente 1T no varía significativamente su resistencia a la compresión ( $f'c$ ) según el resultado de prueba t para dos muestras.
- Someter cilindros de concreto con un 10,53% de viruta de acero 1020 en su interior a un campo electromagnético de aproximadamente 1T sí varía significativamente su resistencia a la compresión ( $f'c$ ) según el resultado de prueba t para dos muestras. Esto aumentó su  $f'c$ , sin embargo, sigue siendo muy deficiente pues no se alcanzó ni la mitad de la resistencia de diseño.
- Los cilindros elaborados con concreto con viruta de acero 1020 no mostraron en su mayoría un patrón de falla, debido a que sus resistencias eran muy bajas y a su superficie irregular y porosa que impide visualizar una grieta con facilidad.
- Según los estándares de control de calidad para los datos de  $f'c$  elaborados por el ACI 214RS-11, Tablas 4.3 y 4.4, los especímenes de Concreto con Viruta, poseen mucho error por lo que su clasificación dio como resultado "Malo", es decir, que

el método de elaboración de la mezcla y/o de los cilindros pudo haber algún proceso mal elaborado, evidenciado también en el  $f'c$  obtenido y considerando que este concreto fue complicado de compactar por envarillado en los moldes, debido a la viruta y su forma alargada de partícula.

- No todos los grupos de datos de resistencias a la compresión mostraban ser datos de distribución normal, principalmente por el sesgo que se apreciaba en los gráficos de caja (boxplot). Sin embargo, esto puede deberse también a la poca cantidad de datos de cada grupo de datos (<15).
- Para comparar las medias de los  $f'c$  entre las distintas mezclas, no se pudo realizar un análisis de varianzas "anova", debido a que para este se requieren muestras de al menos 30 datos, mientras que una prueba t de dos muestras es aceptable para muestras menores a 15 datos considerando que estos no contengan datos atípicos ni un sesgo notorio, evidenciado principalmente en los gráficos de caja.
- Los especímenes realizados mostraron una baja magnetización. Para Concreto con Viruta se logró medir y calcular que el campo magnético generado en su extremo a 6A circulando por un solenoide de 400 espiras era de aproximadamente 0,5T y una fuerza de magnetización de 0,43N. Para el Concreto con Limadura, bajo las mismas condiciones, se obtuvo un campo magnético de aproximadamente 0,46T y una fuerza de magnetización de 0,35N.
- Para el Concreto con viruta se obtuvo una ecuación polinómica ( $y=-0,00003x^2+0,007x-0,0001$ ) con la cual se proyectó a diferentes amperajes la fuerza de magnetización que se obtendría para este concreto, resultando en una fuerza máxima de aproximadamente 0,408 kgf. También, se obtuvo una ecuación

- lineal ( $y=0,0071x-0,0002$ ) con la cual su proyección predice que para alcanzar 1 kgf se requieren aproximadamente 150A.
- Para el Concreto con Limadura se obtuvo una ecuación polinómica ( $y=0,0001x^2+0,0057x+0,00003$ ) cuya proyección es siempre creciente con una concavidad hacia arriba a diferencia del Concreto con Viruta. También, se obtuvo una ecuación lineal ( $y=0,0064x-0,0004$ ) la cual proyecta que para alcanzar una fuerza de magnetización de 1 kgf se requerirían 160A aproximadamente.
  - Se pudo obtener, por medio de interpolación lineal, que para un porcentaje de acero de 40% dentro de la mezcla de concreto ya sea con viruta o con limadura, se podría obtener con una corriente de 6A en un solenoide con 400 espiras para un cilindro de 100x200 mm, una fuerza de magnetización de aproximadamente 15 kgf, suficiente para montar un sistema de levitación a escala.
  - Debido a la porosidad del concreto con viruta, las líneas de flujo del campo magnético fluyen mejor, lo que permite que posea mayores fuerzas de magnetización respecto al concreto con limadura.
  - Se determinó que el costo de extracción de la limadura y viruta de acero, es bastante elevado. Se estimó que por cilindro de 100x200mm, el costo de su elaboración se elevaría en 8639 colones solo por la adición de limadura de acero 1020. Y solo por la adición de viruta de acero 1020, se elevaría cada cilindro en 3120 colones.
  - Se estima que para realizar un metro cúbico de Concreto con Limadura de acero 1020 en una proporción de 10,53% del volumen del concreto, aumentaría en su costo 5.500.041 colones/m<sup>3</sup> siguiendo los procesos de este proyecto.
  - Se estima que para realizar un metro cúbico de Concreto con Viruta de
- acero 1020 en una proporción de 10,53% del volumen del concreto, aumentaría en su costo 1.986.364 colones/m<sup>3</sup> siguiendo los procesos de este proyecto.
- La mejor relación costo-resistencia la posee el Concreto con Limadura. La mejor relación costo-magnetización la posee el Concreto con Viruta. La mejor relación resistencia-magnetización la posee el Concreto con Limadura. Por esto el Concreto con Limadura es mucho mejor que el Concreto con Viruta.

# Recomendaciones

- Desarrollar más lotes de cilindros de concreto con limadura utilizando las mismas dosificaciones de este proyecto para ampliar los datos de resistencia y fuerza de magnetización, considerando el costo económico que esto implica. Es recomendable que por lote se realicen al menos 60 cilindros de los cuales se puedan fallar 45 (15 por edad) y 15 para determinar las propiedades magnéticas.
  - Se recomienda que, al momento de realizar la sustitución de material ferromagnético en el agregado fino, se realice por peso, pero se haga también la corrección por volumen que implica esta sustitución.
  - Para ampliar la investigación se recomienda realizar también estas mezclas de concreto con otros cementos nacionales.
  - Se recomienda realizar los mismos diseños de mezcla utilizando otros tipos de materiales ferromagnéticos como hierro puro o acero al silicio.
  - Utilizar una balanza de preferencia digital o al menos con ficha técnica y calibrada para validar aún más las mediciones de fuerza de adherencia.
  - Realizar un estudio con otras proporciones de acero que permita verificar la interpolación teórica realizada a 20, 25, 30, 35 y 40 por ciento de acero en la mezcla de concreto que fueron las proyectadas en este documento.
  - Realizar cilindros con viruta de acero 1020, pero adicionando esta como con un aditivo en vez de sustituirlo por el agregado fino, y evaluar distintas proporciones de viruta como aditivo tanto en resistencia como en fuerza de magnetización.
- Con el fin de disminuir la variación de las resistencias en los especímenes, se recomienda que para futuras pruebas, se determine en estos la densidad del concreto por medio de la norma ASTM C138-17a.



# Apéndices

1. Diseños de mezcla en base al código ACI 211.1-91.
  - A. Diseño de mezcla para Concreto Base.
  - B. Diseño de mezcla para Concreto con Limadura.
  - C. Diseño de mezcla para Concreto con Viruta.
2. Resultados completos de los análisis estadísticos.
  - A. Prueba t de dos muestras para  $f'c$  de Concreto con Limadura y CLM.
  - B. Prueba t de dos muestras para  $f'c$  de Concreto con Viruta y CV M.
  - C. Prueba t de dos muestras para  $f'c$  de Concreto con Limadura y  $f'c$  de Concreto Base.
  - D. Prueba t de dos muestras para  $f'c$  de Concreto con Viruta y  $f'c$  de Concreto Base.
  - E. Alfa de Cronbach para los datos de fuerza de magnetización en los cilindros de Concreto con Viruta.
  - F. Alfa de Cronbach para los datos de fuerza de magnetización en los cilindros de Concreto con Limadura.
3. Desglose total de los gastos incurridos en el proyecto.

# Referencias

- Abad, V. y Sagredo, J. (2018). *Evolución y proceso de fabricación de imanes “NEO” aplicados a motores de vehículos eléctricos*. **REVISTA DE METALURGIA**. 54(3): e127.
- Anguas, P. G. et al. (2004). **ASPECTOS DEL DISEÑO VOLUMÉTRICO DE MEZCLAS ASFÁLTICAS**. Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro.
- ASTM International. (2020). *ASTM C131: Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine*. American Society for Testing and Materials.
- ASTM International. (2015). *ASTM C127: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate*. American Society for Testing and Materials.
- ASTM International. (2015). *ASTM C128: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*. American Society for Testing and Materials.
- ASTM International. (2015). *ASTM C670: Standard Practice for Preparing Precision and Bias Statements for Test Methods for Construction Materials*. American Society for Testing and Materials.
- ASTM International. (2017). *ASTM C117: Standard Test Method for Materials Finer than 75- $\mu$ m (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing*. American Society for Testing and Materials.
- ASTM International. (2017). *ASTM C29: Standard Test Method for Bulk Density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate*. American Society for Testing and Materials.
- ASTM International. (2018). *ASTM C33: Standard Specification for Concrete Aggregates*. American Society for Testing and Materials.
- ASTM International. (2018). *ASTM C39: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. American Society for Testing and Materials.
- ASTM International. (2018). *ASTM C702: Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size*. American Society for Testing and Materials.
- ASTM International. (2019). *ASTM C136: Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. American Society for Testing and Materials.
- ASTM International. (2019). *ASTM C192: Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory*. American Society for Testing and Materials.
- ASTM International. (2019). *ASTM D75: Standard Practice for Sampling Aggregates*. American Society for Testing and Materials.
- ASTM International. (2020). *ASTM C40: Standard Test Method for Organic Impurities in Fine Aggregates for Concrete*. American Society for Testing and Materials.

- ASTM International. (2020). *ASTM C595: Standard Specification for Blended Hydraulic Cements*. American Society for Testing and Materials.
- ASTM International. (2019). *ASTM C566: Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying*. American Society for Testing and Materials.
- Ballve, L. D. y Ríos, F.G. (2018). *El valor p. Interpretación, orígenes y su utilización actual*. **REVISTA ARGENTINA DE TERAPIA INTENSIVA**, 35(3).
- Boylestad, R. L. (2004). **INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS DE CIRCUITOS**. México: PEARSON EDUCACIÓN.
- Cáceres, T. M. (2011). *Agregados*. Obtenido de <https://slideplayer.es/slide/5416648/>
- Catalá, J. D. et al. (2018). **MAGNETISMO**. Madrid: Tébar Flores.
- Cervantes, V. H. (2005). *Interpretaciones del coeficiente alpha de cronbach*. **AVANCES EN MEDICIÓN**, (3), 9-28.
- Chávez, I. et al. (2013). *El poder de los imanes*. **UN MAR DE IDEAS CREANDO OLAS DE CONOCIMIENTO**. Experiencias Nacional Mazatlán 2013. 59-62p.
- Comité ACI 211. (2002). *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*. American Concrete Institute.
- Comité ACI 214. (2017). *Guía para la evaluación de resultados de ensayos de resistencia del concreto*. American Concrete Institute.
- Gazo, E. (2008). *Materiales superconductores. Superconductividad*. Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón. España. Obtenido de [https://www.cienciatk.csic.es/Videos/MATERIALES+SUPERCONDUCTORES+SU+PERCONDUCTIVIDAD\\_25447.html](https://www.cienciatk.csic.es/Videos/MATERIALES+SUPERCONDUCTORES+SU+PERCONDUCTIVIDAD_25447.html)
- González, A.F. et al. (2009). **MATERIALES MAGNÉTICOS**. Universidad Tecnológica Nacional, Departamento de Electrónica, Argentina. Obtenido de [http://www1.frm.utn.edu.ar/tecnologiae/apuntes/materiales\\_magneticos.pdf](http://www1.frm.utn.edu.ar/tecnologiae/apuntes/materiales_magneticos.pdf)
- Hayt, W. H. (2006). **TEORÍA ELECTROMAGNÉTICA**. México: McGraw-Hill.
- INTECO. (2018). *Lista productos certificados marca de conformidad inteco con norma específica*. Obtenido de [https://www.inteco.org/inteco/static/src/doc/certificates/037-CP-2010\\_HOLCIM\\_CR\\_SA.pdf](https://www.inteco.org/inteco/static/src/doc/certificates/037-CP-2010_HOLCIM_CR_SA.pdf)
- Magment. 2020. *Magment*. Obtenido de <https://www.magment.de/es-carga-inalambrica-dinamica>
- Ministerio de Obras Públicas y Transportes. (2010). **MANUAL DE ESPECIFICACIONES GENERALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CARRETERAS, CAMINOS Y PUENTES CR-2010**. Ministerio de Obras Públicas y Transportes.
- Minitab. (2020). *Soporte técnico de Minitab 19*. Obtenido de <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/19/>
- Norelem. (2019). *09000 Imanes Catálogo 2019*. **NORELEM**. Obtenido de [http://www.norelem-spain.es/wp-content/uploads/2019/05/09000-norelem\\_catalogo\\_2019\\_es.pdf](http://www.norelem-spain.es/wp-content/uploads/2019/05/09000-norelem_catalogo_2019_es.pdf)
- Oviedo, H. C. y Campo-Arias, A. (2005). *Aproximación al uso del coeficiente alfa de Cronbach*. **REVISTA COLOMBIANA DE PSIQUIATRÍA**, XXXIV(4), 572-580p. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/rcp/v34n4/v34n4a09.pdf>
- Oviedo, J. A. y Duque, M. P. (2006). *Sistemas de Control de Respuesta Sísmica en Edificaciones*. **REVISTA EIA**, (6), 105-120p.

- Parisi, M. (2014). *Tecnología made in Chile: sin miedo a los terremotos*. **AMÉRICA ECONOMÍA**. Obtenido de <https://www.americaeconomia.com/negocios-industrias/tecnologia-made-chile-sin-miedo-los-terremotos>
- Pegueros, M. C. et al. (2017). *Modelado y control de un sistema de levitación magnética basado en un cojinete magnético activo*. **NOVA SCIENTIA**, 9(19), 229-254.
- Pérez-Alcázar, G.A. (2016). Imanes permanentes: características, aplicaciones y futuro. **REVISTA DE LA ACADEMIA COLOMBIANA DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES**. No 40: 221-233p.
- Perren, G. (2003). **ESTUDIO DE LAS APLICACIONES PRÁCTICAS DE LA LEVITACIÓN MAGNÉTICA (TRENES MAGLEV)**. Obtenido de <https://www.fceia.unr.edu.ar/~fisica3/MagLev.pdf>
- Portal, E. R. (2018). **RESISTENCIA DE CONCRETO  $f'c=210$  KG/CM<sup>2</sup> CON SUSTITUCIÓN DEL 10% DEL AGREGADO FINO POR VIRUTA METÁLICA**. Tesis. Universidad San Pedro, Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Perú. 101 p.
- Rodríguez Ojeda, J.G. (2011). **FABRICACIÓN DE IMANES - FERROMAGNETISMO - Ley de Coulomb-**. Julio German Rodríguez Ojeda. Youtube.
- Rodríguez Pozueta, M.A. (2014). **MATERIALES Y CIRCUITOS MAGNÉTICOS**. Universidad de Cantabria. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética. 48p.
- Sadiku, M. N. (2000). **ELEMENTOS DE ELECTROMAGNETISMO** (Tercera Edición ed.). Estados Unidos: Oxford University Press.
- Universia Argentina. (2019). *La investigación universitaria y su rol en el desarrollo académico de un país*. **UNIVERSIA.NET**. Obtenido de <https://noticias.universia.com.ar/educacion/noticia/2019/07/22/1165818/investigacion-universitaria-rol-desarrollo-academico-pais.html>
- Villanueva-Raya, D.M. et al. (2019). *Estudio sistemático de las propiedades mecánicas de las micropartículas de magnetita embebidas en una matriz de concreto polimérico*. **REVISTA DE INGENIERÍA CIVIL**, 3(9), 12-16.





## B. Diseño de mezcla para concreto con limadura.

Material	M.f.	Gb.s.s	Gb.s	Gs	Suelto	Compactado	%W	%D	%hu.sitio	TMN
Arena	3,025	3,12	3,02	0	1496	1825	1,49	4,28	1,49	0
Piedra	0	2,33	2,26	0	1227	1310	0	3,02	1,86	12,5
Cemento	0	0	0	2,97	1500	0	0	0	0	0

f'c para diseño (MPa)	27,4586	f'cr (MPa)	35,7586	Condición	1	AIRE	Asent. (mm)	75
-----------------------	---------	------------	---------	-----------	---	------	-------------	----

\*sin=1/con=2

Interpolación para el % de hinchamiento	
%WL	-2,79
Xo	0
X1	2
Yo	0
Y1	3
%H	0

Arena		
Agua libre	-2,79	
%H	0	
	Suelto	Compactado
Peso unitario masivo seco (kg/cm3)	1474,04	1798,21

Piedra		
Agua libre	-3,02	
%H	0	
	Suelto	Compactado
Peso unitario masivo seco (kg/cm3)	1227,00	1310,00

Peso en kg de agua para 1 m3 de concreto	
Peso del agua (Pw)	216
Volumen del agua (Vw)	0,216
% Aire	2,5
Volumen del Aire (m3)	0,025

Interpolación para la relación AGUA-CEMENTO	
f'cr	35,7586
Xo	35
X1	40
Yo	0,48
Y1	0,43
A/C	0,4724

Cantidad de cemento	
Peso del cemento (kg)	457,23
Volumen del cemento (m3)	0,154

Cantidad de agregado grueso (m3)	
Módulo de finura (MF)	3,025
Xo	3
X1	3,1
Yo	0,53
Y1	0,52
Volumen masivo (Vm)	0,53
Peso de la piedra	691,025
Volumen Bruto	0,306

Cantidad de agregado fino (m3)	
Volumen de arena (VB)	0,299
Peso de la arena (kg)	903,851

Agregado	Ps (kg)	%W	%D	%WL	PT (kg)	PwT (kg)
Arena	903,851	1,49	4,28	-2,79	917,319	-25,593
Piedra	691,025	1,86	3,02	-1,16	703,878	-8,165
					Total	-33,758

Agua corregida	
Pwr	249,758

Dosificación para una mezcla de concreto de f'c = 35,7586			
Material	Condición	Peso (kg)	Dosificación
Cemento	Seco	457,23	1
Arena	Húmedo	903,851	1,98
Piedra	Húmedo	691,025	1,51
Agua	---	249,758	0,55

Dosificación para elaborar 19 cilindros de 100 mm x 200 mm, con un 20% de desperdicio incluido.

Material	Condición	Peso (kg)	Peso (kg)	Dosificación
Cemento	Seco	13,646	16,375	1
Arena	Húmedo	26,976	32,371	1,98
Piedra	Húmedo	20,624	24,748	1,51
Agua	---	7,454	8,945	0,55

Fuente: Elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

### C. Diseño de mezcla para concreto con viruta.

Material	M.f.	Gb.s.s	Gb.s	Gs	Suelto	Compactado	%W	%D	%hu.sitio	TMN
Arena	3,025	3,24	3,14	0	1088	1407	1,58	4,28	1,58	0
Piedra	0	2,33	2,26	0	1227	1310	0	3,02	2,53	12,5
Cemento	0	0	0	2,97	1500	0	0	0	0	0

f'c para diseño (MPa)	27,4586	f'cr (MPa)	35,7586	Condición	1	AIRE	Asent. (mm)	75
-----------------------	---------	------------	---------	-----------	---	------	-------------	----

\*sin=1/con=2

Interpolación para el % de hinchamiento	
%WL	-2,7
Xo	0
X1	2
Yo	0
Y1	3
%H	0

Arenda		
Agua libre	-2,7	
%H	0	
	Suelto	Compactado
Peso unitario masivo seco (kg/cm3)	1071,08	1385,12

Piedra		
Agua libre	-3,02	
%H	0	
	Suelto	Compactado
Peso unitario masivo seco (kg/cm3)	1227,00	1310,00

Peso en kg de agua para 1 m3 de concreto	
Peso del agua (Pw)	216
Volumen del agua (Vw)	0,216
% Aire	2,5
Volumen del Aire (m3)	0,025

Interpolación para la relación AGUA-CEMENTO	
f'cr	35,7586
Xo	35
X1	40
Yo	0,48
Y1	0,43
A/C	0,4724

Cantidad de cemento	
Peso del cemento (kg)	457,23
Volumen del cemento (m3)	0,154

Cantidad de agregado grueso (m3)	
Módulo de finura (MF)	3,025
Xo	3
X1	3,1
Yo	0,53
Y1	0,52
Volumen masivo (Vm)	0,53
Peso de la piedra	691,025
Volumen Bruto	0,306

Cantidad de agregado fino (m3)	
Volumen de arena (VB)	0,299
Peso de la arena (kg)	939,766

Agregado	Ps (kg)	%W	%D	%WL	PT (kg)	PwT (kg)
Arena	939,766	1,58	4,28	-2,7	954,614	-25,775
Piedra	691,025	2,53	3,02	-0,49	708,508	-3,472
					Total	-33,758

Agua corregida	
Pwr	245,246

Dosificación para una mezcla de concreto de f'c =				35,7586
Material	Condición	Peso (kg)	Dosificación	
Cemento	Seco	457,23	1	
Arena	Húmedo	939,766	2,06	
Piedra	Húmedo	691,025	1,51	
Agua	---	245,246	0,54	

Dosificación para elaborar 19 cilindros de 100 mm x 200 mm, con un 20% de desperdicio incluido.

Material	Condición	Peso (kg)	Peso (kg)	Dosificación
Cemento	Seco	13,646	16,375	1
Arena	Húmedo	28,047	33,657	2,06
Piedra	Húmedo	20,624	24,748	1,51
Agua	---	7,319	8,783	0,54

Fuente: Elaboración propia utilizando el programa Excel de Microsoft Office 365 ProPlus.

## 2. Resultados completos de los análisis estadísticos.

### A. Prueba t de dos muestras para f'c de Concreto con Limadura y CLM.

#### Prueba T e IC de dos muestras: CL 28d; CL M

##### Método

$\mu_1$ : media de CL 28d

$\mu_2$ : media de CL M

Diferencia:  $\mu_1 - \mu_2$

No se presupuso igualdad de varianzas para este análisis.

##### Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
CL 28d	6	35,383	0,811	0,33
CL M	2	31,80	2,12	1,5

##### Estimación de la diferencia

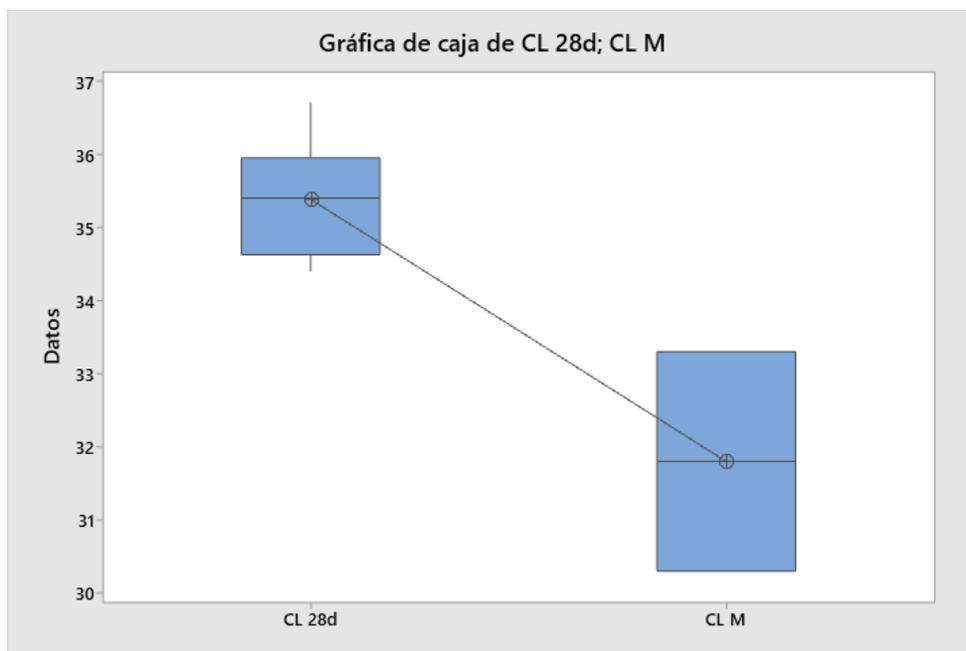
Diferencia	IC de 95% para la diferencia
3,58	(-15,93; 23,10)

##### Prueba

Hipótesis nula  $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Hipótesis alterna  $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Valor T	GL	Valor p
2,33	1	0,258



Fuente: Elaboración propia utilizando el programa Minitab 19.

## B. Prueba t de dos muestras para f'c de Concreto con Viruta y CV M.

### Prueba T e IC de dos muestras: CV 28d; CV M

#### Método

$\mu_1$ : media de CV 28d

$\mu_2$ : media de CV M

Diferencia:  $\mu_1 - \mu_2$

*No se presupuso igualdad de varianzas para este análisis.*

#### Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
CV 28d	5	10,480	0,795	0,36
CV M	2	12,550	0,354	0,25

#### Estimación de la diferencia

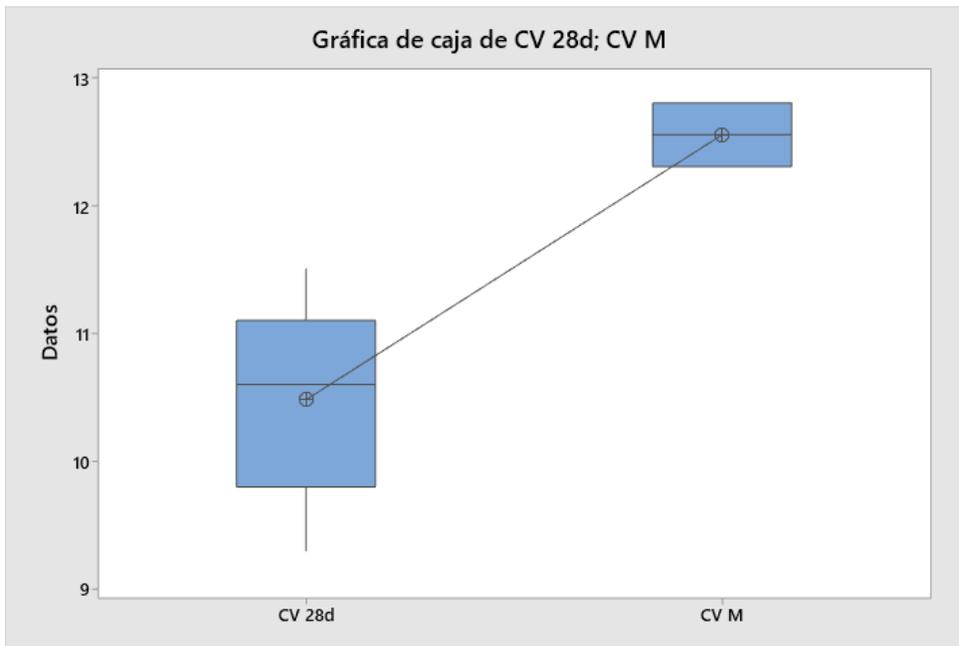
Diferencia	IC de 95% para la diferencia
-2,070	(-3,277; -0,863)

#### Prueba

Hipótesis nula  $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Hipótesis alterna  $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Valor T	GL	Valor p
-4,76	4	0,009



Fuente: Elaboración propia utilizando el programa Minitab 19.

## C. Prueba t de dos muestras para f'c de Concreto con Limadura y f'c de Concreto Base.

### Prueba T e IC de dos muestras: CL 28d; CB 28d

#### Método

$\mu_1$ : media de CL 28d

$\mu_2$ : media de CB 28d

Diferencia:  $\mu_1 - \mu_2$

*No se presupuso igualdad de varianzas para este análisis.*

#### Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
CL 28d	6	35,383	0,811	0,33
CB 28d	6	28,05	1,18	0,48

#### Estimación de la diferencia

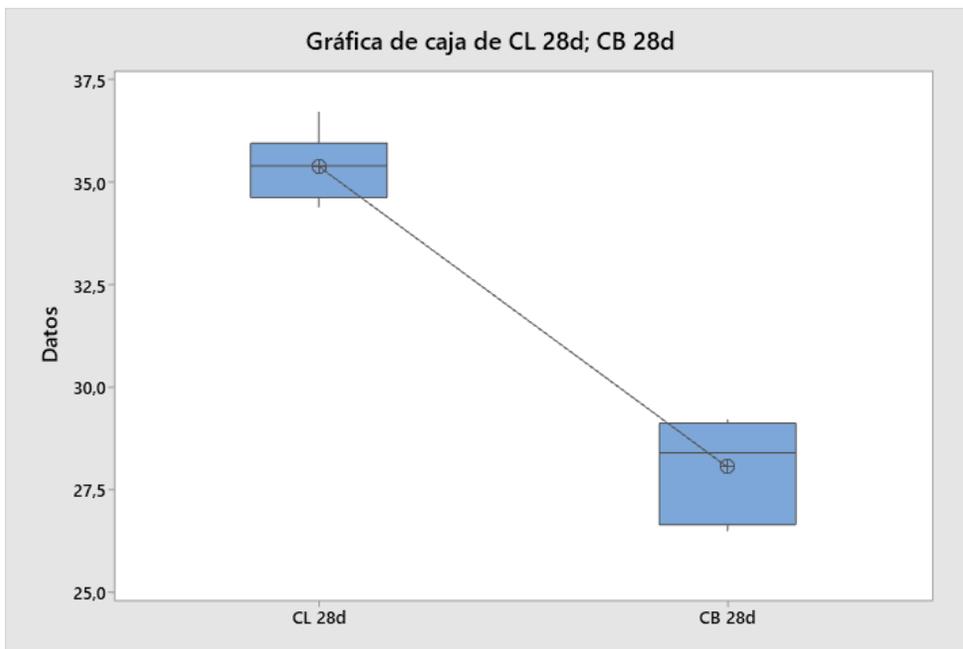
Diferencia	IC de 95% para la diferencia
7,333	(5,988; 8,678)

#### Prueba

Hipótesis nula  $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Hipótesis alterna  $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Valor T	GL	Valor p
12,57	8	0,000



Fuente: Elaboración propia utilizando el programa Minitab 19.

## D. Prueba t de dos muestras para f'c de Concreto con Viruta y f'c de Concreto Base.

### Prueba T e IC de dos muestras: CV 28d; CB 28d

#### Método

$\mu_1$ : media de CV 28d

$\mu_2$ : media de CB 28d

Diferencia:  $\mu_1 - \mu_2$

*No se presupuso igualdad de varianzas para este análisis.*

#### Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
CV 28d	5	10,480	0,795	0,36
CB 28d	6	28,05	1,18	0,48

#### Estimación de la diferencia

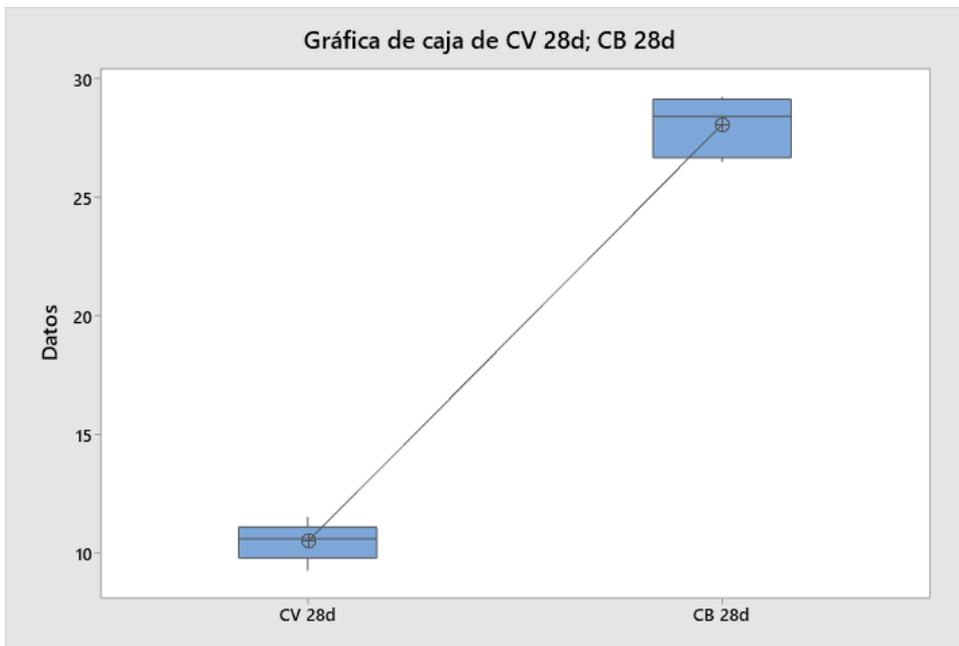
IC de 95% para Diferencia la diferencia
-17,570 (-18,948; -16,192)

#### Prueba

Hipótesis nula  $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$

Hipótesis alterna  $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Valor T	GL	Valor p
-29,41	8	0,000



Fuente: Elaboración propia utilizando el programa Minitab 19.

## E. Alfa de Cronbach para los datos de fuerza de magnetización en los cilindros de Concreto con Viruta.

### E1. Medición B.

#### Análisis de elementos de 1A-1; 1A-2

##### Matriz de correlación

Correlación de Pearson de 1A-1 y 1A-2 = -1,000

##### Estadísticas totales y de elementos

Variable	Conteo		
	total	Media	Desv.Est.
1A-1	2	8,650	0,566
1A-2	2	1,835	0,064
Total	2	10,485	0,502

##### Alfa de Cronbach

Alfa  
-0,5713

Fuente: Elaboración propia utilizando el programa Minitab 19.

### E2. Medición C.

#### Análisis de elementos de 2A-1; 2A-2

##### Matriz de correlación

Correlación de Pearson de 2A-1 y 2A-2 = 1,000

##### Estadísticas totales y de elementos

Variable	Conteo		
	total	Media	Desv.Est.
2A-1	2	16,355	1,054
2A-2	2	10,785	3,472
Total	2	27,140	4,525

##### Alfa de Cronbach

Alfa  
0,7144

Fuente: Elaboración propia utilizando el programa Minitab 19.

### E3. Medición D.

#### Análisis de elementos de 3A-1; 3A-2

##### Matriz de correlación

Correlación de Pearson de 3A-1 y 3A-2 = -1,000

##### Estadísticas totales y de elementos

Variable	Conteo		
	total	Media	Desv.Est.
3A-1	2	22,495	2,383
3A-2	2	18,910	7,509
Total	2	41,405	5,127

##### Alfa de Cronbach

Alfa  
-2,724

Fuente: Elaboración propia utilizando el programa Minitab 19.

#### E4. Medición E.

### Análisis de elementos de 4A-1; 4A-2

#### Matriz de correlación

Correlación de Pearson de 4A-1 y 4A-2 = 1,000

#### Estadísticas totales y de elementos

Variable	Conteo		
	total	Media	Desv.Est.
4A-1	2	27,055	3,854
4A-2	2	30,825	5,395
Total	2	57,880	9,249

#### Alfa de Cronbach

Alfa  
0,9722

Fuente: Elaboración propia utilizando el programa Minitab 19.

#### E5. Medición F.

### Análisis de elementos de 5A-1; 5A-2

#### Matriz de correlación

Correlación de Pearson de 5A-1 y 5A-2 = 1,000

#### Estadísticas totales y de elementos

Variable	Conteo		
	total	Media	Desv.Est.
5A-1	2	33,525	4,320
5A-2	2	37,055	2,821
Total	2	70,580	7,142

#### Alfa de Cronbach

Alfa  
0,9559

Fuente: Elaboración propia utilizando el programa Minitab 19.

#### E6. Medición G.

### Análisis de elementos de 6A-1; 6A-2

#### Matriz de correlación

Correlación de Pearson de 6A-1 y 6A-2 = -1,000

#### Estadísticas totales y de elementos

Variable	Conteo		
	total	Media	Desv.Est.
6A-1	2	37,465	0,799
6A-2	2	49,845	7,870
Total	2	87,310	7,071

#### Alfa de Cronbach

Alfa  
-0,5031

Fuente: Elaboración propia utilizando el programa Minitab 19.

## F. Alfa de Cronbach para los datos de fuerza de magnetización en los cilindros de Concreto con Limadura.

### F1. Medición B.

#### Análisis de elementos de 1A-L1; 1A-L2

##### Matriz de correlación

Correlación de Pearson de 1A-L1 y 1A-L2 = -1,000

##### Estadísticas totales y de elementos

Variable	Conteo		
	total	Media	Desv.Est.
1A-L1	2	5,0000	0,6647
1A-L2	2	3,2800	1,6971
Total	2	8,2800	1,0324

##### Alfa de Cronbach

Alfa  
-4,233

Fuente: Elaboración propia utilizando el programa Minitab 19.

### F2. Medición C.

#### Análisis de elementos de 2A-L1; 2A-L2

##### Matriz de correlación

Correlación de Pearson de 2A-L1 y 2A-L2 = 1,000

##### Estadísticas totales y de elementos

Variable	Conteo		
	total	Media	Desv.Est.
2A-L1	2	11,485	1,492
2A-L2	2	12,805	1,492
Total	2	24,290	2,984

##### Alfa de Cronbach

Alfa  
1,000

Fuente: Elaboración propia utilizando el programa Minitab 19.

### F3. Medición D.

#### Análisis de elementos de 3A-L1; 3A-L2

##### Matriz de correlación

Correlación de Pearson de 3A-L1 y 3A-L2 = 1,000

##### Estadísticas totales y de elementos

Variable	Conteo		
	total	Media	Desv.Est.
3A-L1	2	18,380	0,990
3A-L2	2	18,195	0,205
Total	2	36,575	1,195

##### Alfa de Cronbach

Alfa  
0,5686

Fuente: Elaboración propia utilizando el programa Minitab 19.

#### F4. Medición E.

### Análisis de elementos de 4A-L1; 4A-L2

#### Matriz de correlación

Correlación de Pearson de 4A-L1 y 4A-L2 = -1,000

#### Estadísticas totales y de elementos

Variable	Conteo		
	total	Media	Desv.Est.
4A-L1	2	25,260	1,966
4A-L2	2	27,115	0,686
Total	2	52,375	1,280

#### Alfa de Cronbach

Alfa

-3,292

Fuente: Elaboración propia utilizando el programa Minitab 19.

#### F5. Medición F.

### Análisis de elementos de 5A-L1; 5A-L2

#### Matriz de correlación

Correlación de Pearson de 5A-L1 y 5A-L2 = 1,000

#### Estadísticas totales y de elementos

Variable	Conteo		
	total	Media	Desv.Est.
5A-L1	2	28,7500	0,0141
5A-L2	2	35,5400	0,0849
Total	2	64,2900	0,0990

#### Alfa de Cronbach

Alfa

0,4898

Fuente: Elaboración propia utilizando el programa Minitab 19.

#### F6. Medición G.

### Análisis de elementos de 6A-L1; 6A-L2

#### Matriz de correlación

Correlación de Pearson de 6A-L1 y 6A-L2 = -1,000

#### Estadísticas totales y de elementos

Variable	Conteo		
	total	Media	Desv.Est.
6A-L1	2	29,950	3,154
6A-L2	2	40,995	0,728
Total	2	70,945	2,425

#### Alfa de Cronbach

Alfa

-1,562

Fuente: Elaboración propia utilizando el programa Minitab 19.

### 3. Desglose total de los gastos incurridos en el proyecto.

Descripción	Monto (colones)	Detalle
Barras de acero 1020	68929	7 barras de 50 cm de largo y 2" de diámetro
Esmerilador angular	89950	Herramienta para desgastar las barras de acero y obtener limadura.
Discos de corte y desbaste	146840	Para utilizar en el esmerilador angular. Se han requerido 5 de desbaste de 9" y 29 de corte fino de 7".
Respirador 3M	30275	Para protección en el proceso de limado debido a las partículas finas liberadas en el desgaste de las barras de acero.
Fresas para fresadora	52070	Se requirieron 2 fresas (brocas) para usar en la fresadora del taller de Diseño Industrial en la obtención de viruta de acero.
Extracción de limadura de acero	188600	Se pagó a 1200 la hora de trabajo para la obtención de la limadura del acero.
Baldes plásticos	11215	Baldes plásticos con tapa hermética para almacenar la limadura y viruta de acero.
Repuestos licuadora	23500	Se requirieron 4 cuchillas de licuadora más una base para poder licuar toda la viruta de acero obtenida.
Bolsas plásticas, ligas, sacos	7040	Para uso en los laboratorios de Ingeniería en Construcción.
Balines de metal	7200	Se requirió para hacer contrapeso en las lecturas de adherencia magnética.
Imanes de Neodimio	1656	Se requirieron para las pruebas de adherencia magnética a los especímenes de concreto.
Cuchilla para corte de material y cinta.	11500	Se requirió esto para lo referente al proceso de limado de acero.
Guantes, lagartos, arandelas, cable #12	1830	Se requirieron para trabajar con las fuentes de corriente directa.
Tornillos y expansores para sostener un solenoide	17055	Se requiere de unas piezas para sostener un solenoide en una máquina para pruebas de tensión.
Total	657660	