

1. Introducción

1.1. Generalidades

Debido a que la tecnología del concreto se está desarrollando en todo el mundo desde hace mucho tiempo, y cada vez se aumentan las exigencias de este material en las obras civiles que se desean realizar, es de vital importancia investigar su comportamiento físico y mecánico, ya que esto conllevará a obtener mejores diseños, permitiendo que las construcciones sean de mejor calidad y seguridad.

El esfuerzo que el concreto puede resistir como material compuesto está determinado principalmente, por las características del mortero (mezcla de cemento, arena y agua), de los agregados gruesos y de la interface entre estos dos componentes. Debido a lo anterior, morteros con diferentes calidades y agregados gruesos con diferentes propiedades (forma, textura, mineralogía, resistencia, etc.), pueden producir concretos de distintas resistencias.

Los agregados forman la mayor parte del volumen del material, se consideran componentes críticos en el concreto y tienen un efecto significativo en el comportamiento de las estructuras. La necesidad de contar con un concreto de calidad hace indispensable conocer a detalle sus componentes, ya que tanto la resistencia como la durabilidad dependen de las propiedades físicas y químicas de ellos, especialmente de los agregados. Sin embargo, uno de los problemas que generalmente encuentran los ingenieros y los constructores al emplear el concreto, es la poca verificación de las propiedades de los agregados pétreos que utilizan, lo que propicia con cierta frecuencia resultados diferentes a los esperados.

Los agregados son un conjunto de partículas, de origen natural o artificial, que pueden ser tratados o elaborados. Pueden tener tamaños que van desde partículas casi invisibles hasta pedazos de piedra, junto con el agua y el cemento, conforman el trío de ingredientes necesarios para la fabricación de concreto.

La importancia del uso, tipo y calidad correcta del agregado no se puede subestimar. Los agregados fino y grueso ocupan cerca del 70% al 80% del volumen del concreto, e influyen fuertemente en las propiedades tanto en estado fresco como endurecido, en las propiedades de la mezcla del concreto.¹

Una de las características mecánicas importante del concreto es la resistencia a Compresión y Flexo – Tracción, el módulo de rotura es una manera de obtener la resistencia a la Flexo - Tracción del concreto y se obtiene al fallar una viga de concreto no reforzado y se calcula a partir de la fórmula correspondiente a los esfuerzos producidos por flexión, el módulo de rotura está entre 10% y 20% por ciento de la resistencia a compresión.²

Se investiga el comportamiento del concreto Compresión (ensayo de cilindros) y a Flexo - Tracción (ensayo de vigas prismáticas) determinando de esta manera las características mecánicas propias de este material (el concreto).

1.2. Planteamiento del Problema

Tomando en cuenta que en las últimas décadas en nuestro país se va construyendo proyectos a una escala cada vez mayor, utilizando en su gran mayoría como elemento estructural el hormigón, para los vaciados de las Fundaciones, Columnas, Losas, vigas, pavimento rígido, etc.

Hoy en día se realizan construcciones civiles dentro de la ciudad de Yacuiba, utilizando agregados de diferentes canteras, sin embargo, los constructores que adquieren dicho material lo utilizan sin conocer sus propiedades y por ende esto genera un alto grado de incertidumbre al momento de realizar el hormigón ya que al no conocer las propiedades de sus componentes no podemos saber si este alcanzará la resistencia esperada.

¹GUTIÉRREZ DE LÓPEZ, Libia. *El concreto y otros materiales para la construcción: p.48*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 1996.

²RIVERA L, Gerardo A. *Concreto simple. Capítulo 6*. Universidad de Cauca. 2010.

Estas propiedades deberían cumplir con ciertos requisitos técnicos para la elaboración de hormigón, sin embargo ni los propietarios de las canteras ni los mismos constructores se han preocupado en determinarlas y es por eso que en muchos casos al realizar hormigón con cemento de calidad, agua potable y las cantidades necesarias de material, etc. aun así no se obtiene la resistencia deseada quedando como única explicación que la calidad de los agregados fue la que influyó entonces resulta sumamente importante la necesidad de determinarla.

De igual manera otro problema al momento de realizar hormigón es que se utilizan cantidades asumidas a través de la experiencia del constructor o del mismo maestro de obra, sin embargo, si nos adentramos en el campo de la dosificación sabremos que al momento de calcularla esta varía de cantera en cantera debido a que las propiedades de los materiales no van a ser nunca las mismas.

1.2.1. Formulación del Problema

Los agregados de las canteras en estudio cumplen o no, las especificaciones técnicas de calidad para la elaboración de un Hormigón Estructural tipo H-21.

1.3. Objetivos

1.3.1. General

Determinar la caracterización de los agregados de las tres canteras de mayor producción de la ciudad de Yacuiba, realizando un diagnóstico de su calidad para la elaboración de un Hormigón Estructural tipo H-21, según Norma 211.1 de la ACI, compatible con la NB 1225001.

1.3.2. Específicos

– Caracterizar los agregados que se utilizan en la construcción de obras civiles para la elaboración de hormigón, de las Canteras Jurado, Cantera Reyes y Cantera Sánchez, que se encuentran en la ciudad de Yacuiba, provincia Gran Chaco del departamento de Tarija.

- Realizar un diagnóstico de la calidad de los agregados usados en la construcción de obras civiles en la zona.
- Determinar una alternativa de combinación de agregados entre las Canteras Jurado, Cantera Reyes, Cantera Sánchez y Cantera Brañez de tal forma que cumplan con las condiciones mínimas necesarias para la elaboración de un Hormigón Estructural tipo H-21.
- Realizar un análisis de los resultados obtenidos de los ensayos de Compresión y Flexo-Tracción.
- Verificar experimentalmente el Módulo de Rotura del concreto estructural.

1.4. Justificación de la Investigación

La presente investigación se realiza con la finalidad de conocer las propiedades de los agregados de: Canteras Jurado, Cantera Reyes y Cantera Sánchez; para de esta manera conocer si dichos materiales cumplen con las normas técnicas establecidas.

Esta información será de mucha utilidad para los constructores, entidades públicas y usuarios particulares ya que conocerán la fiabilidad de los agregados empleados y sabrán de manera certera qué resistencia esperar del hormigón que preparen en obra.

Al realizar un diagnóstico de la calidad de los materiales que se utilizan en la elaboración del Concreto, se puede tener un conocimiento muy amplio sobre la eficiencia de las diferentes estructuras construidas hasta el momento en la región.

1.5. Alcance

La investigación consistió en acudir a las canteras antes nombradas y obtener material pétreo con el consentimiento de los propietarios de las mismas, estas muestras fueron llevadas al Laboratorio de Hormigones de la Empresa Constructora COOPERECAB S.R.L. en la ciudad de Yacuiba en donde pasaron por diversos ensayos con la finalidad de obtener sus propiedades mecánicas.

Una vez obtenidas las propiedades mecánicas de las muestras en estudio, se procedió a realizar el cálculo de la dosificación para hormigones de diferentes resistencias a compresión, flexión y

asentamientos, se realizarán diferentes dosificaciones para la elaboración cilindros de hormigón de diferentes resistencias a compresión y flexo-tracción todos para un asentamiento de 5 a 7 cm que es el tipo de hormigón más común empleado en obras civiles.

Posteriormente los cilindros y vigas serán ensayados a compresión y flexión para obtener su respectiva resistencia y comprobar si cumplían con lo establecido por la dosificación aplicada.

A continuación, se analizará toda la información obtenida para obtener un diagnóstico de la calidad de materiales de la zona.

2. Marco Teórico

2.1. Definición de Concreto

El concreto, técnicamente conocido como concreto hidráulico, por utilizar agua en su producción y porque fragua dentro del agua se puede definir como una mezcla homogénea de agua, cemento, arena y grava y algunas veces aditivos que son útiles para mejorar su resistencia, fluidez, acelerar el proceso de fraguado o retardarlo; indirectamente el aire también hace parte del concreto ya que este queda atrapado en la estructura del concreto.

Este producto o material se ha utilizado en la industria de la construcción por su “fácil producción”, propiedades mecánicas y su economía. Se puede decir que el concreto es una roca fabricada por el hombre la cual presenta alta resistencia a la compresión y baja a tracción, pero para compensar este defecto se ha combinado con el acero, para que sea este el que absorba los esfuerzos de tensión que se puedan presentar; dando lugar al llamado concreto reforzado.

El concreto es un material que es “fácil de producir” pero en esta producción intervienen muchas variables que si son manejadas inadecuadamente pueden modificar el comportamiento del material.

Por esta razón es indispensable clasificar u obtener de la mejor manera posible los materiales que serán utilizados en su fabricación, por lo tanto, se debe tener un conocimiento profundo de las materias primas a utilizar, ya que éstas varían de una región a otra considerablemente.

2.2. Materias Primas del Concreto

2.2.1. Agua

El agua es el compuesto que se encarga de hidratar el cemento para que desarrolle su capacidad ligante pero también se encarga de dar fluidez a la mezcla de concreto.

Se puede decir que se necesita agua suficiente para hidratar el cemento y para dar la fluidez necesaria, pero se debe tener en cuenta que de la relación agua/cemento depende la resistencia del concreto por lo tanto se debe limitar la cantidad de agua a la necesaria para conseguir estos propósitos.

El agua adicional en el concreto produce porosidades en el momento del fraguado ya que esta agua trata de salir de adentro hacia fuera dejando en su camino capilaridades o porosidades que pueden afectar la resistencia.

Cuando se necesitan mezclas muy fluidas no necesita conseguirlas con agua, sino que se conviene utilizar aditivos plastificantes que no solo ayudan a mejorar la fluidez, sino que en algunos casos se logra conseguir una resistencia extra. En el momento de escoger el agua a utilizar se corresponde inspeccionar que no tenga sustancias perjudiciales o impurezas como: demasiados sólidos disueltos, carbonatos, cloruros (sales), aceites, sustancias alcalinas y materia orgánica.

2.2.2. Cemento

El cemento que se utiliza para producir concreto es el cemento Pórtland el cual se obtiene al pulverizar el clinkler con adición de yeso, el clinkler resulta de la calcinación de una mezcla debidamente dosificada de materiales silíceos, calcáreos y férricos.

Los principales componentes del cemento Pórtland son: cal, sílice, alúmina y óxido de hierro. Generalmente estas materias primas no se encuentran en la naturaleza por lo cual se hace necesario mezclar sustancias minerales que las contienen como calizas, arcillas, en algunas ocasiones es necesario agregar directamente óxidos de hierro o arenas silíceas, para ajustar las proporciones de cada compuesto con el fin de obtener reacciones químicas equilibradas. El yeso hidratado también es utilizado para retardar el tiempo de fraguado de la pasta de cemento. Se puede adicionar escorias y son llamados siderúrgicos y cuando se les agrega puzolanas se les llama cementos Pórtland puzolánicos.

Peso específico del cemento: se define como la relación de peso a volumen; su valor varía entre 3.0 a 3.2 gr/cm³ para el cemento Pórtland tipo I, el peso específico no indica la calidad del cemento, pero es importante para el diseño y control de mezclas de concreto, características que se presentan en la Tabla 1.³

³GUTIÉRREZ DE LÓPEZ, Libia. *El concreto y otros materiales para la construcción: p.42.*
Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 1996.

Tipo*	Descripción	Características Opcionales
I	Uso General	1, 5
II	Uso general; calor de hidratación moderado y resistencia moderada a los sulfatos	1, 4, 5
III	Alta resistencia inicial	1, 2, 3, 5
IV	Bajo calor de hidratación	5
V	Alta resistencia a los sulfatos	5, 6
Características Opcionales 1. Aire incluido, IA, IIA, IIIA. 2. Resistencia moderada a los sulfatos: C ₃ A máximo, 8%. 3. Alta resistencia a los sulfatos: C ₃ A máximo, 5%. 4. Calor de hidratación moderado: calor máximo de 290 kJ/kg (70cal/g) a los 7 días, o la suma de C ₂ S y C ₃ A, máximo 58%. 5. Alcali bajo: máximo de 0.60%, expresado como Na ₂ O equivalente. 6. El límite de resistencia Alternativa de sulfatos esta basado en el ensayo de expansión de barras de mortero.		

T (*) Para cementos especificados en la ASTM C 150.

Tabla 1 Características de los Cementos Pórtland (Fuente: ASTM C-150)

En Bolivia la norma del Instituto de Boliviano de Normalización y Calidad (IBNORCA) indica las siguientes tablas:

Clasificación y Composición de los Cementos						
Tipos de Cemento		Proporción de masa %				
		Tipo	Componentes Principales			Componentes Adicionales
Denominación	Designación		Clinker	Puzolana Natural	Filler Calizo	
Cementos Pórtland	Cemento Pórtland	I	95 a 100			0 a 5
	Cemento Pórtland con Puzolana	IP	70 a 94	6 a 30		0 a 5
	Cemento Pórtland con filler calizo	IF	80 a 94		6 a 15	0 a 5
Cemento Puzolánico		P	≥60	≤40		0 a 5

Tabla 2 Clasificación y Composición de los Cementos en Bolivia (Fuente: NB 011)

- 1) En estos valores se excluyen: el regulador de fraguado y los aditivos.
- 2) Los componentes adicionales pueden ser uno o dos entre puzolana y filler calizo, a menos que sean componentes principales del cemento.
- 3) La caliza a utilizarse como filler calizo o como componente adicional debera cumplir el requisito de un contenido minimo de 85% de carbonato calcico.⁴

	TIPO DE CEMENTO				CARACTERISTICAS
SOBOCE	IP30	IP40			Norma Boliviana NB-011
ITACAMBA			IF30	IF40	
COBOCE	IP30	IP40			
FANCESA	IP30	IP40			

Tabla 3 Tipos de Cementos elaborados por las Empresas Productoras en Bolivia según la NB-011 (Fuente Elaboración Propia)



Figura 1 Diferentes de marcas de Cemento elaborado por SOBOCE (Fuente: Soboce. (2020, 8 junio). Productos - Soboce. <https://smartsoluciones.cl/soboce/productos>)

2.2.3. Agregados

Los agregados (arena y grava) son un factor determinante en la producción de concretos hidráulicos ya que estos ocupan del 70% al 80% del volumen de la mezcla, por tal razón están íntimamente relacionados con la economía, durabilidad y estabilidad de las obras civiles. De aquí que el estudio de sus propiedades físicas y mecánicas se debe hacer cuidadosamente, porque de su estudio dependerá la calidad del concreto.¹

2.2.3.1. Agregado grueso (Grava)

El agregado grueso es el material con mayor proporción en las mezclas de concreto, por lo tanto, de este depende en gran parte la resistencia del concreto.

Para resistencias bajas y medianas mientras mayor sea el tamaño del agregado, mayor es la eficiencia del cemento; se denomina eficiencia a la relación entre la resistencia del concreto y el contenido de cemento.

¹de Normalización CTN 12-, C. T. (1995). *NB011 Cemento - Definiciones, clasificación y especificaciones*. IBNORCA.

Por otra parte, cuando se necesitan resistencias mayores a 250 kg/cm^2 se deben usar tamaños máximos menores para aumentar la eficiencia del cemento.

Características de un Agregado Grueso Adecuado:

- La granulometría debe ser bien gradada; la ausencia de tamaños produce segregación.
- El tamaño máximo se debe adaptar a las condiciones de la estructura y de los elementos estructurales.
- El agregado no debe ser de forma plana ni alargada ya que este tipo de material no se acomoda de la mejor manera al momento de ser vaciado dejando cavidades que afectan la resistencia.
- La densidad debe estar entre $2.3 \text{ gr/cm}^3 - 2.9 \text{ gr/cm}^3$; en la medida que ésta aumente aumentará la resistencia.
- La absorción debe oscilar entre 1% y 5%. No deben contener arcillas ni partículas deleznales.
- El contenido de finos se debe limitar a un valor entre 1% – 3%. Para que haya buena adherencia entre el agregado y el cemento.
- El desgaste en la máquina de los Ángeles debe ser menor del 35% para pavimentos rígidos y menor del 40% para estructuras.⁵

2.2.3.2. Agregado fino (Arena)

Se utiliza para llenar los vacíos en la mezcla de concreto, además actúa como lubricante para que los agregados gruesos rueden y se acomoden de la mejor manera.

La falta de arena produce mezclas ásperas y su exceso requiere de mayor cantidad de agua para lograr la fluidez necesaria.

Características de un Agregado Fino Adecuado:

- El agregado fino también debe ser bien gradado para que la mezcla se pueda compactar al máximo.

⁵GUTIÉRREZ DE LÓPEZ, Libia. *El concreto y otros materiales para la construcción: p.48.* Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 1996.

- La manejabilidad se ve afectada por los porcentajes que pasan los tamices N°50 y N°100 por lo cual se recomienda que el porcentaje que pasa el tamiz N°50 esté entre el 10% y 30% y el que pasa el tamiz N° 100 sea del 3% cuando se requieren superficies tersas.
- Para evitar segregación del material el módulo de finura de la arena debe estar entre 2.3 y 3.1.⁶

2.2.4. Obtención de los Agregados Naturales

Los agregados se pueden obtener generalmente de dos fuentes: de los ríos o de las canteras en estos sitios se hace una clasificación rudimentaria en el sitio de explotación tratando de separar las rocas grandes y separando la grava de la arena.

También existen proveedores de estos materiales que hacen una clasificación más detallada; generalmente por trituración, lo cual facilita la producción de concreto ya que se puede pedir la granulometría deseada.

2.3. Propiedades Físicas de los Agregados

2.3.1. Granulometría

El procedimiento para realizar la granulometría de un material se debe hacer de acuerdo a la A.S.T.M C-136.

La granulometría consiste en tomar una muestra representativa del material que vamos a utilizar en la fabricación del concreto, la cual debe estar seca para que no se formen grumos del material; antes de empezar el ensayo, se pesa, luego se hace pasar el material por unos tamices o mallas que están ordenados desde el de menor abertura hasta el de mayor abertura en orden ascendente; con una relación de las aberturas de 1 a 2 con la abertura del siguiente tamiz ; se pone la muestra en el la pila de tamices y se empieza a mover para que el material pueda bajar hasta el fondo.

⁶GUTIÉRREZ DE LÓPEZ, Libia. *El concreto y otros materiales para la construcción: p.50.* Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 1996.

Se puede utilizar una tamizadora para los últimos ocho tamices ya que se dificulta hacer pasar el material manualmente; al terminar la tamizada se empieza a pesar el material retenido en cada tamiz y se lo anota en el respectivo formato el cual debe contener peso del material retenido, % del material retenido, % retenido acumulado y % que pasa. Este ensayo se hace tanto para la grava como para la arena.

2.3.1.1. Curvas granulométricas

Las curvas granulométricas son una representación gráfica de la distribución de tamices del material; la gráfica está compuesta del porcentaje que pasa en cada tamiz en las ordenadas (escala aritmética) y el tamaño de cada tamiz en las abscisas (en escala logarítmica). Esta grafica nos ayuda a discernir rápidamente sobre la gradación de los tamaños que conforman el material.

Si la curva es uniforme o poco pendiente nos indica que el material es bien gradado es decir contiene de todos los tamaños.

Si la curva es vertical o muy pendiente nos indica que el material es mal gradado es decir faltan algunos tamaños en el material.

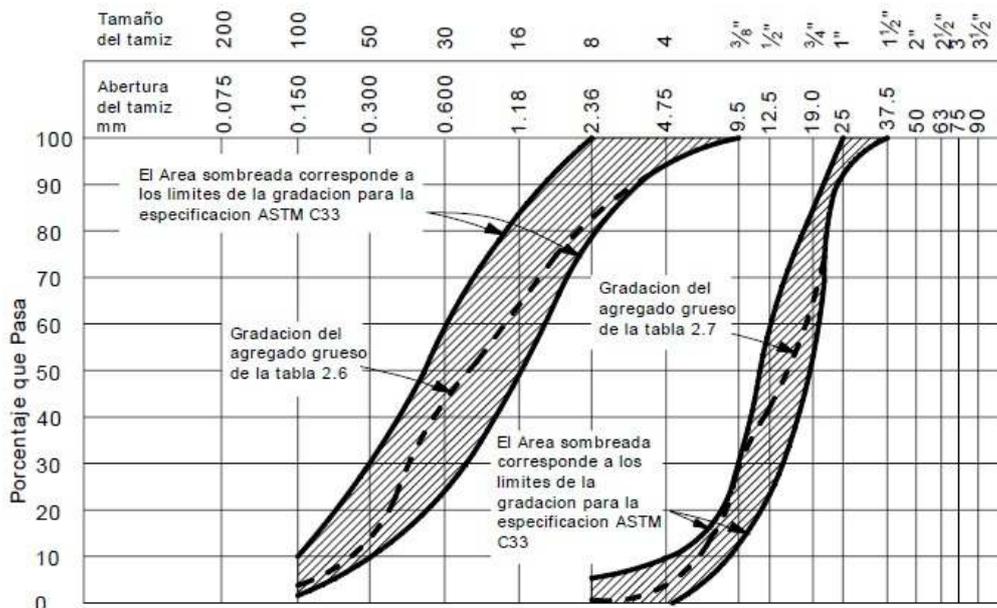


Figura 2 Agregados y gradaciones (Fuente: ASTM C-33)

Tamaño de la malla	Porcentaje que pasa en peso
9.52 mm (3/8")	100
4.75 mm (No.4)	95 a 100
2.36 mm (No.8)	80 a 100
1.18 mm (No.16)	50 a 85
0.60 mm (No.30)	25 a 60
0.30 mm (No.50)	5 a 30
0.15 mm (No.100)	0 a 10

Tabla 4 Límites para una gradación óptima para el agregado fino (Fuente ASTM C-33)

Tamaño nominal	Cantidades mas finas que cada tamiz de laboratorio (aberturas cuadradas). % en peso												
	4" 100 mm	3 1/2" 90 mm	3" 75 mm	2 1/2" 63 mm	2" 50 mm	1 1/2" 37.5 mm	1" 25.0 mm	3/4" 19.0 mm	1/2" 12.5 mm	3/8" 9.5 mm	No. 4 4.75 mm	No. 8 2.36 mm	No. 16 1.18 mm
3 1/2" a 1 1/2"	100	90-100	-	25-60	-	0-15	-	0-5					
2 1/2" a 1 1/2"	-	-	100	90-100	35-70	0-15	-	0-5					
2" a No. 4	-	-	-	100	95-100	-	35-70	-	10-30 I	-	0-5		
1 1/2" a No. 4	-	-	-	-	100	95-100	-	35-70	-	10-30 I	0-5		
1" a 3/8"	-	-	-	-	-	100	90-100	40-85	10-40 I	0-15	0-5		
1" a No. 4	-	-	-	-	-	100	95-100	-	25-60	-	0-10	0-5	
3/4" a No. 4	-	-	-	-	-	-	100	90-100	-	20-55	0-10	0-5	
2" a 1"	-	-	-	100	90-100	35-70	0-15	-	0-5				
1 1/2" a 3/4"	-	-	-	-	100	90-100	20-55	0-15	-	0-5			
1 a 1/2"	-	-	-	-	-	100	90-100	20-55	0-10	0-5			
3/4" a 3/8"	-	-	-	-	-	-	100	90-100	20-55	0-15	0-5		
1 1/2" a No. 4	-	-	-	-	-	-	-	100	90-100	40-70	0-15	0-5	
3/8" a No. 8	-	-	-	-	-	-	-	-	100	85-100	10-30 I	0-10	0-5

Tabla 5 Límites para una gradación óptima para el agregado grueso (Fuente ASTM C-33)

2.3.2. Tamaño Máximo Nominal del Agregado

El Tamaño Máximo Nominal designado para el agregado, siempre es un tamaño menor que aquél a través del cual se requiere que pase el 100% del material. Por ejemplo, si el tamaño máximo de agregado requerido es de 1", el 100% deberá pasar el tamiz anterior (1 1/2") y casi en su totalidad (entre 90-100%) el tamiz de 1". El Tamaño Mínimo es la máxima abertura de tamiz por el que pase menos del 10% en peso se retenga en su totalidad (Nº4).

2.3.3. Módulo de Finura (M.F.)

El módulo de finura, también llamado modulo granulométrico por algunos autores, no es un índice de granulometría, ya que un número infinito de tamizados da el mismo valor para el módulo de

finura. Sin embargo, da una idea del grosor o finura del agregado, por este motivo se prefiere manejar el término de Módulo de Finura.

El módulo de fineza se calcula sumando los porcentajes retenidos acumulados en los tamices estándar (nombrados más abajo) y dividiendo la suma entre 100.

$$MF = \frac{\sum \%retenido_acumulado(6+3+1\frac{1}{2} + \frac{3}{4} + \frac{3}{8} + N^{\circ}4 + N^{\circ}8 + N^{\circ}16 + N^{\circ}30 + N^{\circ}50 + N^{\circ}100}{100}$$

Ecuación 1 Fórmulas para determinar el módulo de fineza, después del tamizado

Los cambios significativos en la granulometría de la arena tienen una repercusión importante en la demanda de agua y, en consecuencia, en la trabajabilidad del hormigón, por lo que si hubiese una variación significativa en la granulometría de la arena deben hacerse ajustes en el contenido de cemento y agua para conservar la resistencia del hormigón. Para no tener que recalcular la dosificación del hormigón el módulo de finura del agregado fino, entre envíos sucesivos, no debe variar en más de ± 0.2 .

Las arenas se pueden clasificar en:

- Arenas finas: módulo de finura 0.5 – 1.5
- Arenas medias: módulo de finura 1.5 – 2.5
- Arenas gruesas: módulo de finura 2.5 – 3.5

Cuando la arena está mezclada con grava se obtienen módulos de finura mayores por tal razón se clasifican en:

- Arenas finas: módulo de finura 2.2– 2.6
- Arenas medias: módulo de finura 2.6 – 2.9
- Arenas gruesas: módulo de finura >2.9

2.3.4. Densidad, Densidad Relativa (Gravedad Específica) y Absorción del agregado (ASTM C127 Y ASTM C128)

Densidad Relativa es la relación que existe entre el peso y el volumen de las partículas de ese material incluido todos los poros, saturables y no saturables.

Sin embargo, todos los agregados son porosos hasta cierto punto, lo que permite la entrada de agua en los espacios de los poros o capilares cuando se colocan en la mezcla de hormigón, o bien, ya están húmedos cuando entran al hormigón. Por lo tanto, la definición cuidadosa de la gravedad específica debe tomar en cuenta tanto el peso como el volumen de la porción de agua contenida dentro de las partículas. El agua libre que se encuentra sobre las superficies exteriores del agregado húmedo no entra en el cálculo de la gravedad específica, pero contribuye a la relación A/C del hormigón.

Se presentan cuatro estados en el agregado, dependiendo del contenido de agua en sus poros y superficie:

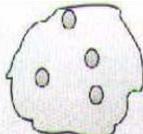
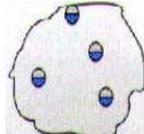
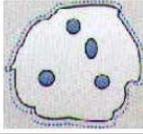
			
Seco a estufa Humedad=0%	Húmedo al aire. Humedad menor que la absorción. Poros parcialmente llenos de agua	Saturado superficie seca Humedad igual a la absorción. Poros completamente llenos de agua pero sin humedad superficial	Con humedad superficial. Humedad mayor a la absorción

Figura 3 Estado de saturación del agregado (Fuente: Josue. (s. f.). Semana IV.

https://tecnologdeconcret.blogspot.com/p/blog-page_16.html

La gravedad específica se puede calcular para un agregado totalmente seco (estado 1) o para un agregado en estado natural que puede estar seco en la superficie, pero contener humedad en sus poros (estado 2 o 3).

En el sistema métrico la fuerza de empuje B – C, se puede considerar equivalente al volumen del agregado en centímetros cúbicos.

Gs(SH)= Gravedad Específica (Densidad Relativa) en condición seca la Horno (SH)

Gs(SSS)= Gravedad Específica (Densidad Relativa) en condición saturada y superficialmente seca (SSS)

$$Gs_{(SH)} = \frac{A}{(B - C)}$$

*Ecuación 2 Fórmulas para determinar el estado de los agregados partiendo desde el tipo I
(Según Figura 3)*

$$Gs_{(SSS)} = \frac{B}{(B - C)}$$

*Ecuación 3 Fórmulas para determinar el estado de los agregados partiendo desde el tipo I
(Según Figura 3)*

Donde:

A: Masa al aire de la muestra seca al horno, g

B: Masa al aire de la muestra saturada y superficialmente seca, g

C: Masa al aparente de la muestra saturada en agua, g

La Absorción se define como el incremento de peso de un árido poroso seco, hasta lograr su condición de saturación con la superficie seca, debido a la penetración de agua a sus poros permeables.

La absorción es el valor de la humedad del agregado cuando tiene todos sus poros llenos de agua, pero su superficie se encuentra seca. En esta condición se hacen los cálculos de dosificación para elaborar el hormigón. Sin embargo, el agregado en los acopios puede tener cualquier contenido de humedad (estados 2 a 4). Si la humedad del agregado es inferior a la absorción, se deberá agregar más agua al hormigón para compensar la que absorberán los agregados. Por el contrario, si la humedad supera a la absorción, habrá que disminuir la cantidad de agua que se pondrá a la mezcla ya que los agregados estarán aportando agua.

El valor de la absorción es un concepto necesario para el ingeniero en obra, en el cálculo de la relación A/C de la mezcla de hormigón, pero, en algunos casos, puede ser que también refleje una estructura porosa que afecte la resistencia a la congelación y deshielo del hormigón.

No se suelen fijar límites de aceptación para la absorción debido a que ésta no solo depende de la porosidad de la roca, sino también de otros aspectos tales como la distribución granulométrica, contenido de finos, tamaño máximo de los agregados, forma de las partículas. Sin embargo, se

puede considerarse como rocas de buena calidad aquellas que presentan una absorción menor 3% para agregado grueso, y menores a 5% para el caso de agregado fino.

La absorción de un agregado grueso se expresa arbitrariamente en términos del agua que entra en los poros o capilares durante un periodo de remojo de 24 h y se calcula sobre la base del peso del agregado secado al horno.

Se observa que, típicamente, algunas de las rocas sedimentarias más porosas y más blandas tienen valores más altos de absorción.

2.3.5. Densidad Aparente (Peso unitaria) (ASTM C-29)

Se define como la relación entre el peso de una muestra de agregado compuesta de varias partículas y el volumen que ocupan estas partículas agrupadas dentro de un recipiente del volumen conocido. Este valor depende del acomodo de las partículas en el recipiente por tal razón de su granulometría.

Existen dos clases de masa unitaria:

- **Peso unitario compactado:** Se denomina compactada ya que la muestra es compactada con una varilla en el recipiente que la contiene. La masa unitaria compactada es la división del peso del material compactado y el volumen del recipiente que lo contiene.
- **Peso unitario suelto:** es el peso del agregado suelto dividido entre el volumen que ocupa. Estos valores se deben tener en cuenta ya que el volumen en banco está compactado, pero cuando es transportado está en estado suelto por tal razón ocupará mucho más volumen.

2.4. Propiedades Mecánicas de los Agregados

2.4.1. Método de Ensayo Normalizado para la resistencia a la degradación de los áridos gruesos de tamaño pequeño por el método de abrasión e impacto en la Máquina Los Ángeles (ASTM C 131)

Esta es la prueba que más se aplica para averiguar la calidad global estructural del agregado grueso. Este método establece el procedimiento a seguir para determinar el desgaste, por abrasión, del agregado grueso, desde el tamaño de malla 3" (75 mm) hasta el tamaño de N° 8 (2.36 mm), utilizando la máquina de Los Ángeles.

La muestra deberá estar limpia y debe ser representativa la cantidad a ensayar.

Una vez que se alcanza el número requerido de revoluciones del tambor, se tamiza el agregado para determinar el porcentaje de agregado que ha sido reducido hasta un tamaño menor que 1.7mm (tamiz N°12). Excepto en el caso de la escoria siderúrgica, la prueba parece dar un índice útil de la integridad estructural global del agregado.



Figura 4 Máquina de Abrasión de los Ángeles (Fuente: Elaboración Propia)

La máquina de Los Ángeles consiste en un tambor cilíndrico hueco, de acero, cerrado en sus extremos. La carga abrasiva consiste de esferas de acero. Cada una de ellas debe pesar entre 390 y 445 gramos, esta carga depende de la granulometría de la muestra a ensayarse.

Un anaquel que está en el interior del tambor rotatorio recoge la carga de bolas y agregado en cada revolución y la deja caer conforme se aproxima al punto más alto de su recorrido, de este modo el agregado experimenta cierta acción de frotamiento y vuelcos, así como un impacto considerable, durante las 500 revoluciones que especifica la norma.

2.4.2. Método de Ensayo Normalizado para la determinación de la desintegración de los áridos mediante el método de los sulfatos de sodio o sulfato de magnesio (ASTM C 88)

Este método de ensayo investiga los áridos con el fin de estimar su grado de desintegración cuando son sometidos a la acción del tiempo para el hormigón y otras aplicaciones. Se realiza sumergiéndolos repetidas veces en soluciones saturadas de sulfato de sodio o sulfato de magnesio, seguido por un secado en horno con el fin de deshidratar parcialmente las sales precipitadas en los poros permeables del árido. La fuerza interna expansiva, derivada de la re-hidratación de las sales después de la re-inmersión, simula la expansión del agua al congelarse. Este método de ensayo proporciona información útil para juzgar el grado de desintegración de los áridos cuando no se dispone de la información adecuada de los registros del material en servicio, expuesto a las condiciones climáticas reales.



Figura 5 Agregado fino sumergido en Sulfato de Sodio (Fuente: Elaboración Propia)

Según los requerimientos de la ASTM C 33 – 03, especificación estándar para Agregados para Concreto, para agregados finos sujetos a 5 ciclos de la prueba de expansión, tendrá un promedio de pérdida de peso no mayor de 10% cuando sulfato de sodio sea usado, o de 15% cuando sulfato de magnesio sea usado.

2.5. Método para Elaboración Mezclas de Concreto - Método Según Norma 211.1 de la A. C. I. (American Concrete Institute)

Se define este método como la práctica estándar para seleccionar proporciones en condiciones normales, seleccionar su pesaje y masa de los ingredientes que componen el Hormigón.

2.5.1. Criterios para el Proporcionamiento de Mezclas de Concreto de Peso Normal

El proporcionamiento de mezclas de concreto, más comúnmente llamado diseño de mezclas es un proceso que consiste de pasos dependientes entre sí:

- a) Selección de los ingredientes convenientes (cemento, agregados, agua y aditivos).
- b) Determinación de sus cantidades relativas “proporcionamiento” para producir un, tan económico como sea posible, un concreto de trabajabilidad, resistencia a compresión y durabilidad apropiada. Estas proporciones dependerán de cada ingrediente en particular los cuales a su vez dependerán de la aplicación particular del concreto. También podrían ser considerados otros criterios, tales como minimizar la contracción y el asentamiento o ambientes químicos especiales.

Aunque se han realizado gran cantidad de trabajos relacionados con los aspectos teóricos del diseño de mezclas, en buena parte permanece como un procedimiento empírico. Y aunque hay muchas propiedades importantes del concreto, la mayor parte de procedimientos de diseño, están basados principalmente en lograr una resistencia a compresión para una edad especificada, así como una trabajabilidad apropiada. Además, es asumido que si se logran estas dos propiedades las otras propiedades del concreto también serán satisfactorias (excepto la resistencia al congelamiento y deshielo u otros problemas de durabilidad tales como resistencia al ataque químico). Sin embargo, antes de pasar a ver el método de diseño en uso común en este momento, será de mucha utilidad revisar, en más detalle, las consideraciones básicas de diseño.

2.5.2. Consideraciones Básicas

2.5.2.1. Economía

El costo del concreto es la suma del costo de los materiales, de la mano de obra empleada y el equipamiento. Sin embargo, excepto para algunos concretos especiales, el costo de la mano de obra y el equipamiento son muy independientes del tipo y calidad del concreto producido. Por lo tanto, los costos de los materiales son los más importantes y los que se deben tomar en cuenta para

comparar mezclas diferentes. Debido a que el cemento es más costoso que los agregados, es claro que minimizar el contenido del cemento en el concreto es el factor más importante para reducir el costo del concreto. En general, esto puede ser realizado del siguiente modo:

- Utilizando el menor asentamiento (slump) que permita una adecuada colocación.
- Utilizando el mayor tamaño máximo del agregado (respetando las limitaciones indicadas según el tipo de estructura).
- Utilizando una relación óptima del agregado grueso al agregado fino.
- Y cuando sea necesario utilizando un aditivo conveniente.

Es necesario además señalar que, en adición al costo, hay otros beneficios relacionados con un bajo contenido de cemento. En general, las contracciones serán reducidas y habrá menor calor de hidratación. Por otra parte, un muy bajo contenido de cemento, disminuirá la resistencia temprana del concreto y la uniformidad del concreto será una consideración crítica.

La economía de un diseño de mezcla en particular también debería tener en cuenta el grado de control de calidad que se espera en obra. Como discutiremos en capítulos posteriores, debido a la variabilidad inherente del concreto, la resistencia promedio del concreto producido debe ser más alta que la resistencia a compresión mínima especificada. Al menos en pequeñas obras, podría ser más barato “sobre diseñar” el concreto que implementar el extenso control de calidad que requeriría un concreto con una mejor relación costo – eficiencia.

2.5.2.2. Trabajabilidad

Claramente un concreto apropiadamente diseñado debe permitir ser colocado y compactado apropiadamente con el equipamiento disponible. El acabado que permite el concreto, debe ser el requerido y la segregación deben ser minimizados. Como regla general el concreto debe ser suministrado con la trabajabilidad mínima que permita una adecuada colocación. La cantidad de agua requerida por trabajabilidad dependerá principalmente de las características de los agregados en lugar de las características del cemento.

Cuando la trabajabilidad debe ser mejorada, el rediseño de la mezcla debe consistir en incrementar la cantidad de mortero en lugar de incrementar simplemente el agua y los finos (cemento). Debido a esto es esencial una cooperación entre el diseñador y el constructor para asegurar una buena

mezcla de concreto. En algunos casos una menos mezcla económica podría ser la mejor solución.

2.5.2.3. Resistencia y Durabilidad

En general las especificaciones del concreto requerirán una resistencia mínima a compresión. Estas especificaciones también podrían imponer limitaciones en la máxima relación agua/cemento (a/c) y el contenido mínimo de cemento. Es importante asegurar que estos requisitos no sean mutuamente incompatibles.

Como veremos no necesariamente la resistencia a compresión a 28 días será la más importante, debido a esto la resistencia a otras edades podría controlar el diseño.

Las especificaciones también podrían requerir que el concreto cumpla ciertos requisitos de durabilidad, tales como resistencia al congelamiento y deshielo o ataque químico. Estas consideraciones podrían establecer limitaciones adicionales en la relación agua cemento (a/c), el contenido de cemento y en adición podría requerir el uso de aditivos.

Entonces, el proceso de diseño de mezcla, envuelve cumplir con todos los requisitos antes vistos. Asimismo, debido a que no todos los requerimientos pueden ser optimizados simultáneamente, es necesario compensar unos con otros; (por ejemplo, puede ser mejor emplear una dosificación que para determinada cantidad de cemento no tiene la mayor resistencia a compresión pero que tiene una mayor trabajabilidad).

Finalmente debe ser recordado que incluso la mezcla perfecta no producirá un concreto apropiado si no se lleva a cabo procedimientos apropiados de colocación, acabado y curado.

2.5.3. Información Requerida para el Diseño de Mezclas de Concreto

- Peso específico del cemento a emplear, ASTM C-188.
- Granulometría de los agregados, ASTM C-136.
- Densidad, Densidad Relativa (Gravedad Específica), y absorción de agregado grueso, ASTM C-127.

- Densidad, Densidad Relativa (Gravedad Específica), y absorción de agregado fino, ASTM C-128.
- Densidad aparente (Peso Unitario), ASTM C-29.

Pasos para el Proporcionamiento

Podemos resumir la secuencia del diseño de mezclas de la siguiente manera:

1. Estudio detallado de los planos y especificaciones técnicas de obra.
2. Elección de la resistencia promedio (f_{cr}').
3. Elección del Asentamiento (Slump)
4. Selección del tamaño máximo del agregado grueso.
5. Estimación del agua de mezclado y contenido de aire.
6. Selección de la relación agua/cemento (a/c).
7. Cálculo del contenido de cemento.
8. Estimación del contenido de agregado grueso y agregado fino.
9. Ajustes por humedad y absorción.
10. Cálculo de proporciones en volumen.

2.5.4. Pasos para el Proporcionamiento

Antes de diseñar una mezcla de concreto debemos tener en mente, primero, el revisar los planos y las especificaciones técnicas de obra, donde podremos encontrar todos los requisitos que fijó el ingeniero proyectista para que la obra pueda cumplir ciertos requisitos durante su vida útil.

2.5.5. Elección de la Resistencia Promedio (f_{cr}')

2.5.6.1. Cálculo de la desviación estándar

Método 1

Si se posee un registro de resultados de ensayos de obras anteriores deberá calcularse la desviación estándar. El registro deberá:

- a) Representar materiales, procedimientos de control de calidad y condiciones similares a aquellos que se espera en la obra que se va a iniciar.
- b) Representar a concretos preparados para alcanzar una resistencia de diseño f_c que este dentro del rango de $\pm 70 \text{ kg/cm}^2$ de la especificada para el trabajo a iniciar.

Si se posee un registro de 30 ensayos consecutivos la desviación estándar se calculará aplicando la siguiente fórmula:

$$s = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{(n-1)}}$$

Ecuación 4 Fórmula para determinar la Desviación Estándar

Donde:

s = Desviación estándar, en kg/cm²

X_i = Resistencia de la probeta de concreto, en kg/cm²

X_n = Resistencia promedio de n probetas, en kg/cm²

n = Número de ensayos consecutivos de resistencia

c) Consistir de por lo menos 30 ensayos consecutivos o dos grupos de ensayos consecutivos que totalicen por lo menos 30 ensayos.

Si se posee dos grupos de ensayos consecutivos que totalicen por lo menos un registro de 30 ensayos consecutivos, la desviación estándar promedio se calculará con la siguiente fórmula:

$$\bar{s} = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)(s_1)^2 + (n_2 - 1)(s_2)^2}{(n_1 + n_2 - 2)}}$$

Ecuación 5 Formula para determinar la Desviación Estándar Promedio

Donde:

s = Desviación estándar promedio en kg/cm².

s₁, s₂ = Desviación estándar calculada para los grupos 1 y 2 respectivamente en kg/cm².

n₁, n₂ = Número de ensayos en cada grupo, respectivamente.

Método 2

Si solo se posee un registro de 15 a 29 ensayos consecutivos, se calculará la desviación estándar “s” correspondiente a dichos ensayos y se multiplicará por el factor de corrección indicado en la tabla 11 para obtener el nuevo valor de “s”.

El registro de ensayos a que se hace referencia en este Método deberá cumplir con los requisitos a), b) del método 1 y representar un registro de ensayos consecutivos que comprenda un periodo de no menos de 45 días calendario.

Nº MUESTRAS	FACTOR DE CORRECCION
menos de 15	Usar Tabla 7
15	1,16
20	1,08
25	1,03
30	1

Tabla 6 Factores de Corrección (Fuente Norma 211.1 American Concrete Institute (ACI))

2.5.6. Cálculo de la Resistencia Promedio Requerida

Una vez que la desviación estándar ha sido calculada, la resistencia a compresión promedio requerida (f'_{cr}) se obtiene como el mayor valor de las ecuaciones (1) y (2). La ecuación (1) proporciona una probabilidad de 1 en 100 que el promedio de tres ensayos consecutivos estará por debajo de la resistencia especificada f'_c . La ecuación (2) proporciona una probabilidad de similar de que ensayos individuales estén 35 kg/cm² por debajo de la resistencia especificada f'_c .

a) Si la desviación estándar se ha calculado de acuerdo a lo indicado en el Método 1 o el Método 2, la resistencia promedio requerida será el mayor de los valores determinados por las fórmulas siguientes usando la desviación estándar “s” calculada.

$$f'_{cr} = f'_c + 1.34s \dots\dots\dots (1)$$

$$f'_{cr} = f'_c + 2.33s - 35 \dots\dots\dots (2)$$

Ecuación 6 Formulas para determinar la Resistencia Promedio Requerida

Donde:

s = Desviación estándar, en kg/cm².

b) Si se desconoce el valor de la desviación estándar, se utilizará la Tabla 12 para la determinación de la resistencia promedio requerida.

Resistencia a compresión especificada f_c	Resistencia promedio requerida f_{cr}
$f_c < 210 \text{ kg/cm}^2$	$f_{cr} = f_c + 70 \text{ kg/cm}^2$
$210 \text{ kg/cm}^2 \leq f_c \leq 350 \text{ kg/cm}^2$	$f_{cr} = f_c + 85 \text{ kg/cm}^2$
$f_c \geq 350 \text{ kg/cm}^2$	$f_{cr} = 1.10f_c + 50 \text{ kg/cm}^2$

Tabla 7 Resistencia Promedio Requerida f_{cr} (Fuente Norma 211.1 American Concrete Institute (ACI))

2.5.7. Elección del Asentamiento (Slump)

Si las especificaciones técnicas de obra requieren que el concreto tenga una determinada consistencia, el asentamiento puede ser elegido de la siguiente tabla:

Consistencia	Asentamiento
Seca	0" (0mm) a 2" (50mm)
Plástica	3" (75mm) a 4" (100mm)
Fluida	$\geq 5"$ (125mm)

Tabla 8 Consistencia y Asentamiento (Fuente Norma 211.1 de American Concrete Institute (ACI))

Si las especificaciones de obra no indican la consistencia, ni asentamientos requeridos para la mezcla a ser diseñada, utilizando la tabla 9 podemos seleccionar un valor adecuado para un determinado trabajo que se va a realizar. Se deberán usar las mezclas de la consistencia más densa que puedan ser colocadas eficientemente.

Tabla A: revenimiento "r" recomendado para varios tipos de construcción

ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS	r (cm)	
	MÁXIMO*	MÍNIMO
Fundaciones: Muros y Zapatas con refuerzo	7.50	2.50
Fundaciones: Muros y Zapatas sin refuerzo	7.50	2.50
Vigas y Muros reforzados	10	2.50
Columnas de edificios	10	2.50
Pavimento y Losas	7.50	2.50
Hormigón en masa	7.50	2.50

*Se puede incrementar 25 mm para métodos de compactación diferentes al vibrado.

*El revenimiento puede aumentar cuando se utilizan aditivos.

Fuente: ACI 211.1-91 Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete.

Tabla 9 Asentamiento o Revenimiento recomendado Según los diferentes tipos de Construcción (Fuente Norma 211.1 American Concrete Institute (ACI))

2.5.8. Selección de Tamaño Máximo Nominal del Agregado

Las Normas de Diseño Estructural recomiendan que el tamaño máximo nominal del agregado grueso sea el mayor que sea económicamente disponible, siempre que sea compatible con las dimensiones y características de la estructura y prescribe que el agregado grueso no deberá ser mayor de:

- a) 1/5 de la menor dimensión entre las caras de encofrados.
- b) 1/3 del peralte de la losa.
- c) 3/4 del espacio libre mínimo entre barras individuales de refuerzo, paquetes de barras, tendones o ductos de presfuerzo.

El tamaño máximo nominal determinado aquí, será usado también como tamaño máximo simplemente.

Se considera que, cuando se incrementa el tamaño máximo del agregado, se reducen los requerimientos del agua de mezcla, incrementándose la resistencia del concreto. En general este principio es válido con agregados hasta 40mm (1½”). En tamaños mayores, sólo es aplicable a concretos con bajo contenido de cemento.

2.5.9. Estimación del Agua de Mezclado y Contenido de Aire

La tabla 10, preparada en base a las recomendaciones del Comité 211.1 de la ACI, nos proporciona una primera estimación del agua de mezclado para concretos hechos con diferentes tamaños máximos de agregado con o sin aire incorporado.

Los valores del asentamiento para concreto con agregado más grande que 40mm (1½”) se basan en las pruebas de revenimiento hechas después de retirar las partículas mayores de 40mm (1½”) por tamizado húmedo.

Revenimiento	Agua, Kg/m ³ de hormigón según el tamaño máx. de árido							
	9.5	12.5	19	25	37.5	50	75	150
	mm	mm*	mm*	mm*	mm*	mm**	mm**	mm***
cm	¾"	½"	¾"	1"	1½"	2"	3"	6"
concreto sin aire incluido								
3 a 5	207	199	190	179	166	154	130	113
8 a 10	228	216	205	193	181	169	145	124
15 a 18	243	228	216	202	190	178	160	-
Cantidad aprox. de aire, en hormigón sin aire incluido [%]	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
Concreto con aire incluido								
3 a 5	181	175	168	160	150	142	122	107
8 a 10	202	193	184	175	165	157	133	119
15 a 18	216	205	197	184	174	166	154	-
Promedio recomendable de contenido total de Aire [%]	8	7	6	5	4.5	4	3.5	3
Contenido promedio de aire en porcentaje según el nivel de exposición								
Exposición Suave	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0
Exposición Moderada	6.0	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0	3.5	3.0
Exposición Severa	7.5	7.0	6.0	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0

Tabla 10 Requerimientos aproximados de agua de mezclado y de contenido de aire para diferentes valores de asentamiento y tamaños máximos de agregados. (Fuente Norma 211.1 American Concrete Institute (ACI))

Estos contenidos de agua de mezclado son valores máximos para agregado grueso angular y bien formado, y cuya granulometría está dentro de las especificaciones aceptadas (ASTM C 33).

* Para concreto que contiene agregado grande será tamizado húmedo por una malla de 40mm (1½") antes de evaluar el contenido de aire, el porcentaje de aire esperado en material más pequeño que 40mm (1½") debe ser el tabulado en la columna de 40mm (1½"). Sin embargo, los cálculos iniciales de las proporciones deben basarse en el contenido de aire como un porcentaje de la mezcla completa.

** Estos valores se basan en el criterio de que se necesita un 9% del contenido de aire en la fase de mortero del concreto.

Como se observa, la Tabla 10 no toma en cuenta para la estimación del agua de mezclado las incidencias del perfil, textura y granulometría de los agregados. Debemos hacer presente que estos valores tabulados son lo suficientemente aproximados para una primera estimación y que, dependiendo del perfil, textura y granulometría de los agregados, los valores requeridos de agua de mezclado pueden estar algo por encima o por debajo de dichos valores.

Al mismo tiempo, podemos usar la tabla 11 para calcular la cantidad de agua de mezcla tomando en consideración, además de la consistencia y tamaño máximo del agregado, el perfil del mismo. Los valores de la Tabla 11 corresponden a mezclas sin aire incorporado.

Tamaño máximo nominal del agregado grueso		Contenido de agua en el concreto, expresado en lt/m^3 , para los asentamientos y perfiles de agregado grueso indicados.					
		25mm a 50mm (1"-2")		75mm a 100mm (3"-4")		150mm a 175mm (6"-7")	
mm.	Pulg.	Agregado redondeado	Agregado anguloso	Agregado redondeado	Agregado anguloso	Agregado redondeado	Agregado anguloso
9.5	3/8"	185	212	201	227	230	250
12.7	1/2"	182	201	197	216	219	238
19.1	3/4"	170	189	185	204	208	227
25.4	1"	163	182	178	197	197	216
38.1	1½"	155	170	170	185	185	204
50.8	2"	148	163	163	178	178	197
76.2	3"	136	151	151	167	163	182

Tabla 11 Contenido de agua para la mezcla (Fuente Norma 211.1 American Concrete Institute (ACI))

La Tabla 11 nos muestra también el volumen aproximado de aire atrapado, en porcentaje, a ser esperado en un concreto sin aire incorporado y los promedios recomendados del contenido total de aire, en función del grado de exposición, para concretos con aire incorporado intencionalmente por razones de durabilidad a ciclos de congelamiento y deshielo, agua de mar o sulfatos.

Obtenidos los valores de cantidad de agua y de aire atrapado para un metro cúbico de concreto procedemos a calcular el volumen que ocupan dentro de la unidad de volumen de concreto:

$$\text{Volumen de agua (m}^3\text{)} = \frac{\text{Contenido de agua de mezclado (lts / m}^3\text{)}}{\text{Peso específico del agua (1000 kg / m}^3\text{)}}$$

Ecuación 7 Fórmula para determinar el Volumen de Agua para 1m³ de Concreto

2.5.10. Elección de la Relación Agua/Cemento (a/c)

Existen dos criterios (por resistencia, y por durabilidad) para la selección de la relación a/c, de los cuales se elegirá el menor de los valores, con lo cual se garantiza el cumplimiento de los requisitos de las especificaciones. Es importante que la relación a/c seleccionada con base en la resistencia satisfaga también los requerimientos de durabilidad.

2.5.10.1. Por resistencia

Para concretos preparados con cemento Pórtland tipo 1 o cementos comunes, puede tomarse la relación a/c de la tabla 13.

Relación agua/cemento en peso	Resistencia probable a compresión a 28 días (Kg/cm ²)	
	Concreto sin aire incorporado	Concreto con aire incorporado
0.35	420	335
0.44	350	280
0.53	280	225
0.62	225	180
0.71	175	140
0.80	140	110

Tabla 12 Relación agua cemento (a/c) (Fuente: Román, O. A. (2013). Tablas para dosificación por el método CBH-87 y ACI. Universidad Mayor de San Simón)

2.5.10.2. Por durabilidad

La Norma prescribe para un concreto de baja permeabilidad, o el concreto ha de estar sometido a procesos de congelación y deshielo en condición húmeda. Se deberá cumplir con los requisitos indicados en la tabla 13.

Tipo de estructura	Estructuras húmedas expuestas continua o frecuentemente a congelación y deshielo.	Estructura expuesta a agua de mar o sulfatos
Secciones delgadas (postes, cunetas, botaguas, trabajos ornamentales, etc.) y secciones con menos de 3 cm de recubrimiento para el acero.	0.45	0.40
Todas las demás estructuras	0.50	0.45

Tabla 13 Máxima Relación agua cemento a/c para estructuras sometidas a condiciones extremas. (Fuente Norma 211.1 American Concrete Institute (ACI))

2.5.11. Cálculo del Contenido de Cemento

Una vez que la cantidad de agua y la relación a/c han sido estimadas, la cantidad de cemento por unidad de volumen del concreto es determinada dividiendo la cantidad de agua por la relación a/c. Sin embargo, es posible que las especificaciones del proyecto establezcan una cantidad de cemento mínima. Tales requerimientos podrían ser especificados para asegurar un acabado satisfactorio, determinada calidad de la superficie vertical de los elementos o trabajabilidad.

$$\text{Contenido de cemento (kg / m}^3\text{)} = \frac{\text{Contenido de agua de mezclado (lts/m}^3\text{)}}{\text{Relación a/c (para } f'_{cr}\text{)}}$$

Ecuación 8 Fórmula para determinar el Contenido de Cemento (kg) para 1m³ de Concreto

$$\text{Volumen de cemento (m}^3\text{)} = \frac{\text{Contenido de cemento (kg)}}{\text{Peso específico del cemento (kg/m}^3\text{)}}$$

Ecuación 9 Fórmula para determinar el Volumen de Cemento (m³)

2.5.12. Estimación del Contenido de Agregado Grueso y Agregado Fino

Se determina el contenido de agregado grueso mediante la tabla 14, elaborada por el Comité 211.1 del ACI, en función del tamaño máximo nominal del agregado grueso y del módulo de fineza del agregado fino. La tabla 14 permite obtener un coeficiente b/b₀ resultante de la división del peso seco del agregado grueso entre el peso unitario seco y compactado del agregado grueso expresado en kg/m³.

TAMAÑO MÁXIMO DEL AGREGADO GRUESO		Volumen de agregado grueso, seco y compactado (*) por unidad de volumen de concreto, para diferentes módulos de fineza del agregado fino.			
		MODULO DE FINEZA DEL AGREG. FINO			
mm.	Pulg.	2.40	2.60	2.80	3.00
10	3/8"	0.50	0.48	0.46	0.44
12.5	1/2"	0.59	0.57	0.55	0.53
20	3/4"	0.66	0.64	0.62	0.60
25	1"	0.71	0.69	0.67	0.65
40	1 1/2"	0.76	0.74	0.72	0.70
50	2"	0.78	0.76	0.74	0.72
70	3"	0.81	0.79	0.77	0.75
150	6"	0.87	0.85	0.83	0.81

* Los volúmenes de agregado grueso mostrados, está en condición seca y compactada, tal como se describe en la norma ASTM C29.

Estos volúmenes han sido seleccionados a partir de relaciones empíricas para producir concretos con un grado adecuado de trabajabilidad para construcciones armadas usuales.

Para concretos menos trabajables, tales como el requerido en la construcción de pavimentos, pueden incrementarse los valores en 10% aprox.

Para concretos más trabajables, tales como los que pueden requerirse cuando la colocación es hecha por bombeo, los valores pueden reducirse hasta en un 10%.

Tabla 14 Volumen del agregado grueso para un metro cubico de Hormigón (Fuente Norma 211.1 American Concrete Institute (ACI))

Obtenido b/b_0 procedemos a calcular la cantidad de agregado grueso necesario para un metro cúbico de concreto, de la siguiente manera:

$$\text{Peso seco del A. grueso (kg / m}^3\text{)} = \frac{b}{b_0} \times (\text{Peso unitario compactado del A. grueso})$$

Ecuación 10 Fórmula para determinar el Peso seco de Agregado Grueso (kg/m³)

Entonces los volúmenes de los agregados grueso y fino serán:

$$\text{Vol. agregado grueso (m}^3\text{)} = \frac{\text{Peso seco del A. grueso}}{\text{Peso específico del A. grueso}}$$

$$\text{Vol. agregado fino (m}^3\text{)} = 1 - (\text{Vol. agua} + \text{Vol. aire} + \text{Vol. cemento} + \text{Vol. agregado grueso})$$

Ecuación 11 Fórmulas para determinar los Volúmenes de Agregados (m³)

Por consiguiente, el peso seco del agregado fino será:

$$\text{Peso agregado fino (kg / m}^3\text{)} = (\text{Vol. agregado fino}) (\text{Peso específico del agregado fino})$$

Ecuación 12 Fórmula para determinar el Peso del agregado Fino (kg) para 1m³ de concreto

2.5.13. Ajustes por Humedad y Absorción

El contenido de agua añadida para formar la pasta será afectada por el contenido de humedad de los agregados. Si ellos están secos al aire absorberán agua y disminuirán la relación a/c y la trabajabilidad. Por otro lado, si ellos tienen humedad libre en su superficie (agregados mojados) aportarán algo de esta agua a la pasta aumentando la relación a/c, la trabajabilidad y disminuyendo la resistencia a compresión. Por lo tanto, estos efectos deben ser tomados en cuenta y la mezcla debe ser ajustada tomándolos en cuenta.

Por lo tanto:

Si:

$$\begin{array}{l} \text{Agregado Grueso} \\ \text{Agregado Fino} \end{array} \left\{ \begin{array}{l} \text{Humedad} = \%W_g \\ \% \text{ absorcion} = \%a_g \\ \text{Humedad} = \%W_f \\ \% \text{ absorcion} = \%a_f \end{array} \right.$$

Pesos de agregados húmedos:

$$\text{Peso A. grueso humedo (kg)} = (\text{Peso A. grueso seco}) \cdot \left(1 + \frac{\%W_g}{100}\right)$$

$$\text{Peso A. fino humedo (kg)} = (\text{Peso A. fino seco}) \cdot \left(1 + \frac{\%W_f}{100}\right)$$

Ecuación 13 Formulas para determinar el Peso del agregado húmedo

Agua Efectiva:

$$\text{Agua en agregado grueso} = (\text{Peso A. grueso seco}) \cdot \left(\frac{\%W_g - \%a_g}{100}\right) = X$$

$$\text{Agua en agregado fino} = (\text{Peso A. fino seco}) \cdot \left(\frac{\%W_f - \%a_f}{100}\right) = Y$$

$$\text{Agua efectiva (Lts)} = \text{Agua de diseño} - (X + Y)$$

Ecuación 14 Formulas para determinar la Cantidad de Agua efectiva para 1m³ de Concreto

2.5.14. Cálculo de las Proporciones en Volumen

Cemento : agregado fino : agregado grueso / agua (Lts/Bls)

$$\frac{\text{Vol. cemento}}{\text{Vol. cemento}} : \frac{\text{Vol. A. fino}}{\text{Vol. cemento}} : \frac{\text{Vol. A. grueso}}{\text{Vol. cemento}} / \text{Agua (Lts/Bls)}$$

$$C : F : G / A$$

Ecuación 15 Formulas para determinar la Proporciones en Volumen para 1m³ de Concreto

2.6. Control para Concreto Fresco

Al tomar contacto con el agua y durante su proceso de mezclado, su estado es líquido; luego del tiempo necesario para obtener una buena mezcla (90 segundos), toma una consistencia cremosa. Es importante la trabajabilidad del hormigón fresco, su transporte hasta los lugares de moldeo sin producir segregación.

2.6.1. Método de Ensayo Normalizado para Asentamiento de Concreto de Cemento Hidráulico (ASTM C143)

También llamado cono de Abrams, para el ensayo se utiliza una formaleta metálica en forma de cono en la cual se vacía la mezcla de concreto en tres capas iguales de 25 golpes por cada capa con varilla de 5/8 de pulgada de diámetro, de punta redondeada, para esta investigación se determina una consistencia plástica, con un asentamiento de 50mm a 70mm.

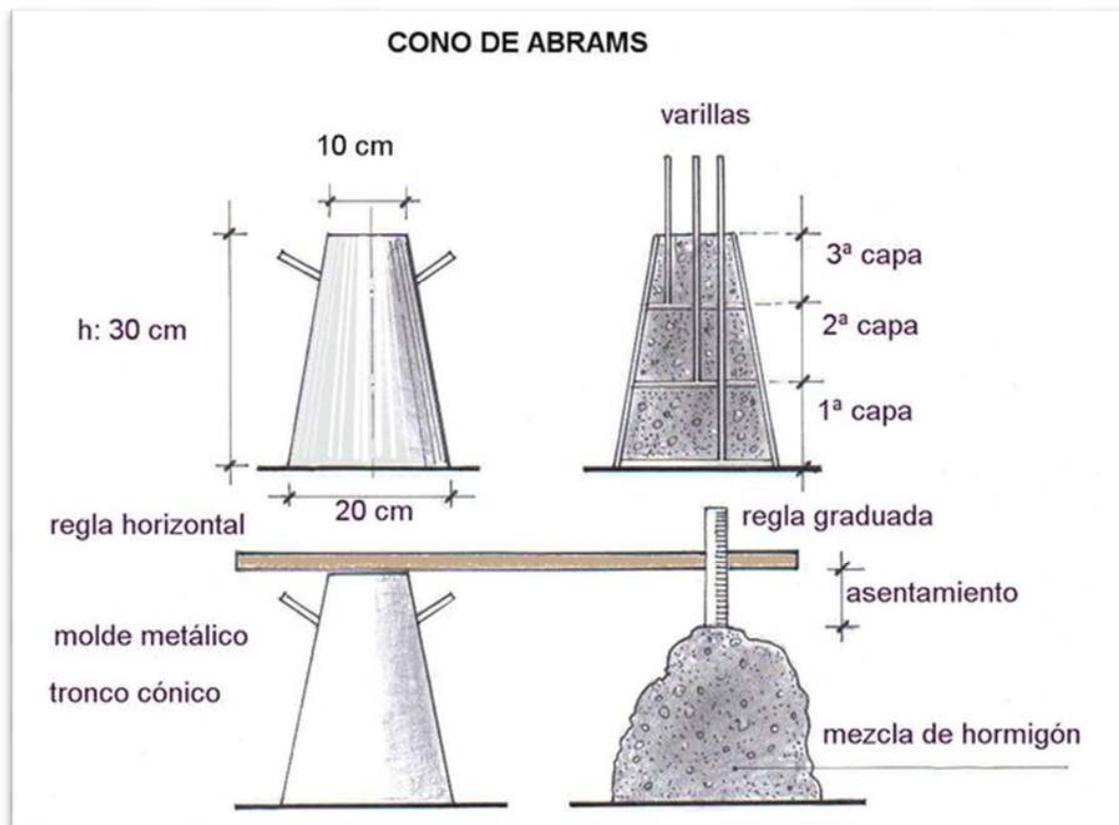


Figura 6 Cono de Abrams (Fuente: Portal de Arquitectura, Ingeniería y Construcción | Construmática. (s. f.). Construmática.com. <https://www.construmatica.com/>)

2.6.2. Práctica estándar para hacer y curar especímenes de prueba de concreto en el laboratorio (ASTM C192)

Esta práctica abarca los procedimientos para fabricar y curar especímenes de ensayo de hormigón en el laboratorio bajo un control preciso de los materiales y condiciones de prueba usando concreto.

2.6.2.1. Moldeo de Cilindros de Concreto



Figura 7 Cilindro para Concreto (FuentePortal de Arquitectura, Ingeniería y Construcción | Construmática. (s. f.). Construmática.com. <https://www.construmatica.com/>.)

2.6.2.2. Moldeo de Vigas de Concreto

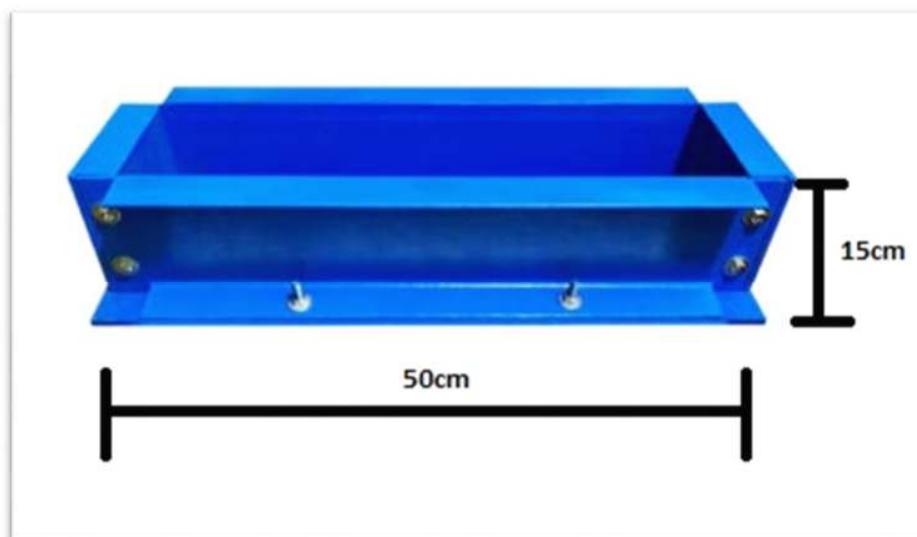


Figura 8 Viga para Concreto (Fuente: JMR EQUIPOS S.A.C. ®. (2022, 2 junio). JMR EQUIPOS S.A.C. | Estamos Contigo. JMR EQUIPOS S.A.C. | Estamos Contigo. <https://www.jmrequipos.com/>)

2.7. Control Concreto Endurecido

Después de su vertido, el hormigón pasa de su estado de fresco a estado sólido, perdiendo paulatinamente humedad y adquiriendo dureza. A medida que el hormigón experimenta este proceso de endurecimiento progresivo, se transforma de material plástico a sólido, mediante un proceso físico - químico complejo de larga duración.

En la etapa del material ya endurecido, las propiedades del hormigón evolucionan con el tiempo, dependiendo de las características y proporciones de los materiales que lo componen y de las condiciones ambientales a que está expuesto.

2.7.1. Refrentado de Cilindros de Concreto (ASTM C617)

Esta práctica cubre aparatos, materiales y procedimientos para cabecear cilindros de concreto recién elaborados, con cemento puro y cilindros y núcleos taladrados de concreto endurecido con yeso plástico de alta resistencia o mortero de azufre.



Figura 9 Refrentado de Cilindros Concreto (Fuente: Laboratorio de Control de calidad en la construcción | PYRCON. (s. f.). <http://www.pyrcon.com.mx/>)

2.7.2. Método de Prueba Estándar para Resistencia a la Compresión de Especímenes Cilíndricos de Concreto (ASTM C39)

Este método de ensayo cubre la determinación de la resistencia de a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto como moldeado cilindros y núcleos perforados.



Figura 10 Compresión de Cilindros Concreto (Fuente: Equipos para ensayos de materiales | Matest. (s. f.). <https://www.matest.com/es>)

La resistencia a compresión se calcula con la siguiente fórmula:

$$RC = \frac{P}{A}$$

Ecuación 16 Fórmula para determinar la Resistencia a Compresión

Donde:

P= Carga Máxima Aplicada en kg.

A= Área de la sección Transversal en cm².

RC= Resistencia a la compresión del cilindro en kg/cm².

2.7.3. Método Estándar de Ensayo para Resistencia a la Flexión Del Concreto (Usando viga simple con carga a los tercios del claro) (ASTM C78)

Este método de ensayo determina la resistencia a la flexión del hormigón usando una viga simple con carga en los tercios.

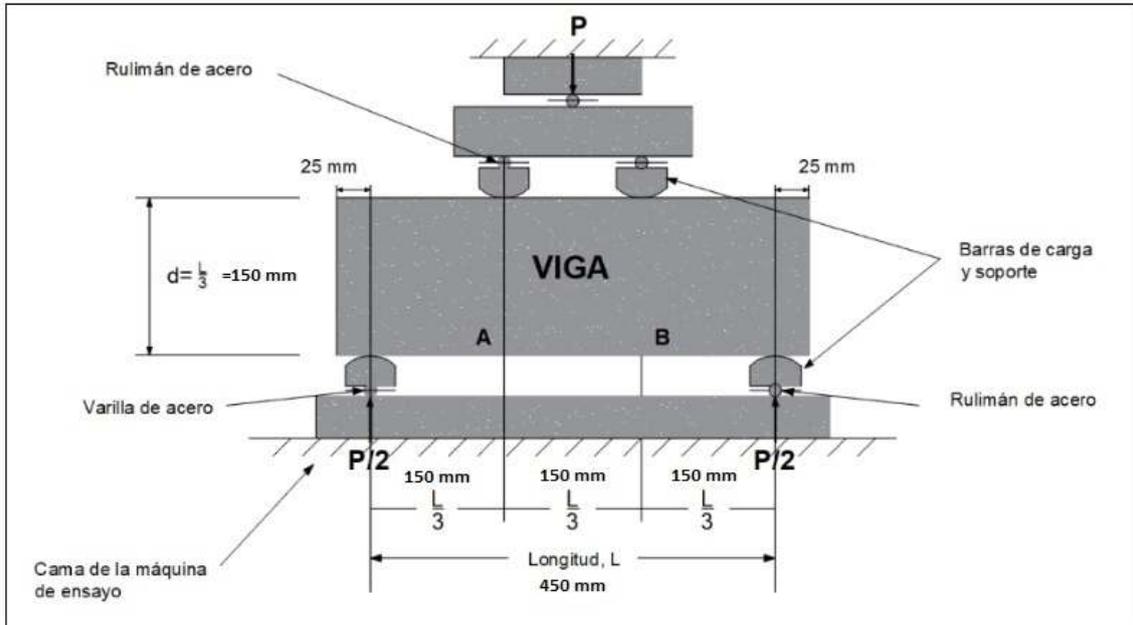


Figura 11 Flexión de las Vigas de Concreto (Fuente: Equipos para ensayos de materiales | Matest. (s. f.). <https://www.matest.com/es>)

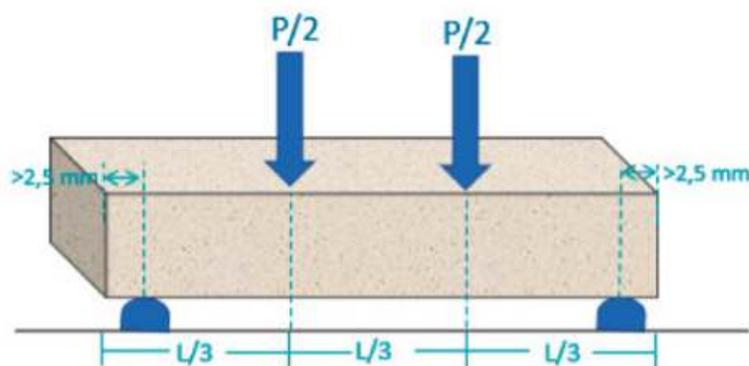


Figura 12 Flexión de las Vigas de Concreto (Fuente: Admin. (2021, 10 septiembre). Calidad y propiedades del concreto en estado endurecido. Cemento ALIÓN. <https://alion.com.co/calidad-y-propiedades-del-concreto>)

La resistencia a la flexión se calcula de la siguiente manera, si la falla ocurre dentro del tercio central, el módulo de rotura se determina con la fórmula:

$$MR = \frac{P * L}{b * d^2}$$

Ecuación 17 Fórmula para determinar la Módulo de Rotura.

Donde:

P= Carga Máxima Aplicada en kg.

L= Longitud entre los apoyos en cm.

b= Ancho de la viga en la posición de ensayo, en la sección de la falla en cm.

d= Altura de la viga en la posición de ensayo, en la sección de la falla en cm.

MR= Modulo de la Rotura de la viga en kg/cm².

2.7.4. Correlaciones entre la Resistencia a la Flexión y las Resistencias a la Compresión

El módulo de rotura presenta valores que varían entre un 10% y un 20% de la resistencia a la compresión. Una relación aproximada, que puede utilizarse cuando no se disponga de ensayos de flexión, es la siguiente:⁷

$$MR = k * \sqrt{f_c'}$$

Ecuación 18 Fórmula para determinar el Módulo de Rotura cuando no se dispone ensayos de flexión.

Donde:

MR= Módulo de la Rotura estimado para el concreto en kg/cm².

f_c'= Resistencia a diseño del concreto en kg/cm².

k= Constante que varía normalmente entre 2,0 y 2,7, para resistencias en kg/cm² a 28 días.

⁷RIVERA L, Gerardo A. *Concreto simple. Capítulo 6.* Universidad de Cauca. 2010.

3. Ingeniería del Proyecto

3.1. Diseño de Hormigón Normal por el Método A.C.I. 211.1-91

Los métodos de diseño de mezclas de hormigón, abarcan desde los analíticos experimentales y empíricos, hasta volumétricos, todos estos métodos han evolucionado y ha llevado a procedimientos acordes con las necesidades de los proyectos y se han desarrollado algunas guías ya normalizadas para darle cumplimiento a la calidad del hormigón que se requiere.

Para la utilización de estas tablas se debe tener como requisitos mínimos ensayos de:

- Peso específico del cemento a emplear, ASTM C-188.
- Granulometría de los agregados, ASTM C-136.
- Densidad, Densidad Relativa (Gravedad Específica), y absorción de agregado grueso, ASTM C-127.
- Densidad, Densidad Relativa (Gravedad Específica), y absorción de agregado fino, ASTM C-128.
- Densidad aparente (Peso Unitario), ASTM C-29.

3.1.1. Cemento

El cemento utilizado para la mezcla de hormigón es Cemento El Puente “estándar” de tipo IP-30, es el más utilizado en esta zona de Bolivia.

Las características del cemento nos proporcionan el fabricante.



Figura 13 Cemento El Puente IP30 (Fuente: Soboce. (2020, 8 junio). Productos - Soboce. <https://smartsoluciones.cl/soboce/productos>)

3.1.2. Procedencia del Agregado

Los agregados utilizados para el trabajo de investigación, tanto la grava como la arena fueron muestreados en los acopios de una seleccionadora ubicada en la población de Caiza Estación a 30 Km de la ciudad de Yacuiba y para la combinación de agregado se trajo Grava de Villa Montes 100 Km de la ciudad de Yacuiba.



Figura 14 Cantera Jurado (Fuente: GoogleMap)



Figura 15 Cantera Jurado (Fuente: Elaboración Propia)



Figura 16 Cantera Reyes (Fuente: GoogleMap)



Figura 17 Cantera Reyes (Fuente: Elaboración Propia)



Figura 18 Cantera Sánchez (Fuente: GoogleMap)



Figura 19 Cantera Sánchez (Fuente: Elaboración Propia)



Figura 20 Cantera Brañez (Fuente: GoogleMap)



Figura 21 Cantera Brañez (Fuente: Elaboración Propia)

3.1.3. Caracterización de los Agregados

3.1.3.1. Ensayo de Granulometría, ASTM C-136

Los agregados grueso y fino de las Canteras Jurado, Cantera Reyes, Cantera Sánchez y Cantera Brañez, mediante los Ensayos de Granulometría son materiales bien gradados y tiene un tamaño máximo nominal de 1 pulgada para el agregado grueso y un tamaño máximo de 3/8 pulgadas en el agregado fino, características cumplen con las condiciones para hormigones de uso estructural A.S.T.M. C-136.

ASTM C-136 ENSAYO GRANULOMETRÍA - AGREGADO GRUESO					
LUGAR DE PROCEDENCIA	TAMAÑO MÁXIMO (pulgadas)	CUMPLE LOS LÍMITES DE GRADACIÓN	SEGÚN SU CURVA GRANULOMÉTRICA	% QUE PASA TAMIZ N°4	% DE HUMEDAD
CANTERA JURADO - CAIZA	1	SI	BIEN GRADADA	4,60	1,47
CANTERA REYES - CAIZA	1	SI	BIEN GRADADA	5,40	1,76
CANTERA SÁNCHEZ - CAIZA	1	SI	BIEN GRADADA	8,10	2,09
COMBINACIÓN 65% CANTERA JURADO - CAIZA 35% CANTERA BRAÑEZ - VILLA MONTES	1	SI	BIEN GRADADA	5,40	1,65
COMBINACIÓN 35% CANTERA JURADO - CAIZA 65% CANTERA BRAÑEZ - VILLA MONTES	1	SI	BIEN GRADADA	5,20	1,53
COMBINACIÓN 0% CANTERA JURADO - CAIZA 100% CANTERA BRAÑEZ - VILLA MONTES	1	SI	BIEN GRADADA	6,30	1,26

Tabla 15 Resultados del Ensayo de Granulometría Agregado Grueso (Fuente: Elaboración Propia)

ASTM C-136 ENSAYO GRANULOMETRÍA - AGREGADO FINO						
LUGAR DE PROCEDENCIA	TAMAÑO MÁXIMO (pulgadas)	CUMPLE LOS LÍMITES DE GRADACIÓN	SEGÚN SU CURVA GRANULOMÉTRICA	% QUE PASA TAMIZ N° 200	MÓDULO DE FINURA	% DE HUMEDAD
CANTERA JURADO - CAIZA	3/8	SI	BIEN GRADADA	0,37	2,50	4,20
CANTERA REYES - CAIZA	3/8	SI	BIEN GRADADA	2,29	2,53	5,20
CANTERA SÁNCHEZ - CAIZA	3/8	SI	BIEN GRADADA	1,68	2,74	4,42

Tabla 16 Resultados del Ensayo de Granulometría Agregado Fino (Fuente: Elaboración Propia)

3.1.3.2. Densidad Aparente (Peso Unitario), ASTM C-29

Los agregados gruesos de las Canteras Jurado, Cantera Reyes, Cantera Sánchez y Cantera Brañez, mediante los Ensayos de Densidad Aparente (Peso Unitario) Compactado están en los rangos de 1,569gr/cm³ entre 1,703gr/cm³ y mediante los Ensayos de Densidad Aparente

(Peso Unitario) Suelto están en los rangos de 1,440gr/cm³ entre 1,607gr/cm³, sus características cumplen con las condiciones para hormigones de uso estructural A.S.T.M. C-29.

ASTM C-29 ENSAYO DE DENSIDAD APARENTE (PESOS UNITARIOS) COMPACTADO Y SUELTO - AGREGADO GRUESO		
LUGAR DE PROCEDENCIA	PESO UNITARIO SUELTO <i>gr/cm³</i>	PESO UNITARIO VARILLADO (COMPACTADO) <i>gr/cm³</i>
CANTERA JURADO - CAIZA	1,440	1,569
CANTERA REYES - CAIZA	1,454	1,584
CANTERA SÁNCHEZ - CAIZA	1,436	1,537
COMBINACIÓN 65% CANTERA JURADO - CAIZA 35% CANTERA BRAÑEZ - VILLA MONTES	1,498	1,616
COMBINACIÓN 35% CANTERA JURADO - CAIZA 65% CANTERA BRAÑEZ - VILLA MONTES	1,548	1,656
COMBINACIÓN 0% CANTERA JURADO - CAIZA 100% CANTERA BRAÑEZ - VILLA MONTES	1,607	1,703

Tabla 17 Resultados del Ensayo de Densidad Aparente (Peso Unitario) Compactado y Suelto – Agregado Grueso (Fuente: Elaboración Propia)

Los agregados finos de las Canteras Jurado, Cantera Reyes, Cantera Sánchez y Cantera Brañez, mediante los Ensayos de Densidad Aparente (Peso Unitario) Compactado están en los rangos de 1,718gr/cm³ entre 1,725gr/cm³ y mediante los Ensayos de Densidad Aparente (Peso Unitario) Suelto están en los rangos de 1,521gr/cm³ entre 1,541gr/cm³, sus características que cumplen con las condiciones para hormigones de uso estructural A.S.T.M. C-29.

ASTM C-29 ENSAYO DE DENSIDAD APARENTE (PESOS UNITARIOS) COMPACTADO Y SUELTO - AGREGADO FINO		
LUGAR DE PROCEDENCIA	PESO UNITARIO SUELTO <i>gr/cm³</i>	PESO UNITARIO VARILLADO (COMPACTADO) <i>gr/cm³</i>
CANTERA JURADO - CAIZA	1,541	1,725
CANTERA REYES - CAIZA	1,535	1,721
CANTERA SÁNCHEZ - CAIZA	1,521	1,718

Tabla 18 Resultados del Ensayo de Pesos Unitarios Compactado y Suelto – Agregado Fino (Fuente: Elaboración Propia)

3.1.3.3. Densidad, Densidad Relativa (Gravedad Específica) y Absorción del Agregado Grueso, ASTM C-127

Los agregados gruesos de las Canteras Jurado, Cantera Reyes, Cantera Sánchez y Cantera Brañez, mediante los Ensayos Densidad Relativa (Gravedad Específica) y Absorción en el estado saturado superficialmente seco están en los rangos de 1,610gr/cm³ entre 1,630gr/cm³ y un Porcentaje de Absorción entre 0,79 a 0,88, sus características cumplen con las condiciones para hormigones de uso estructural A.S.T.M. C-127.

ASTM C-127 ENSAYO DE DENSIDAD RELATIVA (GRAVEDAD ESPECÍFICA) Y ABSORCIÓN - AGREGADO GRUESO				
LUGAR DE PROCEDENCIA	DENSIDAD RELATIVA APARENTE gr/cm ³	DENSIDAD RELATIVA S.S.S. gr/cm ³	DENSIDAD RELATIVA REAL gr/cm ³	% DE ABSORCION
CANTERA JURADO - CAIZA	2,640	2,610	2,580	0,86
CANTERA REYES - CAIZA	2,660	2,630	2,600	0,88
CANTERA SÁNCHEZ - CAIZA	2,620	2,590	2,570	0,79
COMBINACIÓN 65% CANTERA JURADO - CAIZA 35% CANTERA BRAÑEZ - VILLA MONTES	2,650	2,610	2,590	0,86
COMBINACIÓN 35% CANTERA JURADO - CAIZA 65% CANTERA BRAÑEZ - VILLA MONTES	2,660	2,620	2,600	0,87
COMBINACIÓN 0% CANTERA JURADO - CAIZA 100% CANTERA BRAÑEZ - VILLA MONTES	2,670	2,630	2,610	0,86

Tabla 19 Resultados del Ensayo de Densidad Relativa (Gravedad Específica) y Absorción – Agregado Grueso (Fuente: Elaboración Propia)

3.1.3.4. Densidad, Densidad Relativa (Gravedad Específica) y Absorción del Agregado Fino, ASTM C-128

Los agregados finos de las Canteras Jurado, Cantera Reyes, Cantera Sánchez y Cantera Brañez, mediante los Ensayos Densidad Relativa (Gravedad Específica) y Absorción en el estado saturado superficialmente seco están en los rangos de 1,469gr/cm³ entre 1,475gr/cm³ y un Porcentaje de Absorción entre 1,2 a 1,5, sus características cumplen con las condiciones para hormigones de uso estructural A.S.T.M. C-128.

ASTM C-128 ENSAYO DE DENSIDAD RELATIVA (GRAVEDAD ESPECÍFICA) Y ABSORCIÓN - AGREGADO FINO				
LUGAR DE PROCEDENCIA	DENSIDAD RELATIVA APARENTE <i>gr/cm³</i>	DENSIDAD RELATIVA S.S.S. <i>gr/cm³</i>	DENSIDAD RELATIVA REAL <i>gr/cm³</i>	% DE ABSORCION
CANTERA JURADO - CAIZA	2,558	2,472	2,505	1,40
CANTERA REYES - CAIZA	2,567	2,469	2,507	1,50
CANTERA SÁNCHEZ - CAIZA	2,551	2,475	2,505	1,20

Tabla 20 Resultados del Ensayo de Densidad Relativa (Gravedad Específica) y Absorción – Agregado Fino (Fuente: Elaboración Propia)

3.1.3.5. Método de Ensayo Normalizado para la resistencia a la degradación de los áridos gruesos de tamaño pequeño por el método de abrasión e impacto en la Máquina Los Ángeles (ASTM C 131)

Los agregados gruesos sometidos al Ensayo de Desgaste mediante la Máquina de los Ángeles, las muestras Canteras Jurado con un valor de 47,03% de Desgaste, Cantera Reyes con un valor de 47,66% de Desgaste, Cantera Sánchez con un valor de 47,11% de Desgaste y Combinación 65% Cantera Jurado + 35% Cantera Brañez, no cumplen con la especificación requerida mínima requerida en el ensayo de Desgaste de los Ángeles ASTM C-131 para el uso en estructuras de Hormigón el cual menciona que el valor máximo de Desgaste es 40%.

Los agregados gruesos Ensayo de Desgaste mediante la Máquina de los Ángeles, las muestras de la Combinación 35% Cantera Jurado + 65% Cantera Brañez con un valor de 31,62% de Desgaste y la muestra de 100% Cantera Brañez, son las únicas que cumplen con la especificación requerida mínima requerida en el ensayo de Desgaste de los Ángeles ASTM C-131 para el uso en estructuras de Hormigón el cual menciona que el valor máximo de Desgaste es 40%.

ASTM C-131 ENSAYO DE DESGASTE MEDIANTE LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES - AGREGADO GRUESO	
LUGAR DE PROCEDENCIA	% DE DESGASTE
CANtera JURADO - CAIZA	47,03
CANtera REYES - CAIZA	47,66
CANtera SÁNCHEZ - CAIZA	47,11
COMBINACIÓN 65% CANtera JURADO - CAIZA 35% CANtera BRAÑEZ - VILLA MONTES	40,19
COMBINACIÓN 35% CANtera JURADO - CAIZA 65% CANtera BRAÑEZ - VILLA MONTES	31,62
COMBINACIÓN 0% CANtera JURADO - CAIZA 100% CANtera BRAÑEZ - VILLA MONTES	18,25

Tabla 21 Resultados del Ensayo de Desgaste mediante la Máquina de los Ángeles – Agregado Grueso (Fuente: Elaboración Propia)

3.1.3.6. Método de Ensayo Normalizado para la determinación de la desintegración de los áridos mediante el método de los sulfatos de sodio o sulfato de magnesio (ASTM C 88)

Los agregados finos sometidos al Ensayo para la determinación de la desintegración de los áridos mediante el método del Sulfato de Sodio, las muestras Canteras Jurado con un valor de 5,92% de Pérdida de Peso, Cantera Reyes con un valor de 7,03% de Pérdida de Peso, Cantera Sánchez con un valor de 6,55% de Pérdida de Peso, estas canteras cumplen con la especificación requerida para el ensayo de Ensayo para la determinación de la desintegración de los áridos mediante el método del Sulfato de Sodio (ASTM C 88), para el uso en estructuras de Hormigón el cual menciona que el valor máximo de Pérdida de peso es 10%.

ASTM C-88 ENSAYO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DESINTEGRACIÓN DE LOS ÁRIDOS MEDIANTE EL MÉTODO DE SULFATO DE SODIO - AGREGADO FINO	
LUGAR DE PROCEDENCIA	% DE PERDIDA
CANTERA JURADO - CAIZA	5,92
CANTERA REYES - CAIZA	7,03
CANTERA SÁNCHEZ - CAIZA	6,55

Tabla 22 Resultados del Ensayo para la determinación de la desintegración de los áridos mediante el método del Sulfato de Sodio – Agregado Fino (Fuente: Elaboración Propia)

3.2. Elaboración Mezclas de Hormigón Método según Norma 211.1 de la A. C. I. (American Concrete Institute)

3.2.1. Dosificación 1 de 6 - Datos Cantera Jurado – Caiza

Resumen de Características Agregados Cantera Jurado								
Materiales	Densidad Relativa (S.S.S.) gr/cm ³	% Humedad	% Absorción	Densidad Aparente compactado gr/cm ³	Densidad Aparente suelto gr/cm ³	Módulo de Finura	Tamaño Máximo Nominal	% Desgaste de los Ángeles
Cemento	3,020	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Grava	2,610	1,470	0,860	1,569	1,440	-----	25mm	47,03
Arena	2,472	4,200	1,400	1,725	1,541	2,500	-----	-----
Tipo de Hormigón	H - 21							
Asent. =	6cm							
RESULTADOS DE LA DOSIFICACIÓN 1 DE 6 - CANTERA JURADO - CAIZA								
		VALOR OBTENIDOS EN CONDICIÓN SECA para 1m ³ de Hormigón		VALOR OBTENIDOS CON CORRECCIÓN DE HUMEDAD para 1m ³ de Hormigón				
	Cemento(kg)	380		380				
	Grava (kg)	1098		1114				
	Arena (kg)	607		632				
	Agua (litros)	193		169				

Tabla 23 Resultados de la Dosificación - Cantera Jurado (Fuente: Elaboración Propia)

3.2.2. Dosificación 2 de 6 - Datos Cantera Reyes – Caiza

Resumen de Características Agregados Cantera Reyes								
Materiales	Densidad Relativa (S.S.) <i>gr/cm³</i>	% Humedad	% Absorción	Densidad Aparente compactado <i>gr/cm³</i>	Densidad Aparente suelto <i>gr/cm³</i>	Módulo de Finura	Tamaño Máximo Nominal	% Desgaste de los Ángeles
Cemento	3,020	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Grava	2,630	1,760	0,880	1,584	1,454	-----	25mm	47,66
Arena	2,469	5,200	1,500	1,721	1,535	2,530	-----	-----
Tipo de Hormigón	H - 21							
Asent. =	6,5cm							
RESULTADOS DE LA DOSIFICACIÓN 2 DE 6 - CAIZA - CANTERA REYES 2/6								
		VALOR OBTENIDOS EN CONDICIÓN SECA <i>para 1m³ de Hormigón</i>		VALOR OBTENIDOS CON CORRECCIÓN DE HUMEDAD <i>para 1m³ de Hormigón</i>				
	Cemento(kg)	380		380				
	Grava (kg)	1104		1123				
	Arena (kg)	608		640				
	Agua (litros)	193		161				

Tabla 24 Resultados de la Dosificación - Cantera Reyes (Fuente: Elaboración Propia)

3.2.3. Dosificación 3 de 6 - Datos Cantera Sánchez – Caiza.-

Resumen de Características Agregados Cantera Sánchez								
Materiales	Densidad Relativa (S.S.) <i>gr/cm³</i>	% Humedad	% Absorción	Densidad Aparente compactado <i>gr/cm³</i>	Densidad Aparente suelto <i>gr/cm³</i>	Módulo de Finura	Tamaño Máximo Nominal	% Desgaste de los Ángeles
Cemento	3,020	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Grava	2,590	2,090	0,790	1,537	1,436	-----	25mm	47,11
Arena	2,475	4,420	1,200	1,718	1,521	2,740	-----	-----
Tipo de Hormigón	H - 21							
Asent. =	7cm							
RESULTADOS DE LA DOSIFICACIÓN 3 DE 6 - CANTERA SÁNCHEZ CAIZA								
		VALOR OBTENIDOS EN CONDICIÓN SECA <i>para 1m³ de Hormigón</i>		VALOR OBTENIDOS CON CORRECCIÓN DE HUMEDAD <i>para 1m³ de Hormigón</i>				
	Cemento(kg)	380		380				
	Grava (kg)	1039		1161				
	Arena (kg)	656		685				
	Agua (litros)	193		158				

Tabla 25 Resultados de la Dosificación - Cantera Sánchez (Fuente: Elaboración Propia)

3.2.4. Dosificación 4 de 6 - Datos Combinación 35% Cantera Jurado 65% Cantera Brañez.-

Resumen de Características Agregados Combinación 65% Cantera Jurado - 35% Cantera Brañez								
Materiales	Densidad Relativa (S.S.S.) gr/cm ³	% Humedad	% Absorción	Densidad Aparente compactado gr/cm ³	Densidad Aparente suelto gr/cm ³	Módulo de Finura	Tamaño Máximo Nominal	% Desgaste de los Ángeles
Cemento	3,020	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Grava Combinación 65-35	2,610	1,650	0,860	1,616	1,498	-----	25mm	40,19
Arena Jurado	2,472	4,200	1,400	1,725	1,541	2,500	-----	-----
Tipo de Hormigón	H - 21							
Asent. =	6,5cm							
RESULTADOS DE LA DOSIFICACIÓN Combinación 4 DE 6 - 65% Cantera Jurado de Caiza - 35% Cantera Brañez de Villa Montes								
		VALOR OBTENIDOS EN CONDICIÓN SECA para 1m ³ de Hormigón		VALOR OBTENIDOS CON CORRECCIÓN DE HUMEDAD para 1m ³ de Hormigón				
	Cemento(kg)	380	380					
	Grava (kg)	1131	1150					
	Arena (kg)	575	600					
	Agua (litros)	193	168					

Tabla 26 Resultados de la Dosificación – Combinación 65% Cantera Jurado + 35% Cantera Brañez (Fuente: Elaboración Propia)

3.2.5. Dosificación 5 de 6 - Datos Combinación 35% Cantera Jurado - 65% Cantera Brañez.-

Resumen de Características Agregados Combinación 35% Cantera Jurado - 65% Cantera Brañez								
Materiales	Densidad Relativa (S.S.S.) gr/cm ³	% Humedad	% Absorción	Densidad Aparente compactado gr/cm ³	Densidad Aparente suelto gr/cm ³	Módulo de Finura	Tamaño Máximo Nominal	% Desgaste de los Ángeles
Cemento	3,020	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Grava Combinación 35-65	2,620	1,530	0,870	1,656	1,548	-----	25mm	31,62
Arena Jurado	2,472	4,200	1,400	1,725	1,541	2,500	-----	-----
Tipo de Hormigón	H - 21							
Asent. =	7cm							
RESULTADOS DE LA DOSIFICACIÓN 5 DE 6 - Combinación 35% Cantera Jurado de Caiza - 65% Cantera Brañez de Villa Montes								
		VALOR OBTENIDOS EN CONDICIÓN SECA para 1m ³ de Hormigón		VALOR OBTENIDOS CON CORRECCIÓN DE HUMEDAD para 1m ³ de Hormigón				
	Cemento(kg)	380	380					
	Grava (kg)	1159	1177					
	Arena (kg)	553	576					
	Agua (litros)	193	170					

Tabla 27 Resultados de la Dosificación – Combinación 35% Cantera Jurado + 65% Cantera Brañez (Fuente: Elaboración Propia)

3.2.6. Dosificación 6 de 6 - Datos Combinación 0% Cantera Jurado- 100% Cantera Brañez.-

Resumen de Características Agregados Combinación 0% Cantera Jurado - 100% Cantera Brañez								
Materiales	Densidad Relativa (S.S.S.) gr/cm ³	% Humedad	% Absorción	Densidad Aparente compactado gr/cm ³	Densidad Aparente suelto gr/cm ³	Módulo de Finura	Tamaño Máximo Nominal	% Desgaste de los Ángeles
Cemento	3,020	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Grava Brañez	2,630	1,260	0,860	1,703	1,607	-----	25mm	18,25
Arena Jurado	2,472	4,200	1,400	1,725	1,541	2,500	-----	-----
Tipo de Hormigón	H - 21							
Asent. =	6cm							
RESULTADOS DE LA DOSIFICACIÓN 6 DE 6 - Combinación 100% Cantera Brañez de Villa Montes								
		VALOR OBTENIDOS EN CONDICIÓN SECA para 1m ³ de Hormigón		VALOR OBTENIDOS CON CORRECCIÓN DE HUMEDAD para 1m ³ de Hormigón				
	Cemento(kg)	376		376				
	Grava (kg)	1192		1207				
	Arena (kg)	529		548				
	Agua (litros)	193		173				

Tabla 28 Resultados de la Dosificación – Combinación 0% Cantera Jurado + 100% Cantera Brañez (Fuente: Elaboración Propia)

3.3. Control del Hormigón Fresco

3.3.1. Método de Ensayo Normalizado para Asentamiento de Concreto de Cemento Hidráulico (ASTM C143)

Para cada dosificación se preparo tuvo que preparar 4 diferentes mezclas, debido a la capacidad de la mezcladora, para completar la cantidad de muestras de probetas y vigas requeridas para este ensayo.

Los rangos de Asentamiento o Slump están entre 5cm a 7cm.

3.3.2. Práctica estándar para hacer y curar especímenes de prueba de concreto en el laboratorio (ASTM C192)

3.3.2.1. Cilindros de Concreto

El vaciado y moldeo de los cilindros de concreto, se basó de acuerdo a la norma ASTM C-192, en los predios del Laboratorio COOPERECAB S.R.L.

Para el control compresión se elaboró Hormigón para 3 Canteras y para 3 combinaciones de las diferentes Canteras, se vaciaron: 20 cilindros, las cuales se ensayaron, 5 cilindros a los 7 días de edad, 5 cilindros a los 14 días de edad y 10 cilindros a los 28 días de edad.

Se obtuvieron los datos necesarios para determinar las fuerzas máximas aplicadas, para poder realizar los cálculos respectivos y obtener los esfuerzos de compresión de las muestras.



Figura 22 Elaboración de Cilindros de Concreto (Fuente: Elaboración Propia)

3.3.2.2. Vigas de Concreto

Para el control flexión se elaboró Hormigón para 3 Canteras y para 3 combinaciones de las diferentes Canteras, se vaciaron: 10 vigas, las cuales se ensayaron a los 28 días de edad.

Se obtuvieron los datos necesarios para determinar las fuerzas máximas aplicadas, para poder realizar los cálculos respectivos y obtener los esfuerzos de y flexión de las muestras.



Figura 23 Elaboración de Vigas de Concreto (Fuente: Elaboración Propia)

3.4. Control del Concreto Endurecido

3.4.1. Práctica estándar para hacer y curar especímenes de prueba de Concreto en el Laboratorio (ASTM C192)

Desde el momento del moldeo hasta el momento del endurecimiento en un lapso de 24 horas para cilindros y 48 horas para vigas, después de desmoldar las muestras y proceder al curado dentro de turriles llenos de agua hasta llegar el momento de su ensayo.



Figura 24 Curado de Cilindros y Vigas de Concreto (Fuente: Elaboración Propia)

3.4.2. Peso Unitario Concreto Endurecido

El peso unitario del Concreto endurecido se determina de la siguiente manera:

- Obteniendo la masa de la probeta.
- Determinando el volumen de la probeta.

El volumen se determina igual a la altura multiplicado por el área, esta última relacionada por el promedio del diámetro o perímetro de mínimo tres mediciones.

Con estos datos dividimos la masa sobre el volumen para obtener el Peso unitario de la probeta.

3.4.3. Método de Prueba Estándar para Resistencia a la Compresión de Especímenes Cilíndricos de Concreto (ASTM C39)

Se detalla un esquema de un cilindro ensayado a compresión.

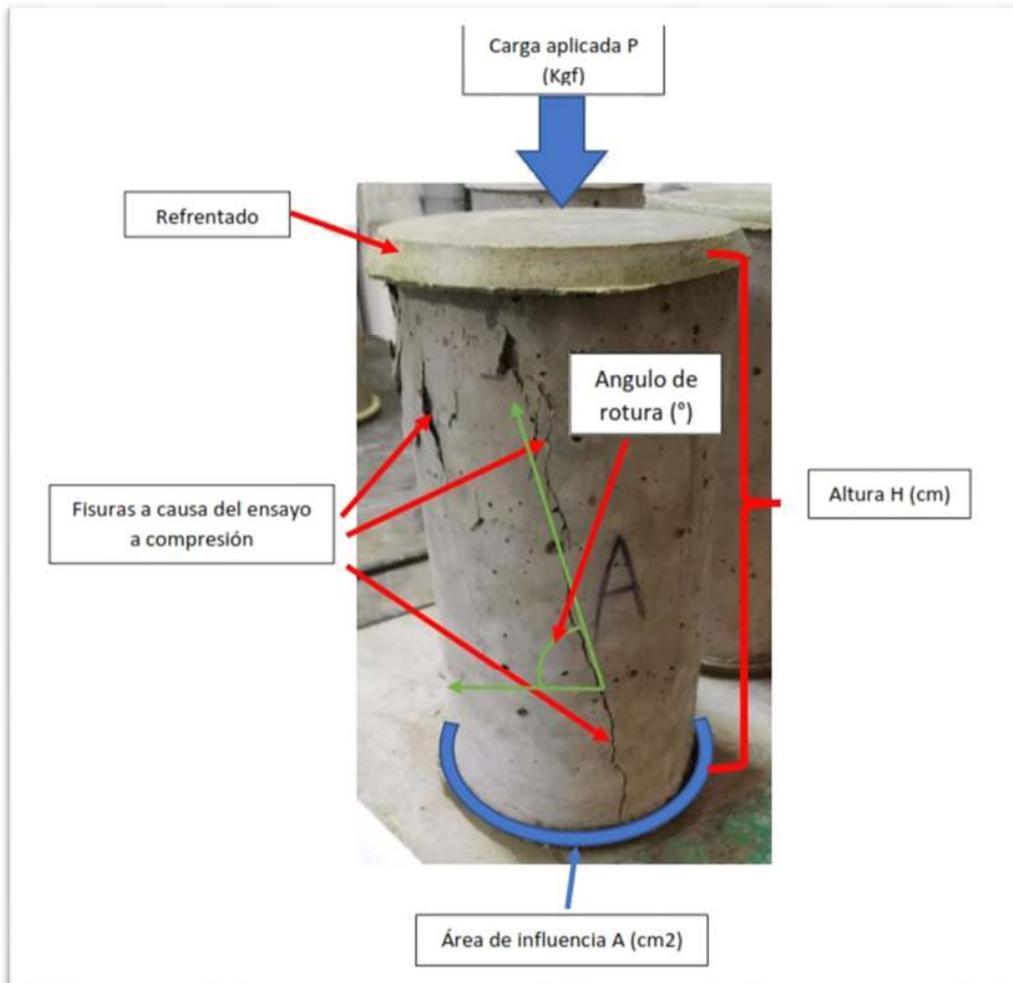


Figura 25 Cilindro ya ensayado a compresión con su respectivo refrentado. (Fuente: Elaboración Propia)

3.4.4. Método Estándar de Ensayo para Resistencia a la Flexión Del Concreto (Usando viga simple con carga a los tercios del claro) (ASTM C78)

Se detalla un esquema de una viga ensayada a flexión-tracción.

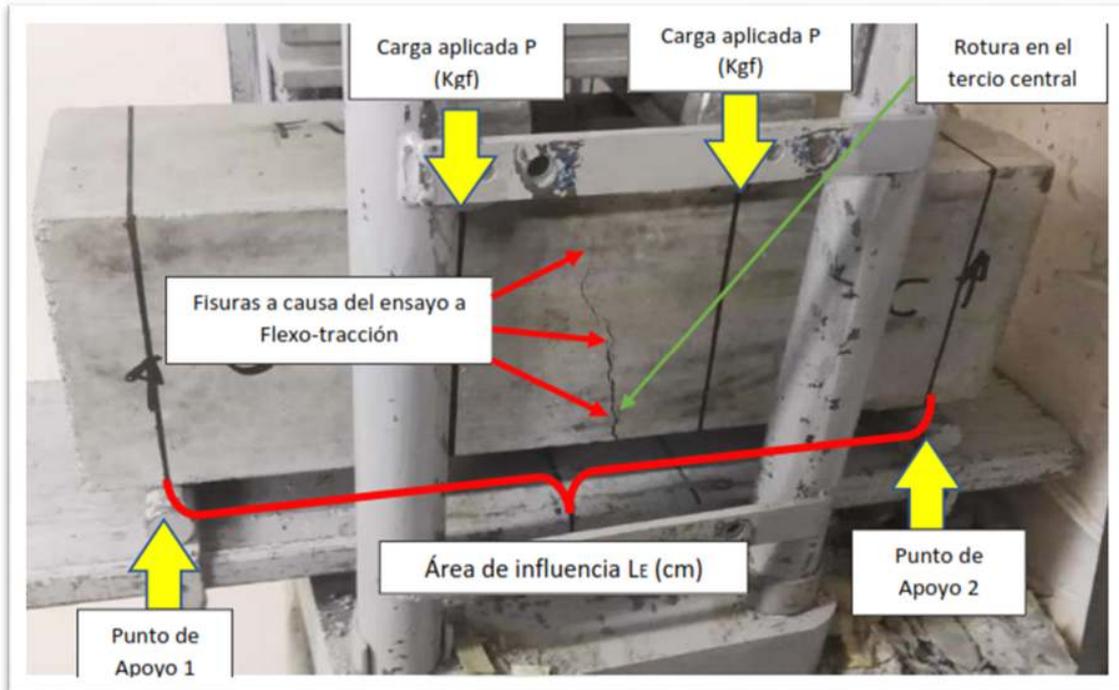


Figura 26 Viga ensayada a flexo-tracción. (Fuente: Elaboración Propia)

4. Evaluación de Resultados del Hormigón Endurecido

4.1. Análisis de Muestras

Una vez vaciado, desmoldado y curado según el tiempo requerido los especímenes de hormigón, se procedió a realizar las roturas a compresión de cilindros y flexo-tracción de vigas, como se detalla a continuación:

Tipo de Dosificación	Cantera Jurado			Cantera Reyes			Cantera Sánchez			Combinación 65% Grava Jurado + 35% Grava Brañez			Combinación 35% Grava Jurado + 65% Grava Brañez			Combinación 0% Grava Jurado + 100% Grava Brañez		
Edad de los Ensayos (días)	7	14	28	7	14	28	7	14	28	7	14	28	7	14	28	7	14	28
Cantidad de Cilindros de Ho	5	5	10	5	5	10	5	5	10	5	5	10	5	5	10	5	5	10
Cantidad de Vigas de Ho	0	0	10	0	0	10	0	0	10	0	0	10	0	0	10	0	0	10

Tabla 29 Resumen de Roturas de Compresión y Flexo-Tracción (Fuente: Elaboración Propia)

4.2. Análisis de Cilindros Ensayados a Compresión

La tabla a continuación detalla: la probeta, la edad de rotura, el peso específico y la resistencia a compresión mínima-máxima y promedio de cada muestra.

CILINDROS A COMPRESIÓN					
Dosificación Cantera Jurado					
No Muestra	Edad en Días	Características	Resistencia <i>kg/cm²</i>	Resistencia Promedio 28 días <i>kg/cm²</i>	Peso unitario <i>gr/cm³</i>
P13	28	Mínimo	214,31	219,54	2,41
P15	28	Máximo	226,64		2,42
Dosificación Cantera Reyes					
P32	28	Mínimo	213,63	219,33	2,40
P38	28	Máximo	223,87		2,41
Dosificación Cantera Sánchez					
P56	28	Mínimo	212,66	218,88	2,38
P58	28	Máximo	224,66		2,43
Dosificación Combinación 65% Grava Jurado + 35% Grava Brañez					
P78	28	Mínimo	218,21	222,88	2,41
P79	28	Máximo	228,45		2,43
Dosificación Combinación 35% Grava Jurado + 65% Grava Brañez					
P91	28	Mínimo	224,27	227,76	2,43
P93	28	Máximo	233,09		2,42
Dosificación Combinación 0% Grava Jurado + 100% Grava Brañez					
P113	28	Mínimo	238,02	240,01	2,43
P119	28	Máximo	242,54		2,41

Tabla 30 Tabla comparativa de Roturas de Compresión (Fuente: Elaboración Propia)

Realizando la dosificación del hormigón utilizando los agregados de las Canteras Jurado los resultados del Ensayo de Rotura a Compresión es 219,54kg/cm², Cantera Reyes los resultados del Ensayo de Rotura a Compresión es 219,33kg/cm² y Cantera Sánchez los resultados de la Rotura a Compresión es 218,88kg/cm² estos resultados se cumplen la resistencia mínima de diseño para un Hormigón tipo H-21.

Ejecutando la dosificación del hormigón utilizando una combinación de agregados de la zona de Caiza y Villa Montes se obtienen mejores Resistencias a Compresión obteniendo los siguientes resultados, Combinación 65% Cantera Jurado + 35% Cantera Brañez resultados del Ensayo de Rotura a Compresión es 222,88kg/cm², Combinación 35% Cantera Jurado + 65% Cantera Brañez resultados del Ensayo de Rotura a Compresión es 227,76kg/cm² y 100% Cantera Brañez resultados del Ensayo de Rotura a Compresión es 240,01kg/cm².

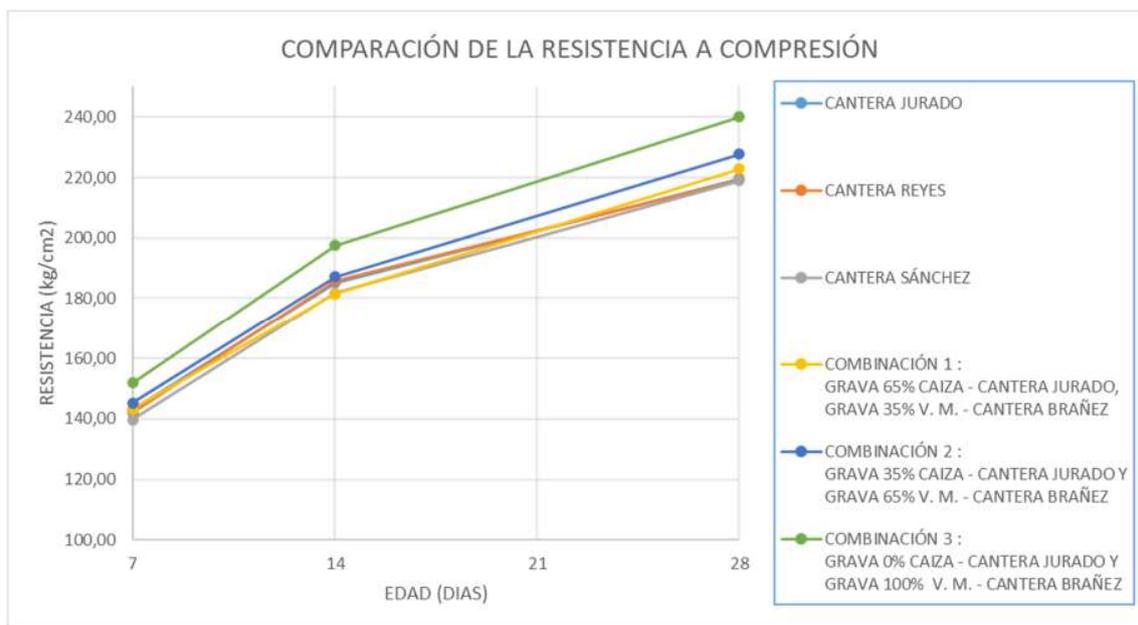


Figura 27 Gráfico de Comparación de la Resistencia a Compresión de las Canteras
(Fuente: Elaboración Propia)

4.3. Análisis de la Desviación Estándar de los Cilindros Ensayados a Compresión

$$S = \sqrt{\frac{\sum(X - \bar{X})^2}{n - 1}}$$

Ecuación 18- Fórmula para determinar la Módulo de Rotura cuando no se dispone ensayos de flexión.

Donde:

S = Desviación estándar.

\sum = Suma de.

X = Cada valor.

\bar{X} = Media aritmética.

N= Cantidad de muestras

Cantera Jurado

CANTERA VALORES A LOS 28 DÍAS	Nro	Resistencia a Compresión (kg/cm ²)	Resistencia a Compresión Promedio (kg/cm ²)	Límite Máximo (kg/cm ²)	Límite Mínimo (kg/cm ²)
CANTERA JURADO	1	219,34	219,54	223,60	215,48
	2	217,19	219,54	223,60	215,48
	3	214,31	219,54	223,60	215,48
	4	214,99	219,54	223,60	215,48
	5	226,64	219,54	223,60	215,48
	6	222,34	219,54	223,60	215,48
	7	224,61	219,54	223,60	215,48
	8	214,70	219,54	223,60	215,48
	9	219,74	219,54	223,60	215,48
	10	221,55	219,54	223,60	215,48

Tabla 31 Desviación Estándar de Roturas de Compresión – Cantera Jurado (Fuente: Elaboración Propia)

$s = \sqrt{\frac{\sum(X - \bar{x})^2}{n - 1}}$	
Valor Promedio (kg/cm ²)	219,54
Desviación Estándar	4,06
Límite máximo (kg/cm ²)	223,60
Límite mínimo (kg/cm ²)	215,48

Tabla 32 Desviación Estándar de Roturas de Compresión – Cantera Jurado (Fuente: Elaboración Propia)

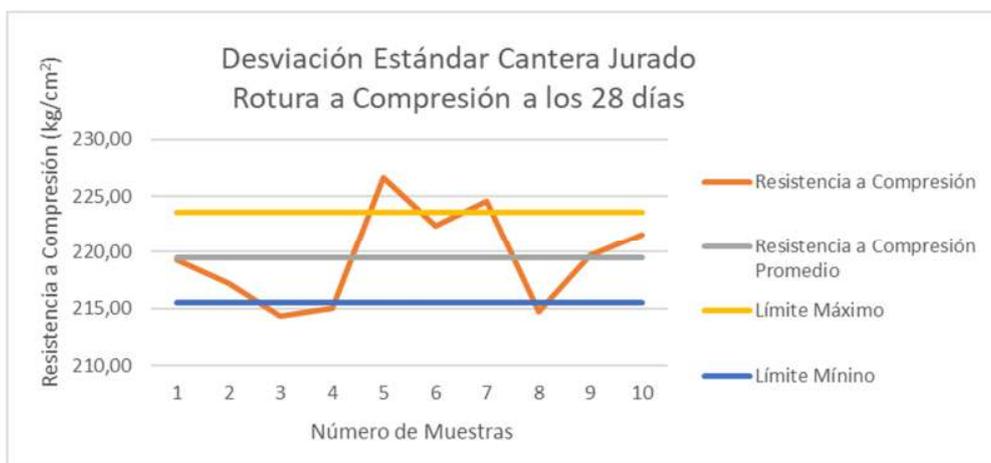


Figura 28 Gráfico de Desviación Estándar de la Resistencia a Compresión – Cantera Jurado (Fuente: Elaboración Propia)

Cantera Reyes

CANTERA VALORES A LOS 28 DÍAS	Nro	Resistencia a Compresión (kg/cm ²)	Resistencia a Compresión Promedio (kg/cm ²)	Límite Máximo (kg/cm ²)	Límite Mínimo (kg/cm ²)
CANTERA REYES	1	219,46	219,33	222,75	215,91
	2	213,63	219,33	222,75	215,91
	3	223,30	219,33	222,75	215,91
	4	220,36	219,33	222,75	215,91
	5	214,08	219,33	222,75	215,91
	6	221,27	219,33	222,75	215,91
	7	219,06	219,33	222,75	215,91
	8	223,87	219,33	222,75	215,91
	9	216,34	219,33	222,75	215,91
	10	221,95	219,33	222,75	215,91

Tabla 33 Desviación Estándar de Roturas de Compresión – Cantera Reyes (Fuente: Elaboración Propia)

$S = \sqrt{\frac{\sum(X - \bar{x})^2}{n - 1}}$	
Valor Promedio (kg/cm ²)	219,33
Desviación Estándar	3,42
Límite máximo (kg/cm ²)	222,75
Límite mínimo (kg/cm ²)	215,91

Tabla 34 Desviación Estándar de Roturas de Compresión – Cantera Reyes (Fuente: Elaboración Propia)



Figura 29 Gráfico de Desviación Estándar de la Resistencia a Compresión – Cantera Reyes (Fuente: Elaboración Propia)

Cantera Sánchez

CANTERA VALORES A LOS 28 DÍAS	Nro	Resistencia a Compresión (kg/cm ²)	Resistencia a Compresión Promedio (kg/cm ²)	Límite Máximo (kg/cm ²)	Límite Mínimo (kg/cm ²)
CANTERA SÁNCHEZ	1	215,78	218,88	222,86	214,91
	2	214,19	218,88	222,86	214,91
	3	217,31	218,88	222,86	214,91
	4	224,38	218,88	222,86	214,91
	5	219,34	218,88	222,86	214,91
	6	212,66	218,88	222,86	214,91
	7	216,97	218,88	222,86	214,91
	8	224,66	218,88	222,86	214,91
	9	220,98	218,88	222,86	214,91
	10	222,57	218,88	222,86	214,91

Tabla 35 Desviación Estándar de Roturas de Compresión – Cantera Sánchez (Fuente: Elaboración Propia)

$S = \sqrt{\frac{\sum(X - \bar{x})^2}{n - 1}}$	
Valor Promedio (kg/cm ²)	218,88
Desviación Estándar	3,98
Límite máximo (kg/cm ²)	222,86
Límite mínimo (kg/cm ²)	214,91

Tabla 36 Desviación Estándar de Roturas de Compresión – Cantera Sánchez (Fuente: Elaboración Propia)

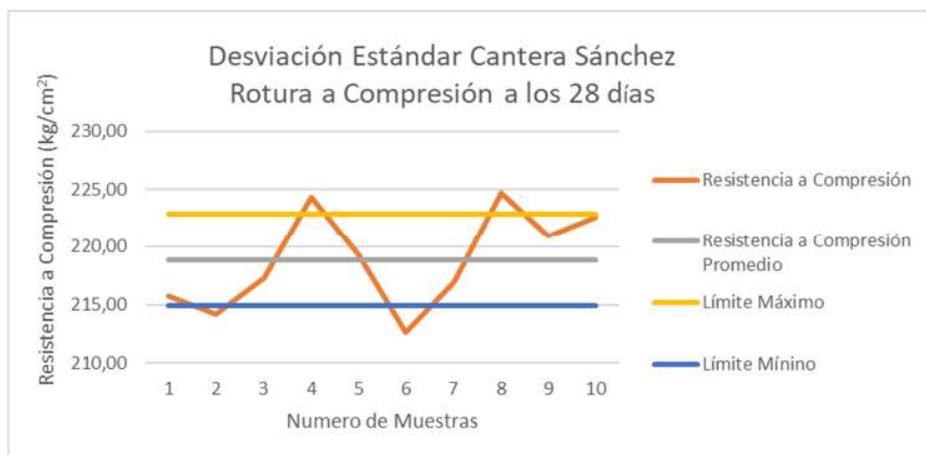


Figura 30 Gráfico de Desviación Estándar de la Resistencia a Compresión – Cantera Sánchez (Fuente: Elaboración Propia)

Combinación: 65% Cantera Jurado - 35% Cantera Brañez

CANTERA VALORES A LOS 28 DÍAS	Nro	Resistencia a Compresión (kg/cm ²)	Resistencia a Compresión Promedio (kg/cm ²)	Límite Máximo (kg/cm ²)	Límite Mínimo (kg/cm ²)
65% CANTERA JURADO - 35% CANTERA BRAÑEZ	1	220,13	222,88	225,78	219,98
	2	223,19	222,88	225,78	219,98
	3	220,19	222,88	225,78	219,98
	4	222,17	222,88	225,78	219,98
	5	224,55	222,88	225,78	219,98
	6	221,89	222,88	225,78	219,98
	7	226,25	222,88	225,78	219,98
	8	218,21	222,88	225,78	219,98
	9	228,45	222,88	225,78	219,98
	10	223,76	222,88	225,78	219,98

Tabla 37 Desviación Estándar de Roturas de Compresión – Combinación: 65% Cantera Jurado - 35% Cantera Brañez (Fuente: Elaboración Propia)

$s = \sqrt{\frac{\sum(X - \bar{x})^2}{n - 1}}$	
Valor Promedio (kg/cm ²)	222,88
Desviación Estándar	2,90
Límite máximo (kg/cm ²)	225,78
Límite mínimo (kg/cm ²)	219,98

Tabla 38 Desviación Estándar de Roturas de Compresión – Combinación: 65% Cantera Jurado - 35% Cantera Brañez (Fuente: Elaboración Propia)

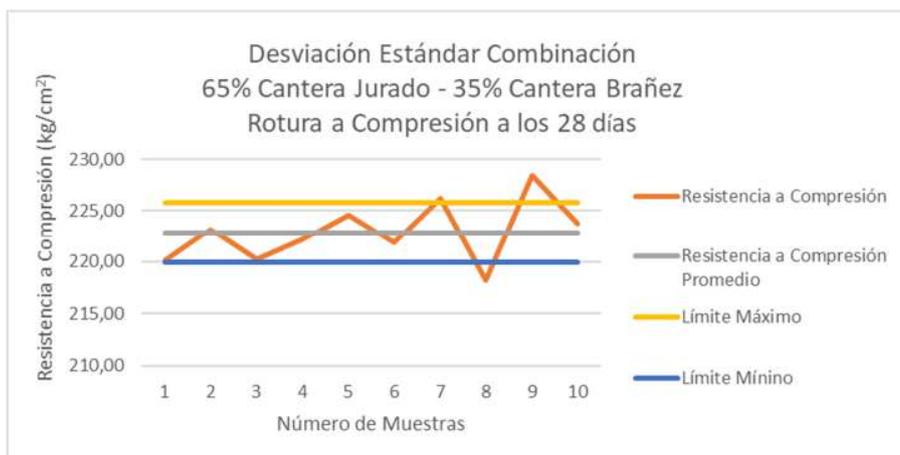


Figura 31 Gráfico de Desviación Estándar de la Resistencia a Compresión – Combinación: 65% Cantera Jurado - 35% Cantera Brañez (Fuente: Elaboración Propia)

Combinación: 35% Cantera Jurado - 65% Cantera Brañez

CANTERA VALORES A LOS 28 DÍAS	Nro	Resistencia a Compresión (kg/cm ²)	Resistencia a Compresión Promedio (kg/cm ²)	Límite Máximo (kg/cm ²)	Límite Mínimo (kg/cm ²)
35% CANTERA JURADO - 65% CANTERA BRAÑEZ	1	224,27	227,76	231,02	224,50
	2	226,19	227,76	231,02	224,50
	3	233,09	227,76	231,02	224,50
	4	225,00	227,76	231,02	224,50
	5	225,68	227,76	231,02	224,50
	6	232,30	227,76	231,02	224,50
	7	228,28	227,76	231,02	224,50
	8	225,57	227,76	231,02	224,50
	9	225,11	227,76	231,02	224,50
	10	232,08	227,76	231,02	224,50

Tabla 39 Desviación Estándar de Roturas de Compresión – Combinación: 35% Cantera Jurado - 65% Cantera Brañez (Fuente: Elaboración Propia)

$s = \sqrt{\frac{\sum(X - \bar{x})^2}{n - 1}}$	
Valor Promedio (kg/cm ²)	227,76
Desviación Estándar	3,26
Límite máximo (kg/cm ²)	231,02
Límite mínimo (kg/cm ²)	224,50

Tabla 40 Desviación Estándar de Roturas de Compresión – Combinación: 35% Cantera Jurado - 65% Cantera Brañez (Fuente: Elaboración Propia)

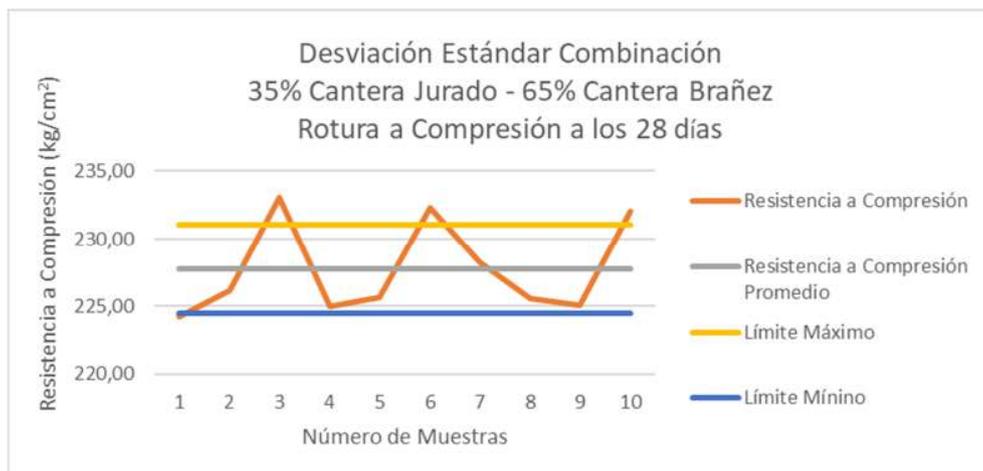


Figura 32 Gráfico de Desviación Estándar de la Resistencia a Compresión – Combinación: 35% Cantera Jurado - 65% Cantera Brañez (Fuente: Elaboración Propia)

Combinación: 0% Cantera Jurado - 100% Cantera Brañez

CANTERA VALORES A LOS 28 DÍAS	Nro	Resistencia a Compresión (kg/cm ²)	Resistencia a Compresión Promedio (kg/cm ²)	Límite Máximo (kg/cm ²)	Límite Mínimo (kg/cm ²)
0% CANTERA JURADO - 100% CANTERA BRAÑEZ	1	239,32	240,01	241,36	238,66
	2	241,81	240,01	241,36	238,66
	3	238,02	240,01	241,36	238,66
	4	240,51	240,01	241,36	238,66
	5	238,70	240,01	241,36	238,66
	6	240,00	240,01	241,36	238,66
	7	239,77	240,01	241,36	238,66
	8	240,73	240,01	241,36	238,66
	9	242,54	240,01	241,36	238,66
	10	238,70	240,01	241,36	238,66

Tabla 41 Desviación Estándar de Roturas de Compresión – Combinación: 0% Cantera Jurado - 100% Cantera Brañez (Fuente: Elaboración Propia)

$s = \sqrt{\frac{\sum (X - \bar{x})^2}{n - 1}}$	
Valor Promedio (kg/cm ²)	240,01
Desviación Estándar	1,35
Límite máximo (kg/cm ²)	241,36
Límite mínimo (kg/cm ²)	238,66

Tabla 42 Desviación Estándar de Roturas de Compresión – Combinación: 0% Cantera Jurado - 100% Cantera Brañez (Fuente: Elaboración Propia)

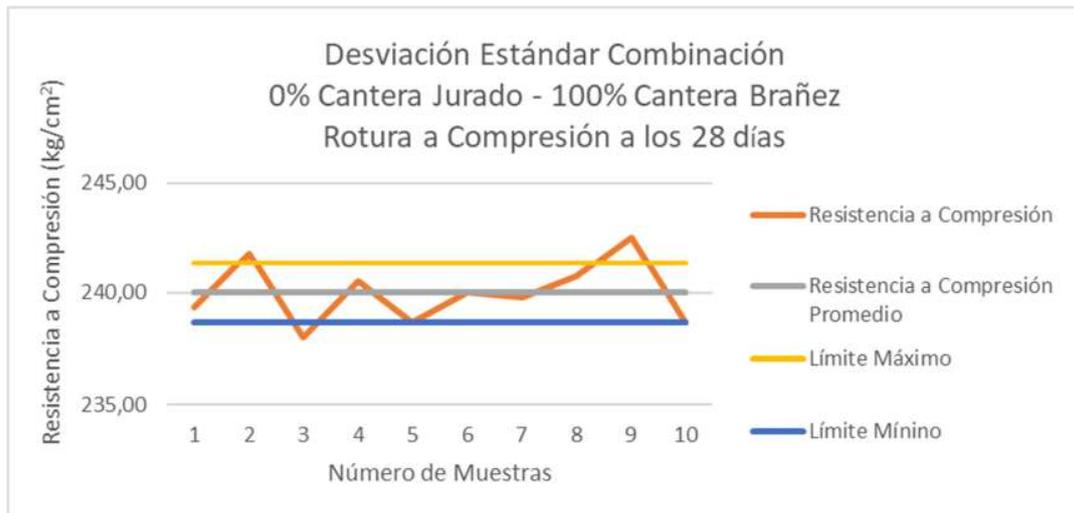


Figura 33 Gráfico de Desviación Estándar de la Resistencia a Compresión – Combinación: 0% Cantera Jurado - 100% Cantera Brañez (Fuente: Elaboración Propia)

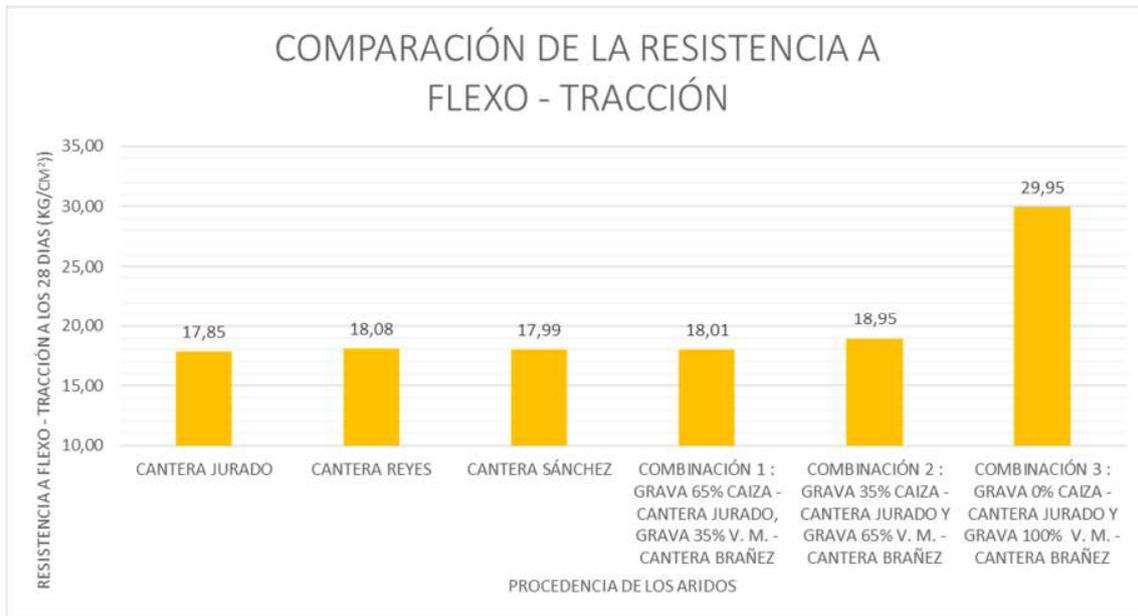
4.4. Análisis de Vigas Ensayadas a Flexo-Tracción

La tabla a continuación detalla: la viga, la edad de rotura y la resistencia a flexo-tracción mínima-máxima y promedio de cada muestra.

VIGAS A FLEXO-TRACCIÓN				
Dosificación Cantera Jurado				
No Muestra	Edad en Días	Características	Resistencia Promedio 28 días kg/cm²	Resistencia Promedio kg/cm²
V2	28	Mínimo	16,13	17,85
V5	28	Máximo	19,73	
Dosificación Cantera Reyes				
V11	28	Mínimo	16,40	18,08
V20	28	Máximo	19,60	
Dosificación Cantera Sánchez				
V23	28	Mínimo	16,27	17,99
V30	28	Máximo	19,87	
Dosificación Combinación 65% Grava Jurado + 35% Grava Brañez				
V37	28	Mínimo	16,67	18,01
V31	28	Máximo	19,33	
Dosificación Combinación 35% Grava Jurado + 65% Grava Brañez				
V48	28	Mínimo	17,87	18,95
V50	28	Máximo	20,40	
Dosificación Combinación 0% Grava Jurado + 100% Grava Brañez				
V55	28	Mínimo	28,53	29,95
V59	28	Máximo	31,73	

Tabla 43 Tabla comparativa de Roturas de Flexo-Tracción (Fuente: Elaboración Propia)

Al realizar el Ensayo de Flexo-Tracción según recomendaciones de la norma menciona que los valores de flexo-tracción deben ser iguales o mayores al 10% de la resistencia a compresión, tomando en cuenta este punto solo cumplen cuando se utiliza una combinación del 100% de grava de la Cantera de Villa Montes que llega a un valor de 29,95kg/cm² de Resistencia a Flexo-Tracción y las otras muestras están por debajo de 21kg/m² que es el valor mínimo recomendado.



*Figura 34 Gráfico de Comparación de la Resistencia a Flexo Tracción de las Canteras
(Fuente: Elaboración Propia)*

4.5. Análisis de la Desviación Estándar de las Vigas Ensayadas a Flexión

Cantera Jurado

CANTERA VALORES A LOS 28 DÍAS	Nro	Resistencia a Flexión (kg/cm ²)	Resistencia a Flexión Promedio (kg/cm ²)	Límite Máximo (kg/cm ²)	Límite Mínimo (kg/cm ²)
CANTERA JURADO	1	18,00	17,85		16,62
	2	16,13	17,85	19,09	16,62
	3	17,60	17,85	19,09	16,62
	4	19,07	17,85	19,09	16,62
	5	19,73	17,85	19,09	16,62
	6	16,67	17,85	19,09	16,62
	7	17,20	17,85	19,09	16,62
	8	18,40	17,85	19,09	16,62
	9	16,27	17,85	19,09	16,62
	10	19,47	17,85	19,09	16,62

Tabla 44 Desviación Estándar de Roturas de Flexión – Cantera Jurado (Fuente: Elaboración Propia)

$s = \sqrt{\frac{\sum(x - \bar{x})^2}{n - 1}}$	
Valor Promedio (kg/cm ²)	17,85
Desviación Estándar	1,24
Límite máximo (kg/cm ²)	19,09
Límite mínimo (kg/cm ²)	16,62

Tabla 45 Desviación Estándar de Roturas de Flexión – Cantera Jurado (Fuente: Elaboración Propia)



Figura 35 Gráfico de Desviación Estándar de la Resistencia a Flexión – Cantera Jurado (Fuente: Elaboración Propia)

Cantera Reyes

CANTERA VALORES A LOS 28 DÍAS	Nro	Resistencia a Flexión (kg/cm ²)	Resistencia a Flexión Promedio (kg/cm ²)	Límite Máximo (kg/cm ²)	Límite Mínimo (kg/cm ²)
CANTERA REYES	1	16,40	18,08	19,09	17,07
	2	19,47	18,08	19,09	17,07
	3	18,40	18,08	19,09	17,07
	4	17,20	18,08	19,09	17,07
	5	18,80	18,08	19,09	17,07
	6	16,93	18,08	19,09	17,07
	7	17,87	18,08	19,09	17,07
	8	18,53	18,08	19,09	17,07
	9	17,60	18,08	19,09	17,07
	10	19,60	18,08	19,09	17,07

Tabla 46 Desviación Estándar de Roturas de Flexión – Cantera Reyes (Fuente: Elaboración Propia)

$s = \sqrt{\frac{\sum(x - \bar{x})^2}{n - 1}}$	
Valor Promedio (kg/cm ²)	18,08
Desviación Estándar	1,01
Límite máximo (kg/cm ²)	19,09
Límite mínimo (kg/cm ²)	17,07

Tabla 47 Desviación Estándar de Roturas de Flexión – Cantera Reyes (Fuente: Elaboración Propia)

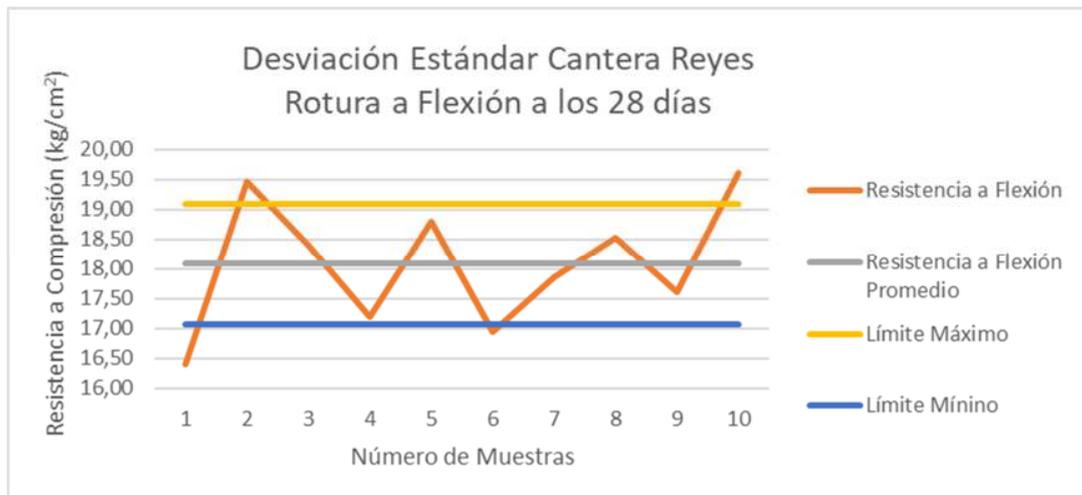


Figura 36 Gráfico de Desviación Estándar de la Resistencia a Flexión – Cantera Reyes (Fuente: Elaboración Propia)

Cantera Sánchez

CANTERA VALORES A LOS 28 DÍAS	Nro	Resistencia a Flexión (kg/cm ²)	Resistencia a Flexión Promedio (kg/cm ²)	Límite Máximo (kg/cm ²)	Límite Mínimo (kg/cm ²)
CANTERA SÁNCHEZ	1	17,20	17,99	19,18	16,79
	2	19,07	17,99	19,18	16,79
	3	16,27	17,99	19,18	16,79
	4	17,47	17,99	19,18	16,79
	5	19,33	17,99	19,18	16,79
	6	16,53	17,99	19,18	16,79
	7	17,07	17,99	19,18	16,79
	8	18,13	17,99	19,18	16,79
	9	18,93	17,99	19,18	16,79
	10	19,87	17,99	19,18	16,79

Tabla 48 Desviación Estándar de Roturas de Flexión – Cantera Sánchez (Fuente: Elaboración Propia)

$s = \sqrt{\frac{\sum(x - \bar{x})^2}{n - 1}}$	
Valor Promedio (kg/cm ²)	17,99
Desviación Estándar	1,19
Límite máximo (kg/cm ²)	19,18
Límite mínimo (kg/cm ²)	16,79

Tabla 49 Desviación Estándar de Roturas de Flexión – Cantera Sánchez (Fuente: Elaboración Propia)



Figura 37 Gráfico de Desviación Estándar de la Resistencia a Flexión – Cantera Sánchez (Fuente: Elaboración Propia)

Combinación: 65% Cantera Jurado - 35% Cantera Brañez

CANTERA VALORES A LOS 28 DÍAS	Nro	Resistencia a Flexión (kg/cm ²)	Resistencia a Flexión Promedio (kg/cm ²)	Límite Máximo (kg/cm ²)	Límite Mínimo (kg/cm ²)
65% CANTERA JURADO - 35% CANTERA BRAÑEZ	1	19,33	18,01	18,88	17,15
	2	17,60	18,01	18,88	17,15
	3	18,80	18,01	18,88	17,15
	4	18,40	18,01	18,88	17,15
	5	16,93	18,01	18,88	17,15
	6	18,00	18,01	18,88	17,15
	7	16,67	18,01	18,88	17,15
	8	19,07	18,01	18,88	17,15
	9	17,20	18,01	18,88	17,15
	10	18,13	18,01	18,88	17,15

Tabla 50 Desviación Estándar de Roturas de Flexión – Combinación: 65% Cantera Jurado - 35% Cantera Brañez (Fuente: Elaboración Propia)

$s = \sqrt{\frac{\sum(x - \bar{x})^2}{n - 1}}$	
Valor Promedio (kg/cm ²)	18,01
Desviación Estándar	0,86
Límite máximo (kg/cm ²)	18,88
Límite mínimo (kg/cm ²)	17,15

Tabla 51 Desviación Estándar de Roturas de Flexión – Combinación: 65% Cantera Jurado - 35% Cantera Brañez (Fuente: Elaboración Propia)



Figura 38 Gráfico de Desviación Estándar de la Resistencia a Flexión – Combinación: 65% Cantera Jurado - 35% Cantera Brañez (Fuente: Elaboración Propia)

Combinación: 35% Cantera Jurado - 65% Cantera Brañez

CANTERA VALORES A LOS 28 DÍAS	Nro	Resistencia a Flexión (kg/cm ²)	Resistencia a Flexión Promedio (kg/cm ²)	Límite Máximo (kg/cm ²)	Límite Mínimo (kg/cm ²)
35% CANTERA JURADO - 65% CANTERA BRAÑEZ	1	19,47	18,95	19,72	18,17
	2	18,80	18,95	19,72	18,17
	3	18,13	18,95	19,72	18,17
	4	18,27	18,95	19,72	18,17
	5	18,93	18,95	19,72	18,17
	6	19,87	18,95	19,72	18,17
	7	19,33	18,95	19,72	18,17
	8	17,87	18,95	19,72	18,17
	9	18,40	18,95	19,72	18,17
	10	20,40	18,95	19,72	18,17

Tabla 52 Desviación Estándar de Roturas de Flexión – Combinación: 35% Cantera Jurado - 65% Cantera Brañez (Fuente: Elaboración Propia)

$s = \sqrt{\frac{\sum(x - \bar{x})^2}{n - 1}}$	
Valor Promedio (kg/cm ²)	18,95
Desviación Estándar	0,77
Límite máximo (kg/cm ²)	19,72
Límite mínimo (kg/cm ²)	18,17

Tabla 53 Desviación Estándar de Roturas de Flexión – Combinación: 35% Cantera Jurado - 65% Cantera Brañez (Fuente: Elaboración Propia)

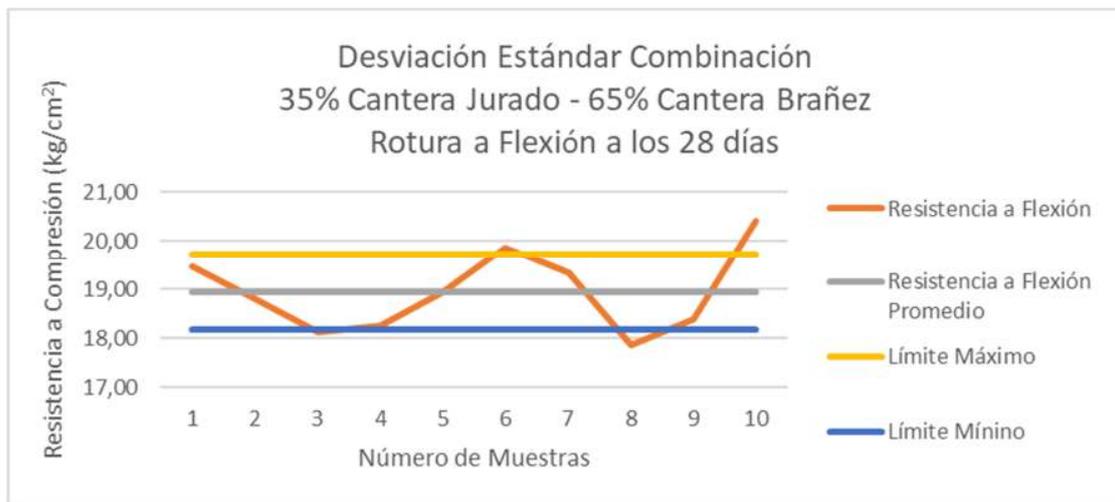


Figura 39 Gráfico de Desviación Estándar de la Resistencia a Flexión – Combinación: 35% Cantera Jurado - 65% Cantera Brañez (Fuente: Elaboración Propia)

Combinación: 0% Cantera Jurado - 100% Cantera Brañez

CANTERA VALORES A LOS 28 DÍAS	Nro	Resistencia a Flexión (kg/cm ²)	Resistencia a Flexión Promedio (kg/cm ²)	Límite Máximo (kg/cm ²)	Límite Mínimo (kg/cm ²)
0% CANTERA JURADO - 100% CANTERA BRAÑEZ	1	29,73	29,95	30,96	28,93
	2	28,80	29,95	30,96	28,93
	3	30,00	29,95	30,96	28,93
	4	31,33	29,95	30,96	28,93
	5	28,53	29,95	30,96	28,93
	6	30,40	29,95	30,96	28,93
	7	28,93	29,95	30,96	28,93
	8	29,47	29,95	30,96	28,93
	9	31,73	29,95	30,96	28,93
	10	30,53	29,95	30,96	28,93

Tabla 54 Desviación Estándar de Roturas de Flexión – Combinación: 0% Cantera Jurado - 100% Cantera Brañez (Fuente: Elaboración Propia)

$s = \sqrt{\frac{\sum(x - \bar{x})^2}{n - 1}}$	
Valor Promedio (kg/cm ²)	29,95
Desviación Estándar	1,01
Límite máximo (kg/cm ²)	30,96
Límite mínimo (kg/cm ²)	28,93

Tabla 55 Desviación Estándar de Roturas de Flexión – Combinación: 0% Cantera Jurado - 100% Cantera Brañez (Fuente: Elaboración Propia)



Figura 40 Gráfico de Desviación Estándar de la Resistencia a Flexión – Combinación: 0% Cantera Jurado - 100% Cantera Brañez (Fuente: Elaboración Propia)

4.3. Comparación entre el Módulo de Rotura teórico y las Resistencias a la Compresión

Al analizar los resultados obtenidos podemos observar que solo la combinación de 100% Grava de Villa Montes se encontraría dentro de los parámetros teóricos del Módulo de Rotura según la Norma ACI 318-19.

$$MR = k * \sqrt{f_c'}$$

Ecuación 19 Módulo de Rotura del Concreto

Donde:

MR= Módulo de la Rotura estimado para el concreto en kg/cm².

f_c'= Resistencia a diseño del concreto = 210 kg/cm².

k= Constante que varía normalmente entre 2,0 y 2,7, para resistencias en kg/cm² a 28 días.

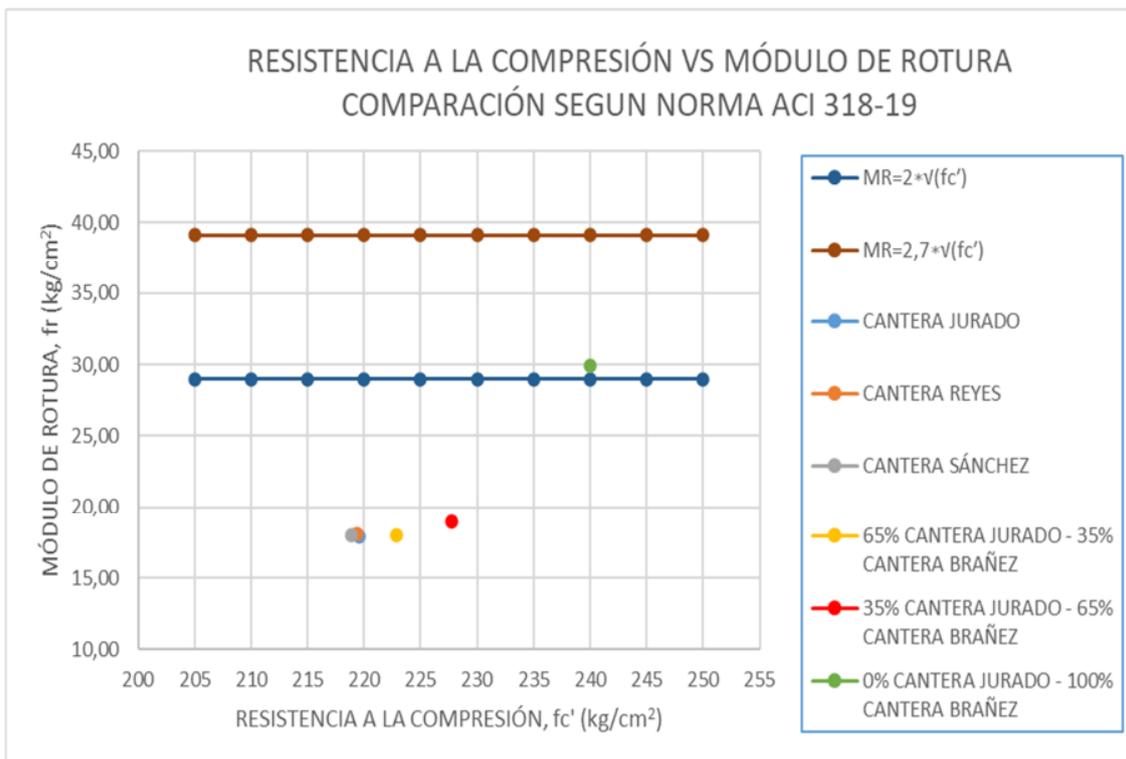


Figura 41 Gráfico de Comparación de la Resistencia a Compresión VS Módulo de Rotura Teórico (Fuente: Elaboración Propia)

Al realizar esta comparación se puede verificar que solo una muestra se encuentra dentro los rangos recomendados por la norma.

5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

Al realizar los ensayos para la caracterización de los agregados que se utilizan para el Hormigón Estructural, se realizó el siguiente diagnóstico sobre la calidad del mismo:

Agregado Grueso (Grava) de las principales canteras del Municipio de Yacuiba:

- Actualmente se ocupa este material en las diferentes obras civiles de la zona y se determinó que este agregado no cumple con las propiedades mínimas de calidad que exige la Norma 211.1 de la ACI.
- Se determinó que el agregado grueso de la Cantera Jurado, Cantera Reyes y Cantera Sánchez en estudio, no cumplen con todas las características requeridas debido a que los valores del Ensayo de Desgaste Mediante la Máquina de Los Ángeles (ASTM C-131) son superiores al 40%, este valor supera el máximo permitido para el Diseño y Elaboración de Mezclas de Concreto según Norma 211.1 de la ACI.
- El uso de este agregado grueso, debido al ser un material frágil, formará concretos susceptibles a fallas estructurales de consideración.

Agregado Fino (Arena) de las principales canteras del Municipio de Yacuiba:

- Se determinó que el agregado fino de las canteras en estudio de la Zona de Yacuiba cumple con todas las características requeridas para el Diseño y Elaboración de Mezclas de Concreto según Norma 211.1 de la ACI.

Al realizar un sondeo de los diferentes proveedores de agregados, se optó por el Agregado grueso de la Cantera de Brañez – Villa Montes y se determinó una combinación óptima de agregados grueso y fino para un Hormigón Estructural, que es utilizando el Agregado grueso de la Cantera de Brañez – Villa Montes y el Agregado fino de la Cantera de Jurado – Caiza, los cuales cumplen con todos los requerimientos exigidos para el Diseño y Elaboración Mezclas de Concreto según la Norma 211.1 de la ACI.

Al realizar el análisis de los resultados obtenidos, utilizando los agregados de la zona de estudio, se evidencio que para los ensayos a Rotura por Compresión se encuentran en el límite de resistencia, mientras que los ensayos a Rotura por Flexión no cumplen con la resistencia mínima indicada en la Norma 211.1 de la ACI.

Al efectuar la comparación entre los resultados obtenidos en las Roturas a Compresión y Roturas a Flexión versus la ecuación del Módulo de Rotura a Flexión se pudo evidenciar que solo una combinación, se encuentra dentro de los parámetros de la Norma ACI 318-19, la cual corresponde el Agregado grueso de la Cantera de Brañez – Villa Montes y el Agregado fino de la Cantera de Jurado – Caiza.

5.2. Recomendaciones

Se recomienda el uso del agregado grueso de la Zona de Yacuiba solo para el uso de hormigones que no sean de uso estructural.

En los ensayos de Compresión y Flexo-Tracción el resultado real se obtiene con las muestras a una edad de 28 días.

Al encontrar la combinación óptima de agregados grueso y fino, se obtiene la alternativa que cumple con los requerimientos de un Hormigón Estructural pero debido a la excesiva distancia de transporte de agregado grueso, se incrementará de forma considerable el presupuesto de la obra.

Al realizar la elaboración de hormigón en obra, se debe hacer la corrección de la dosificación por humedad de acuerdo por los materiales que se encuentren en ese momento, porque si no se realizan de esta manera se obtienen variación sobre la dosificación provocando una falta o exceso de agua, la cual no cumpliría con la relación de Agua/Cemento y se obtendría un hormigón de mala calidad.