

CAPITULO I

DESCRIPCION DEL PROYECTO.

1.1 Problema de investigación.

1.1.1 Planteamiento del problema.

El hormigón en las últimas décadas ha sido muy utilizado en la construcción, debido a que presenta diferentes ventajas, por ser un material que utiliza recursos naturales y locales, además de ser económica su fabricación, es bastante versátil en sus aplicaciones y en gran manera resistente. El hormigón tiene la propiedad de ser variado en la construcción, mezclando dos componentes básicos e importantes como los agregados que tiene que ser mezclados con el cemento y así por lo tanto sus características están afectadas por las propiedades de estos dos componentes.

En nuestro país la Norma Boliviana (CBH 87) Hormigón Armado y la Norma Boliviana (N.B.1225001) Hormigón Estructural actual norma en proceso de aprobación; adopta valores y ecuaciones del American Concrete Institute (A.C.I) pero, dichos estudios del ACI 318-05 son desarrollados en su país; por lo que sus valores y ecuaciones propuestos no necesariamente se asemejan a los que se puedan determinar mediante la experimentación en Bolivia, debido a la heterogeneidad de las propiedades físicas y mecánicas de sus agregados.

El Módulo de Elasticidad Estático a Compresión (E_c) es un término muy importante en el diseño de estructuras de hormigón armado, ya que dicho término está presente en los principales cálculos de estructuras de este tipo, como podemos citar; en el pre-dimensionamiento de elementos estructurales, rigideces, deflexiones y agrietamientos en los miembros estructurales.

Para obtener el valor del módulo de elasticidad del hormigón actualmente solo se utilizan fórmulas matemáticas ya propuestas por los reglamentos internacionales, y la ecuación fueron obtenidos utilizando materiales comunes de sus zonas y materiales debidamente seleccionados, como menciona el A.C.I. “que son los agregados cuarcíticos también calizas de buena calidad con menor porosidad”, muy diferentes a agregados extraídos de canteras de la ciudad de Yacuiba, entonces es un error utilizar dichas ecuaciones para determinar el módulo de elasticidad del hormigón, consecuentemente debido a esto no se tiene una

consideración de que si los valores son reales ya que estas fórmulas no tendrán ninguna relación con los agregados utilizados de esta zona, además de saber que gran parte de la elaboración de hormigón es principalmente compuesto por agregado fino y grueso, es por esto que la influencia de los agregados es de gran importancia debido a las propiedades físicas y mecánicas que varían para cada zona.

En esta investigación, se evaluará los agregados derivados de la explotación de las canteras de Caiza y Villa Montes, debido a que son de mayor consumo para la elaboración de hormigón en dicha ciudad. Y de acuerdo a estos agregados se realizará la evaluación del hormigón para obtener el Módulo de Elasticidad Estático a Compresión del Hormigón (E_c).

1.1.2 Formulación del problema.

¿Cuál será la ecuación calibrada para determinar el módulo de elasticidad estático a compresión del hormigón para la cantera de Caiza y la cantera de Villa Montes?

¿Cuál será el porcentaje de variación del módulo de elasticidad estático a compresión del hormigón según la norma ASTM C-469, en la producción de hormigón, en la Ciudad de Yacuiba, respecto de la Norma ACI318-05, NBHE 1225001 y la Norma CBH-87?

1.1.3 Sistematización del problema.

¿Se podrá determinar las propiedades Físicas y Mecánicas de los agregados tanto de la cantera Villa Montes y la cantera Caiza?

¿Se podrá realizar adecuados diseños de mezcla para la resistencia a compresión simple de 21 Mpa?

1.2 Objetivos.

1.2.1 Objetivo general.

- Determinar una ecuación matemática calibrada del módulo de elasticidad estático a compresión del hormigón ($f_c^l = 21 \text{ MPa}$) según la Norma ASTM C-469, para las canteras de Caiza y Villa Montes.

1.2.2 Objetivo específico.

- Determinar las propiedades de los agregados grueso y fino para la cantera de Caiza y Villa Montes.
- Realizar los ensayos de resistencia a la compresión, peso específico y módulo de elasticidad estático a compresión del hormigón en conformidad con las Normas ASTM respectivamente.
- Determinar la variación del módulo de elasticidad estático a compresión del hormigón ($f_c^l = 21 \text{ MPa}$) según la Norma ASTM C-469 respecto a la Norma ACI 318 – 05, NBHE 1225001 y la CBH – 87 de las canteras de Caiza y Villa Montes.

1.3 Justificación.

1.3.1 Académica.

Mediante la aplicación de concepto del hormigón y su campo de aplicación, se busca a través de la investigación poder realizar y explicar, la importancia que tiene del Módulo de Elasticidad Estático a Compresión del Hormigón, y como esta se la aplica en el diseño de edificaciones de nuestro medio, bajo las cuales se utilizan ecuaciones propuesta por la Norma ACI 318-05, la misma establece que sus materiales a utilizar cumplen un estándar de calidad además de que son debidamente procesado.

1.3.2 Técnica.

En la actualidad no se determina el módulo de elasticidad del hormigón (E_c), se utilizan las fórmulas ya propuestas por reglamentos. Se debería de obtener este módulo de elasticidad de acuerdo a la ubicación del lugar y a los diversos agregados existentes en cada zona, sino que solo se utilizan las fórmulas dadas por los diferentes reglamentos nacionales e internacionales, esto genera que al momento de utilizar dichas formulas implican sobreestimar o infravalorar el dato obtenido utilizando las ecuaciones de módulo de elasticidad propuestas y esto genera desplazamientos en las estructuras, debido a que el dato de módulo de elasticidad es muy diferentes a las reales, haciendo que los diseños en edificaciones de hormigón sean deficientes. En cada zona del país el material principal en la elaboración de hormigón son los agregados, y estos tienen diferentes propiedades físicas y mecánicas dependiendo de la zona. Los agregados constituyen un factor importante en la elaboración de hormigón, esto debería ser tomado en cuenta y no solo determinar la resistencia a compresión del hormigón, sino también a la deformación de este. Con esto podremos determinar si los agregados que utilizamos por zonas o regiones son de buena calidad o mala calidad para la elaboración de hormigón, pudiendo, así como profesionales garantizar la durabilidad y estabilidad en las obras civiles.

En este caso se utilizará un hormigón con resistencia a la compresión de 21 MPa, para determinar el módulo de elasticidad estático, esto es debido a que, en nuestro medio, en la construcción de las obras mayormente utilizamos esta resistencia en la dosificación. Con esta resistencia dimensionamos las estructuras, obteniendo secciones convencionales.

1.3.3 Social.

Mediante la investigación obtendremos un ajuste real a la ecuación para determinar el Módulo de Elasticidad del Hormigón, con materiales de la zona, lo que nos permitirá utilizar en el diseño de edificaciones valores los más reales posible, de tal manera que dichos cálculos de edificaciones brindaran la información más real del comportamiento estructural de la edificación tanto en su rigidez como en su deflexión, y poder garantizar la seguridad a la población.

1.4 Alcance del proyecto.

1.4.1 Hipótesis o análisis de alternativa.

"SI usamos probetas cilíndricas de hormigón de las canteras de Caiza y Villa Montes para determinar el valor del Módulo de Elasticidad Estático a Compresión del Hormigón según la norma ASTM C-469. **ENTONCES** se obtendrá una ecuación matemática calibrada mediante un análisis de regresión múltiple al analizar las variables dependientes e independientes.

1.4.2 Resultados a lograr.

Mediante un análisis de regresión múltiple se obtendrá una ecuación matemática calibrada del módulo de elasticidad estático a compresión del hormigón, para una resistencia a la compresión de 21 MPa, en base a la norma ASTM C-469, producidos con agregado de la cantera de Caiza y la cantera de Villa Montes.

1.4.3 Aporte académico.

Determinar experimentalmente el Módulo de elasticidad estático a compresión del hormigón en cilindros de hormigón bajo esfuerzos de compresión longitudinal, fabricado con áridos procedentes de las canteras de Caiza y Villa Montes, que son aún las principales fuentes de abastecimiento que se posee en la ciudad de Yacuiba. Específicamente nuestra investigación ha fijado resistencias de 21 MPa, para las dos procedencias. Estas muestras serán ensayadas bajo la Norma ASTM C-469 vigente, para luego obtener una ecuación matemática calibrada y comparar dicho resultado con la Norma ACI 318-05 8.5.1, la Norma Boliviana (N.B.1225001) Hormigón Estructura 8.5.1 y la Norma Boliviana CBH-87 5.1.6.

1.5 Variables de Estudios.

1.5.1 Variables Independientes.

- Resistencia a la compresión del hormigón.
- Peso específico del hormigón.

1.5.2 Variables Dependiente.

- Módulo de elasticidad estático a compresión del hormigón

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2.1 El hormigón.

El hormigón es un conglomerado artificial de agregados finos (arena) y gruesos (piedra picada), unido entre sí por una pasta de cemento y agua. El hormigón fresco, recién preparado toma la forma del encofrado o molde que lo contiene endureciéndose con el tiempo a medida que el agua se combina con los componentes del cemento hasta formar una especie de piedra artificial que contiene:

- Agregado fino y gruesos inertes.
- Pasta de cemento y agua que une los agregados.
- Agua, vapor de agua y aire en los intersticios.

A veces se utilizan aditivos en la mezcla para acelerar o retardar el endurecimiento o fraguado, introducir aire, o para aumentar la plasticidad o trabajabilidad de la mezcla durante el vaciado (Fargier G. y Fargier S., 2010, p. 1).

2.2 Componentes del hormigón.

La Tecnología del hormigón moderna define para este material cuatro componentes: Cemento, agua, agregados y aditivos como elementos activos y el aire como elemento pasivo. Si bien la definición tradicional consideraba a los aditivos como un elemento opcional, en la práctica moderna mundial estos constituyen un ingrediente normal, por cuanto está científicamente demostrada la conveniencia de su empleo en mejorar condiciones de trabajabilidad, resistencia y durabilidad, siendo a la larga una solución más económica si se toma en cuenta el ahorro en mano de obra y equipo de colocación y compactación, mantenimiento, reparaciones e incluso en reducción de uso de cemento, como en la siguiente imagen (Pasquel Carvajal, 1993, p. 13).

Aire = 1% a 3%
Cemento = 7% a 15%
Agua = 15% a 22%
Agregado = 60% a 75%

Figura 1. Proporciones típicas en volumen absoluto de los componentes del hormigón.

Fuente: Pasquel, 1993, p. 15.

2.2.1 Cemento.

En términos generales, un cemento se define como un material con propiedades adhesivas y cohesivas que le dan la capacidad de unir fragmentos sólidos para formar un material resistente y durable.

Sin embargo, esta definición incluye gran cantidad de materiales cementantes y los que realmente importa desde el punto de vista de la construcción son los cementos hidráulicos; llamados así porque tienen la peculiaridad de desarrollar sus propiedades (fraguado y endurecimiento) cuando se encuentran en presencia de agua, en virtud a que experimentan una reacción química con ella.

El cemento constituye entre el 7% y el 15% de volumen total de hormigón; es el componente activo de la mezcla y por lo tanto influye en toda su característica.

Se pueden lograr diversos tipos de cementos al efectuar algunas variantes en su composición química; de ahí que se puedan conseguir hormigones con características específicas para obras determinadas. Sin embargo, sea cual sea el tipo de cemento utilizado, es muy recomendable llevar un control estricto en sus propiedades para asegurar uniformidad en la producción del hormigón (Vitervo O'Reilly, s.f., p. 13).

2.2.1.1 Tipos de cementos.

Debido a la notable evolución de la industria del cemento se puede contar con los diversos tipos. Generalmente el cemento portland se clasifica de acuerdo a la normalización de cada país de origen (en Bolivia se usa la Norma NB-011). Las normas ASTM C-150, clasifica 5

tipos de cemento enumerándolos del I al V. La diferencia en las propiedades en los tipos de cemento depende de la proporción relativa que ellos poseen de los cuatros componentes principales (Vitervo O'Reilly, p. 15).

De acuerdo a la Norma ASTM C-150, los tipos de cementos que se tienen son:

Tipo I: que es de uso general y sin propiedades especiales.

Tipo II: de moderado calor de hidratación y algunas resistencias al ataque de sulfatos.

Tipo III: de resistencia temprana y elevado calor de hidratación.

Tipo IV: de bajo calor de hidratación.

Tipo V: de alta resistencia al ataque de sulfatos.

2.2.1.2 Propiedades del cemento portland.

2.2.1.2.1 Hidratación y calor de hidratación.

En términos generales cuando el cemento se encuentra en presencia de agua, se produce una reacción química en la cual el cemento desarrolla sus propiedades aglutinantes. En otras palabras, en presencia del agua los compuestos del cemento (C_2S , C_3S , C_3Al y C_4AF) se hidratan produciendo la pasta que con el paso del tiempo forma una masa y más tarde endurece dando origen a propiedades mecánicas útiles en aplicaciones estructurales.

Cuando el agua y el cemento reaccionan, se genera calor de hidratación durante los procesos de fraguado y endurecimiento haciéndose importantes en estructuras de considerable masa, debido a que, si no se disipa rápidamente, puede ocurrir un incremento en la temperatura del hormigón, produciendo una rápida evaporización del agua y cambios volumétricos que llevan a la contracción del material y eventual agrietamientos (Vitervo O'Reilly, p. 17).

2.2.1.2.2 Peso específico.

El peso específico o densidad del cemento es la relación entre la masa de una cantidad dada y el volumen absoluto que ocupa en esa masa. El cemento portland puro, su valor varío entre 3,10 y 3,15 gr/cm³ y en el cemento con adiciones suele estar entre 2,9 y 3,0 gr/cm³. El valor del peso específico del cemento en realidad no indica la calidad de este, y su valor es usado principalmente para el diseño de mezclas (Vitervo O'Reilly, p. 18).

2.2.1.2.3 Finura.

Esta es una de las propiedades más importante del cemento, y se obtiene en la etapa de molienda. Como la hidratación comienza sobre la superficie de las partículas de cemento, el área superficial total del cemento representa el material susceptible de hidratación. De esta manera, la velocidad de hidratación, y por lo tanto la resistencia, dependerá del grado de finura de los granos (Vitervo O'Reilly, p. 18).

2.2.1.2.4 Fraguados.

Este es el término utilizado para describir la rigidez de la pasta del cemento, aun cuando la definición de rigidez de la pasta puede considerarse un poco arbitraria. En términos generales, el fraguado se refiere a un cambio del estado fluido al estado rígido. Aunque durante el fraguado la pasta adquiere cierta resistencia, para efectos prácticos es conveniente distinguir el fraguado del endurecimiento, pues este último término se refiere al incremento de la resistencia de una pasta de cemento fraguada (Adam Neville, 1999, p. 13).

2.2.1.3 Cementos producidos en Bolivia.

De acuerdo a la Norma Boliviana NB-011, los cementos son conglomerantes hidráulicos o sea materiales artificiales de naturaleza inorgánica y mineral, que finamente molidos y convenientemente amasados con agua, forman pastas que fraguan y endurecen tanto al aire como bajo el agua.

De los cinco tipos de cementos según la ASTM C-150, en Bolivia solo se fabrican los siguientes tipos:

Cementos portland, tipo I.

Son los conglomerantes hidráulicos constituidos en base al clinker portland en proporción no menor al 95% en masa.

Cementos Pórtland con puzolana, tipo IP.

Son los conglomerantes hidráulicos constituidos en base al clinker portland en proporción no menor del 60% ni mayor del 94% en masa, de puzolana.

Cementos con portland con filler o caliza, tipo IF.

Son los conglomerantes hidráulicos constituidos en base al clinker portland en proporción no menor al 80% ni mayor al 94% en masa, filler o caliza.

Cementos puzolánicos, tipo P.

Son los conglomerantes hidráulicos constituidos en base al clinker portland en proporción no menor al 45% ni mayor de 60% en masa, de puzolana, ceniza volante u otros materiales puzolánicos.

Tabla 1. Característica resistente de los cementos.

Categoría resistente		Resistencia a la compresión (MPa) (NB 470)		
		Mínimas a 3 días	Mínimas a 7 días	Mínimas a 28 días
Alta	40	17	25	40
Media	30	10	17	30
Baja	25	-	15	25

Fuente: NB 470.

El cemento utilizado en la Zona Sur de Bolivia en su mayoría es el cemento El Puente.

Cemento El Puente.

El cemento portland con puzolana tipo IP 30, con resistencia a la compresión de 30 MPa a los 28 días en morteros normalizados de cementos.

Se caracteriza por su menor calor de hidratación, menor fisuración y retracción térmica, mejor trabajabilidad, menor reacción álcali/agregado, mayor impermeabilidad, mayor durabilidad.

Aplicaciones.

Se usa generalmente donde se requieran valores de resistencia normal como son:

- Elementos estructurales en general (zapatas, columnas, vigas, losas, muros).
- Obras sanitarias en general.
- Hormigones masivos.
- Hormigones en contacto con agentes agresivos.
- Morteros para todo uso.

2.2.2 Agregados.

2.2.2.1 Generalidades.

Como áridos para la confección de hormigones puede emplearse arenas y gravas naturales o procedentes de machaqueo, que reúnan en igual o superior grado las características de resistencia y durabilidad que se le exijan al hormigón (Montoya, Messenguer & Moran, 2011, p. 25).

Porque al menos tres cuartas partes del volumen del hormigón están ocupados por agregados, no es de extrañar que la calidad de este sea de suma importancia. Los agregados no solo pueden limitar la resistencia del hormigón, puesto que agregados débiles no pueden constituir un hormigón resistente, sino que además sus propiedades afectan en gran medida tanto la durabilidad como el comportamiento estructural del hormigón (Adam Neville, 1999, p. 75).

2.2.2.2 Clasificación de los agregados.

Se denomina **agregado grueso** para describir las partículas mayores de 4,75mm (retenido en la malla N.º 4), y el termino **agregado fino** se utiliza para las partículas menores de 4,75 mm; generalmente los agregados finos contienen partículas dentro de los rangos de 75 µm (malla N.º 200) a 4,75 mm y los agregados gruesos de 4,75 mm, a aproximadamente 50 mm, con excepción del hormigón masivo, el que puede contener agregado grueso de hasta 150 mm (Kumar Meta, 1998, p. 165).

Los áridos pueden ser rodados o machacados. Los primeros proporcionan hormigones más dóciles y trabajables, requiriendo menos cantidad de agua que los segundos. Los machacados confieren al hormigón fresco una cierta actitud que dificulta su puesta en obra. En ambos efectos influye más la arena que la grava. En cambio, los áridos de machaqueo proporcionan una mayor trabajabilidad que se refleja en una mayor resistencia del hormigón especialmente a tracción y en general en una mayor resistencia química.

Al emplearse áridos sueltos se tiene la garantía de que se trata de piedra duras y limpias, salvo contaminación de la gravera. Pero si se encuentra mezclado con arcilla es imprescindible lavarlo, para eliminar la camisa que envuelve los granos y que aria disminuir grandemente su adherencia con la pasta.

Los áridos se oponen a la retracción del hormigón, cuanto más rígido son. En general la reacción disminuye a medida que aumenta el tamaño máximo del árido (Montoya, Messenguer & Moran, 2011, p. 27).

2.2.2.3 Propiedades de los agregados.

2.2.2.3.1 Granulometría.

La granulometría es la distribución de las partículas de materiales granulares de varios tamaños, que generalmente se expresa en términos de porcentaje acumulado mayores o menores que cada una de las series de tamaños o de abertura de mallas, o los porcentajes entre ciertos rangos de abertura de mallas. Los requisitos de granulometría del ASTM C-33 (Especificación estándar de los agregados para el hormigón) para agregados gruesos y finos, se muestran en la tabla 3 y 4 respectivamente.

Hay varias razones para especificar los límites de la granulometría y tamaño máximo del agregado, siendo la más importante su influencia en la trabajabilidad y en el costo (Kumar Meta, 1998, p. 177).

Adam Neville (1999, p. 108) menciona que no existe ninguna curva granulométrica ideal, sino al compromiso por obtenerla. Además de los requisitos físicos, no debemos olvidarnos del aspecto económico: el hormigón se debe de fabricar con materiales que se puedan producir a bajos costos, de manera que no se pueden imponer límites no alcanzables a los agregados.

Tabla 2. Requerimientos de granulometrías para agregados finos.

Malla o tamiz	Porcentaje que pasa (%)
9,5 mm (3/8")	100
4,75 mm (N.º 4)	90 – 100
2,36 mm (N.º 8)	80 – 100
1,18 mm (N.º 16)	50 – 85
600 µm (N.º 30)	25 – 60
300 µm (N.º 50)	5 – 30
150 µm (N.º 100)	0 - 10

Fuentes: ASTM C-33.

Tabla 3. Requisitos de granulometría para agregados gruesos.

		AGREGADO GRUESO													
Huso	TAMAÑO MAXIMO NOMINAL	REQUISITOS GRANULOMETRICOS DEL AGREGADO GUESO PORCENTAJE QUE PASA POR LOS MATICES NORMALIZADOS (mm)													
		100	90	75	63	50	37.5	25	19	12.5	9.5	4.75	2.36	1.18	300µm
		4 "	3 1/2"	3 "	2 1/2 "	2 "	1 1/2 "	1 "	3/4 "	1/2 "	3/8 "	Nº 4	Nº 8	Nº16	Nº 50
1	90 mm a 37.5 mm	100	90-100	---	25-60	---	0-15	---	0-15	---	---	---	---	---	---
2	63 mm a 37.5 mm	---	---	100	90-100	35-70	0-15	---	0-5	---	---	---	---	---	---
3	50 mm a 25.0 mm	---	---	---	100	90-100	35-70	0-15	---	0-15	---	---	---	---	---
357	50 mm a 4.75 mm	---	---	---	100	95-100	---	35-75	---	10-30	---	0-5	---	---	---
4	37.5 mm a 19.0 mm	---	---	---	---	100	90-100	20-55	0-5	---	0-5	---	---	---	---
467	37.5 mm a 4.75 mm	---	---	---	---	100	95-100	---	35-70	---	10-30	0-5	---	---	---
5	25.0 mm a 9.5 mm	---	---	---	---	---	100	90-100	20-55	0-10	0-5	---	---	---	---
56	25.0 mm a 9.5 mm	---	---	---	---	---	100	90-100	40-85	10-40	0-15	0-5	---	---	---
57	25.0 mm a 4.75 mm	---	---	---	---	---	100	95-100	---	25-60	---	0-10	0-5	---	---
6	19.0 mm a 9.5 mm	---	---	---	---	---	---	100	90-100	20-55	0-15	0-5	---	---	---
67	19.0 mm a 4.75 mm	---	---	---	---	---	---	100	90-100	---	20-55	0-10	0-5	---	---
7	12.5 mm a 4.75 mm	---	---	---	---	---	---	---	100	90-100	40-70	0-15	0-5	---	---
8	9.5 mm a 2.36 mm	---	---	---	---	---	---	---	---	100	85-100	10-30	0-10	0-5	---
89	9.5 mm a 1.18 mm	---	---	---	---	---	---	---	---	100	90-100	25-55	5-30	0-10	0-5
9	4.75 mm a 1.18 mm	---	---	---	---	---	---	---	---	---	100	85-100	10-40	0-10	0-5

Fuente: ASTM C-33.

2.2.2.3.1.1 Módulo de finura.

Vitervo O'Reilly (s.f.) menciona que el módulo de finura es un parámetro que se obtiene de la suma de los porcentajes retenidos acumulados en la serie de tamices especificados que cumplan la relación 1:2 desde el tamiz N.º 100 en adelante hasta el tamaño máximo presente y dividido por 100.

El módulo de finura se puede considerar como el tamaño promedio ponderado de un tamiz del grupo, en el cual el material es retenido. Sin embargo, un número infinito de gradaciones pueden tener un mismo valor del módulo de finura y por consiguientes, este parámetro solo debe ser usado para la comparación de materiales cuya gradación sea similar, y resulta valioso para medir ligeras variaciones en un agregado procedente de una misma fuente, como verificación periódica.

En América es más frecuente el uso del módulo de finura de la arena (la suma de los porcentajes retenidos acumulados desde el tamiz N.º 100 hasta el tamiza N.º 4 y dividirlo entre 100) para evaluar que tan fina o gruesa es una arena, pero también es muy empleado como parámetro para el diseño de mezclas. Se considera que el módulo de finura de una arena adecuada para producir hormigones debe de estar entre 2,3 y 3,1; donde un valor menor de 2,0 indica arenas finas, 2,5 una arena de finura media y más de 3,0 una arena gruesa.

2.2.2.3.1.2 Tamaño máximo.

Se define como la abertura del menor tamiz por el cual pasa el 100% de la muestra. Como su nombre lo indica, es el tamaño de las partículas más grande que hay dentro de la masa de agregados y que en algunos casos puede ser único (Vitervo O'Reilly, s.f., p. 37).

2.2.2.3.1.3 Tamaño máximo nominal.

Vitervo O'Reilly (s.f.) menciona que el tamaño máximo nominal es otro parámetro que se deriva del análisis granulométrico y esté definido como el siguiente tamiz que le sigue en abertura (mayor) a aquel cuyo porcentaje retenido acumulado es del 15% o más.

El tamaño máximo no siempre es igual al tamaño máximo nominal, debido a que este último indica el promedio de partículas más grande en su fracción gruesa mientras que el tamaño máximo tan solo da una idea de las partículas más grande.

Por esta razón, la mayoría de las especificaciones granulométricas se dan en función del tamaño máximo nominal.

Adam Neville (1999), menciona que cuanto más grande es la partícula del agregado tanto menor es el área superficial para ser humedecido por masa unitaria. Así al extender la granulometría del agregado a un tamaño máximo mayor se disminuye la cantidad de agua de mezclado, de manera que, para una trabajabilidad y un contenido de cemento se puede disminuir con un aumento en la resistencia. Para tamaños mayores el equilibrio de los efectos depende de la riqueza de la mezcla para cualquier resistencia, así para una relación agua/cemento dada, hay un tamaño máximo óptimo de agregado. El tamaño máximo nominal del agregado desde el punto de vista de la resistencia es una función de la riqueza de la mezcla.

2.2.2.3.2 Forma y textura de la superficie de los agregados.

Vitervo O'Reilly (s.f.) indica la forma y textura de la superficie de los agregados es otra propiedad física que influye en las características del hormigón, en cuanto a la forma de los agregados se puede decir que la ideal es la redondeada, desde el punto de vista del grado de acomodamiento.

2.2.2.3.3 Densidad y densidad aparente.

La densidad es una propiedad física de los agregados y está definida como la relación entre el peso y el volumen de una masa determinada lo que significa que depende directamente de las características del grano del agregado (Vitervo O'Reilly, s.f., p. 41).

Kumar y Monteiro (1998), mencionan que, para dimensionar las mezclas de hormigón, no es necesario determinar la verdadera densidad de un agregado, debido a que los agregados naturales son porosos. Para el proporcionamiento de la mezcla es necesario conocer el espacio ocupado por las partículas del agregado, entonces la determinación de la *densidad aparente relativa*, que se define como la densidad del material, incluyendo los poros impermeables suficiente, que contiene un valor comúnmente de 2,6 a 2,7. Además de la densidad aparente relativa es necesario conocer el *peso volumétrico*, que se define como el peso de los fragmentos de los agregados que llenarían una unidad de volumen, el termino volumétrico se utiliza debido a que el volumen es ocupado tanto por los agregados como por los huecos, el peso volumétrico aproximado de los agregados de peso normal va de 1300 a 1750 Kg/m³.

2.2.2.3.4 Absorción y humedad superficial.

Kumar y Monteiro (1998) indica cuando los poros permeables de los agregados están llenos y no hay partícula de agua en la superficie se dice que el agregado está en una **condición saturada superficialmente seca (SSS)**; cuando el agregado está saturado y hay también una humedad libre en la superficie, el agregado está en una **condición mojada o húmeda**. En caso de agregados **secados en horno**, toda el agua evaporable ha sido extraída. **La capacidad de absorción** se define como la cantidad total de humedad requerida para llevar a un agregado de la condición de secado al horno a la condición de SSS; la **absorción efectiva** es definida como la cantidad de humedad requerida para llevar a un agregado de la condición de secado al aire a la condición SSS.

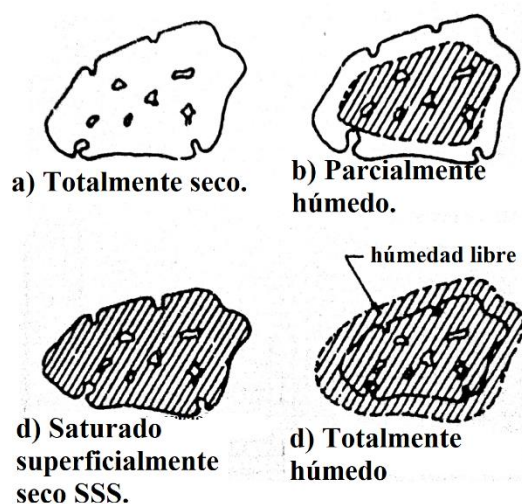


Figura 2. Estado de humedad de los agregados.

Fuente: Vitervo O'Reilly (s.f.)

2.2.2.3.5 Peso unitario.

Vitervo O'Reilly (s.f.) menciona que el peso unitario es una propiedad física importante de los agregados que indica el grado de acomodamiento de las partículas y entre menor sea este menor será el volumen de vacíos entre las partículas que hace que la mezcla sea más económica, porque habrá menor cantidad de huecos a ser llenados con pasta de cementos. Así mismo, mientras mayor sea el peso unitario habrá mayor cantidad de granos lo cual depende de la granulometría, forma, textura y tamaño de lo mismo. El peso unitario es un factor que mide la aptitud del agregado para ser utilizado en la producción del hormigón, su valor varía entre 1200 y 1750 Kg/m³ para agregados naturales.

Existen dos tipos de peso unitario que depende del grado de compactación y se define de la siguiente manera.

2.2.2.3.5.1 Peso unitario suelto.

Vitervo O'Reilly (s.f.) indica que el peso unitario suelto se denomina al material seco colocado suavemente en el recipiente. Este parámetro es importante cuando se trata de manejo, transporte y almacenamiento de los agregados debido a que estos se hacen en estado suelto.

2.2.2.3.5.2 Peso unitario compactado.

Vitervo O'Reilly (s.f.) menciona que el peso unitario compactado se denomina cuando los granos han sido sometidos a una compactación incrementando así el grado de acomodamiento de las partículas de agregado y por lo tanto el valor de masa unitaria. Este parámetro es importante desde el punto de vista del diseño de la mezcla debido a que con el se determina el volumen absoluto de los agregados por cuanto estos van a estar sometidos a una compactación durante el proceso de colocación del hormigón.

2.2.2.3.6 Resistencia a la compresión.

Vitervo O'Reilly (s.f.) menciona que las partículas de agregados tienen una resistencia superior a la de la pasta endurecida, de tal manera que cuando el agregado falla antes que la pasta, la resistencia del agregado toma importancia. Las posibles fallas de los granos se deben a que tienen una estructura pobre o porque previamente se le han inducidos falla a sus partículas durante el proceso de explotación.

Adam Neville (1999) también indica que la influencia de resistencia del hormigón no solo se debe a la resistencia mecánica del agregado, sino también, en gran parte a sus características de absorción y adherencia.

2.2.3 Agua para mezcla de hormigón.

2.2.3.1 Generalidades.

El agua es el elemento por medio del cual el cemento desarrolla sus propiedades aglutinantes ya que en presencia de ella experimenta reacciones químicas dándole las características de fraguar y endurecer (Vitervo O'Reilly, s.f., p. 23).

Vitervo O'Reilly (s.f.) también indica que el agua que se utiliza tiene propósitos diferentes como: agua de mezclado, agua de curado y agua de lavado de los agregados. El agua de

mezclado forma aproximadamente el 15% del volumen total del hormigón, un 5% sirve para hidratar y el 10% lubrica al hormigón que luego se evapora durante el proceso de fraguado. El agua de curado se utiliza después de que el hormigón a fraguado y tiene la función de seguir hidratando al cemento. El agua de lavado de los agregados no participa activamente en la mezcla del hormigón, pero es importante en el procesamiento de los agregados.

2.2.3.1.1 Característica del agua

2.2.3.1.1.1 Agua de mezclado.

El agua de mezclado juega un doble papel en el hormigón. Por un lado, participa en las reacciones de hidratación del cemento; por otro, confiere al hormigón la trabajabilidad necesaria para una correcta puesta en obra. La cantidad de agua de amasado debe limitarse al mínimo estrictamente necesario, ya que el agua en exceso se evapora y crea una serie de huecos en el hormigón (capilares) que disminuyen su resistencia; pero, por otra parte, no puede disminuirse excesivamente el contenido de agua, pues podrían obtenerse masas poco trabajables y de difícil colocación en obra. La figura 4. ilustra este fenómeno: en efecto, la parte superior del gráfico indica como mejora la trabajabilidad de la masa al aumentar la cantidad de agua por m³ de hormigón, mientras que en la parte inferior puede apreciarse el porcentaje de pérdida de resistencia del hormigón correspondiente. Puede retenerse la idea de que cada litro de agua de amasado añadido de más a un m³ de hormigón equivale, a efectos resistentes, a robar dos kilogramos de cemento a dicho metro cubico (Montoya, Messenger & Moran, 2011, p. 23).

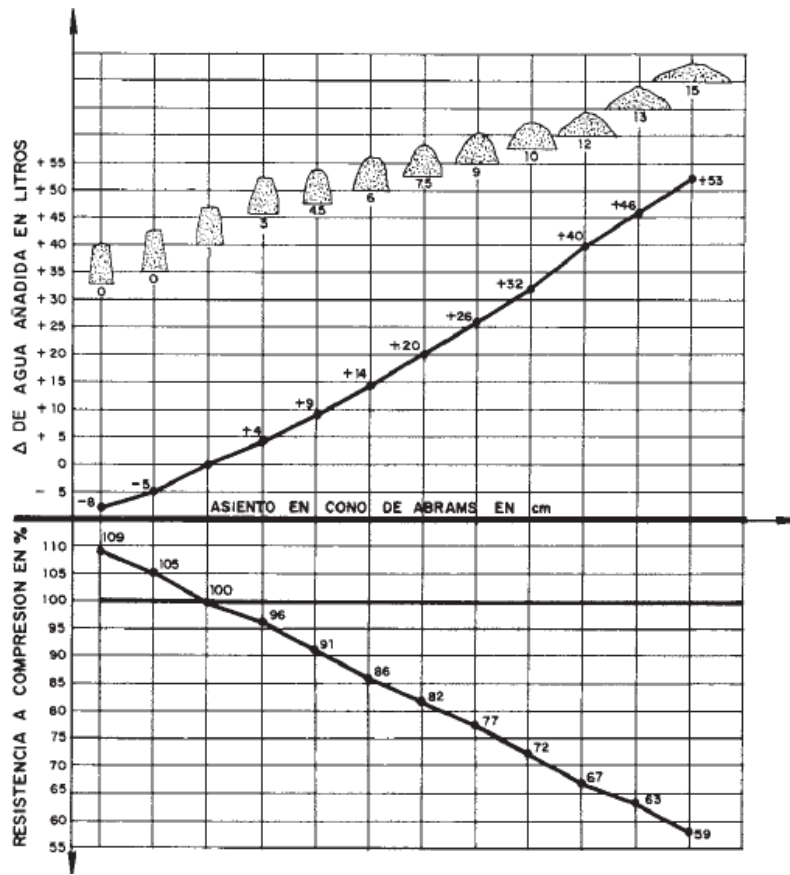


Figura 3. Influencia de un exceso de agua en la consistencia y resistencia del hormigón.

Fuente: Montoya, Messenguer & Moran, 2011, p. 23.

En general se puede decir que cualquier agua natural que sea apta para el consumo humano y no tenga sabor u olor fuerte pueden ser usadas para la elaboración de hormigón, sin que esto implique que el agua adecuada para la elaboración de hormigón sea potable (Vitervo O'Reilly, s.f., p. 24).

2.2.3.1.1.2 Agua de curados.

El agua de curado, durante el proceso de fraguado y primer endurecimiento del hormigón, tiene por objeto evitar la desecación, mejorar la hidratación del cemento e impedir una retracción prematura. Tanto el agua de mezclado como el agua de curado deben reunir ciertas condiciones para desempeñar eficazmente su función. En general, se debe ser más estricto en la aptitud de un agua para curado que en la de un agua para mezclado. Mucho más peligrosa es el agua que recibe el hormigón cuando está endureciendo, porque las reacciones que puede originar ya no actúan sobre una masa en estado plástico. Además, la aportación de sustancias perjudiciales en el agua de mezclado es limitada en cantidad y se produce de una sola vez,

sin renovación; mientras que la aportación del agua de curado es mucho más amplia y de actuación más duradera (Montoya, Messenguer & Moran, 2011, p. 23).

2.2.3.1.1.3 Agua de lavado.

Vitervo O'Reilly (s.f.) menciona que el agua para lavado de los agregados no debe contener materiales en cantidades suficientes para formar películas o recubrimientos sobre la superficie de la partícula de agregados que afecten las propiedades del hormigón.

2.3 Propiedades del hormigón.

2.3.1 Generalidades.

En el sentido general de la palabra, un buen hormigón es aquel que resulta satisfactorio en sus estados fresco y endurecido. Las condiciones relativas al estado fresco residen en que el grado de humedad de la mezcla sea el adecuado para que el hormigón se a transportado, se pueda compactar por medios apropiados con el mínimo posible de energía y además tenga cohesión suficiente, según el método de colocación utilizado, para que no produzca segregación o exudación (Vitervo O'Reilly, s.f., p. 48).

Así también Vitervo O'Reilly (s.f.) menciona que un buen hormigón en estado endurecido debe tener una resistencia a la compresión satisfactoria y una durabilidad adecuada, siendo la resistencia el factor más importante, pero esta no solo va a soportar un esfuerzo de compresión sino también otras propiedades del hormigón que están directamente relaciona con la alta resistencia.

2.3.2 Hormigón fresco.

El hormigón fresco es un material esencialmente heterogéneo, puesto que en el existen tres fases: la sólida (agregados y cemento), la líquida (agua) y la gaseosa (aire ocluido). A su vez, la fase solida es heterogénea entre sí, ya que sus granos son de naturaleza y dimensiones variables (Montoya, Messenguer & Moran, 2011, p. 55).

Entre las propiedades del hormigón fresco podemos citar, como las más importantes, trabajabilidad, consistencia, docilidad, segregación, sangrado.

2.3.2.1 Trabajabilidad.

Adam Neville (1999) menciona que la trabajabilidad se puede definir como la cantidad de trabajo interno útil necesario para producir la compactación total, entiéndase como trabajo

interno, a la energía requerida para vencer a la fricción interna entre las partículas del hormigón. Otros autores las definen como la capacidad que posee el hormigón de ser colocado y compactado apropiadamente.

2.3.2.2 Consistencia.

Es la menor o mayor facilidad que tiene el hormigón fresco para deformarse. Varía con multitud de factores: cantidad de agua de amasado, tamaño máximo, granulometría y forma de los áridos, etc.; el que más influye es la cantidad de agua de amasado, como puede comprobarse en la figura 4 (Montoya, Meseguer & Moran, 2011, p. 55).

Los hormigones se clasifican por su consistencia en secos, plásticos, blandos, fluidos y líquidos, como se indica en la tabla 5.

Tabla 4. Consistencia del hormigón en estado fresco.

Consistencia	Asiento en cono de Abrams (cm)	Compactación
Seca	0 a 2	Compactación con vibrado enérgico.
Plástica	3 a 5	Compactación con vibrado enérgico.
Blanda	6 a 9	Compactación mediante vibrado o apisonado.
Fluida	10 a 15	Compactación mediante picado con barra.
Líquida	16 a 20	Auto compactación.

Fuente: Varona, López & Bañón, 2012, p. 28.

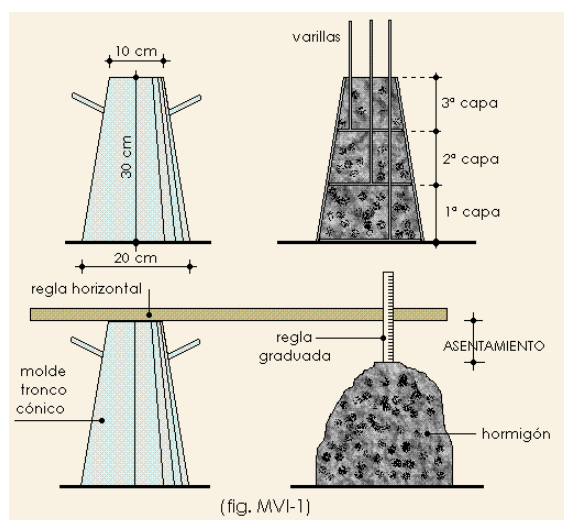


Figura 4. Consistencia del hormigón mediante prueba del cono de Abrams.

Fuente: <http://www.lorenzoservidor.com.ar/facu01/modulo6/modulo6.htm>.

2.3.2.3 Docilidad.

La docilidad, concepto de difícil definición, puede considerarse como la aptitud de un hormigón para ser puesto en obra con los medios de compactación de que se dispone. Esta trabajabilidad del hormigón está relacionada fundamentalmente con su consistencia y también con su homogeneidad, con la trabazón de sus distintos componentes y con la mayor o menor facilidad que la masa presente para eliminar los huecos de la misma (aire ocluido), alcanzando una compacidad máxima (Montoya, Messenguer & Moran, 2011, p. 56).

2.3.2.4 Segregación.

Vitervo O'Reilly (s.f.) menciona la segregación de una mezcla de hormigón se define como la separación de los constituyentes por falta de cohesividad, de manera que su distribución no es uniforme. Las principales causas de la segregación son la diferencia en tamaño de las partículas, la densidad de los constituyentes de la mezcla y una mala gradación de los agregados, así mismo puede afectar a la segregación factores como un mal mezclado, un inadecuado transporte, una colocación deficiente y un exceso de vibrado. La segregación se puede presentar de dos formas; la primera ocurre cuando se usan mezcla pobre y demasiado seca, de tal manera que las partículas gruesas tienden a separarse, la segunda ocurre particularmente en mezclas húmedas y se manifiesta por la separación de una parte de la pasta de los agregados.

2.3.2.5 Exudación o Sangrado

Vitervo O'Reilly (s.f.) menciona que la exudación se considera como una forma de segregación en la que una parte del agua de mezclado tiende a elevarse a la superficie de una mezcla de hormigón recién colocado, esto es debido a que los constituyentes sólidos de la mezcla no pueden retener toda el agua cuando se asientan durante el proceso de fraguado. La exudación trae consecuencias nocivas, por un lado, la parte superior de una porción de hormigón se vuelve demasiado húmeda lo que conlleva estructuras porosas débiles y poco durables. Por otra parte, si la evaporación del agua en la superficie es demasiado rápida que la velocidad de exudación, se producen grietas plásticas de contracción.

2.3.3 Hormigón endurecido.

2.3.3.1 Densidad.

La densidad o masa específica del hormigón endurecido depende de muchos factores, principalmente de la naturaleza de los áridos, de su granulometría y del método de compactación empleado. Será tanto mayor cuanto mayor sea la densidad de los áridos utilizados y mayor cantidad de árido grueso contenga, bien clasificado; y tanto mayor cuanto mejor compactado este. De todas formas, las variaciones de densidad del hormigón son pequeñas, pudiendo tomarse en los cálculos el valor 2.300 kg/m^3 para los hormigones en masa y 2.500 kg/m^3 para los hormigones armados (Montoya, Messenguer & Moran, 2011, p. 56).

2.3.3.2 Compacidad.

La compacidad, que puede definirse como la cantidad de material sólido contenida en una unidad de volumen, está íntimamente ligada a la densidad y depende de los mismos factores que esta, sobre todo del método de consolidación empleado. Estos métodos de consolidación tienen por objeto introducir, en un volumen determinado, la mayor cantidad posible de áridos y, al mismo tiempo, que los huecos dejados por estos se rellenen con la pasta de cemento, eliminando por completo las burbujas de aire. Es evidente la relación directa que existe entre la compacidad de un hormigón y sus resistencias mecánicas, por cuanto dicha compacidad aumenta con el volumen de materias sólidas (resistentes) que componen el hormigón, en relación con los volúmenes ocupados por el agua y el aire (materias no resistentes) (Montoya, Messenguer & Moran, 2011, p. 56).

2.3.3.3 Permeabilidad.

Kumar y Monteiro (1998) indica que la permeabilidad, se describe como la cantidad de salida de agua a través del hormigón, si el agua es presionada al hormigón o viceversa el hormigón a resistir el traspaso del agua u otros casos como líquidos, gas o iones. Generalmente las propiedades iguales que transforman al hormigón en menos permeable también hacen que sea más hermético, el descenso de la permeabilidad aumenta la resistencia del hormigón a la re-saturación, al embate de sulfatos, productos químicos o la invasión del ion cloruro.

La infiltración de la pasta es de suma importancia, es por esto que la pasta cubre a todos los elementos que constituyen el hormigón. La infiltración de la pasta necesita de la relación

agua/cemento (a/c) y de la absorción del cemento. Un hormigón con baja infiltración necesita de una relación agua/cemento bajo y un tiempo de curado en humedad adecuado. También, la adición de aire ayuda a mantener hermético al hormigón, no obstante, tiene un efecto minúsculo sobre la permeabilidad, acelerando el secado.

2.4 Propiedades mecánicas y módulo de elasticidad del hormigón.

2.4.1 Resistencia a la compresión.

Es el esfuerzo que mejor soporta el hormigón. El esfuerzo máximo en compresión axial medido a los 28 días de vaciado el hormigón se denota f'_c y se utiliza como índice de su calidad. Generalmente se ensayan probetas cilíndricas estándar de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura (Figura 6). La rotura de cilindros en compresión axial se produce en planos inclinados unos 35 grados con la vertical o en planos verticales (Figura 7). Otras veces se presentan dos tipos de grietas. El tipo de falla depende de la fricción entre las caras planas del cilindro y los aparatos de carga (Fargier G. y Fargier S., 2010, p. 1).

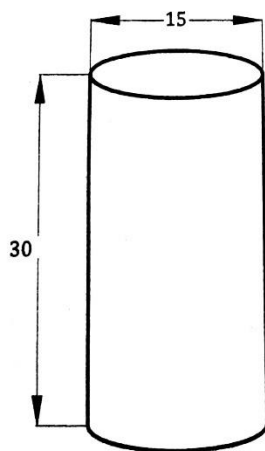


Figura 5. Cilindro estándar.

Fuente: Fargier G. y Fargier S., 2010, p. 1.

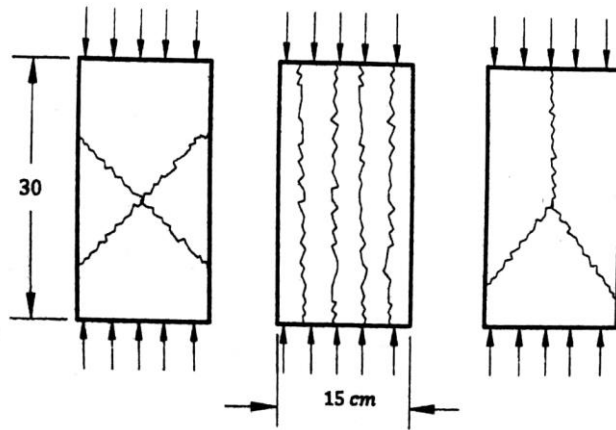


Figura 6. Planos de rotura de los cilindros.

Fuente: Fargier G. y Fargier S., 2010, p. 1.

Fargier G. y Fargier S. (2010) mencionan que comúnmente se emplean hormigones de f'_c entre 150 Kg/cm^2 y 350 Kg/cm^2 , pudiendo alcanzar resistencias mayores, el valor de f'_c aumenta con:

- La disminución de la relación agua/cemento (A/C) de la mezcla de hormigón (Figura 8). La cantidad mínima de agua requerida es de 0,20 litros por kilogramos de cemento, es decir $A/C = 0,20$ al peso. En miembros estructurales usuales, tales como vigas, losas y columnas se emplean entre 8 y 10 sacos de cemento por m^3 de hormigón que se combinan con unos 140 – 220 litros de agua. Relaciones A/C típicas en edificaciones, se encuentran entre 0,40 ~ 0,60 al peso.
- La calidad y dosificación adecuada de la arena y grava.
- El control sobre el mezclado, transporte, vaciado, compactación o vibrado. Un buen curado del hormigón, se logra manteniendo el hormigón húmedo luego del vaciado hasta que alcance la resistencia de diseño (Figura 7).

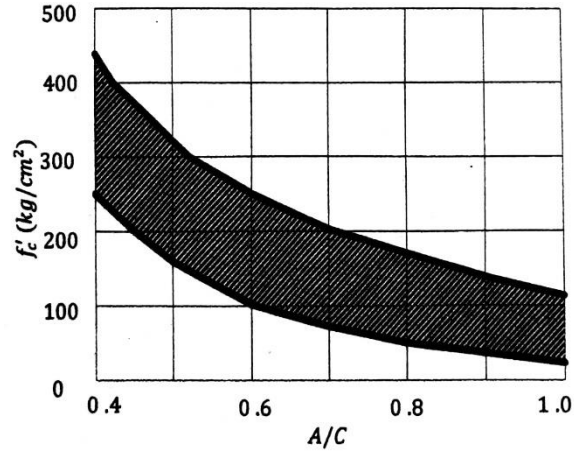


Figura 7. Influencia de la relación A/C en la resistencia del hormigón f'_c .
 Fuente: Fargier G. y Fargier S., 2010, p. 1.

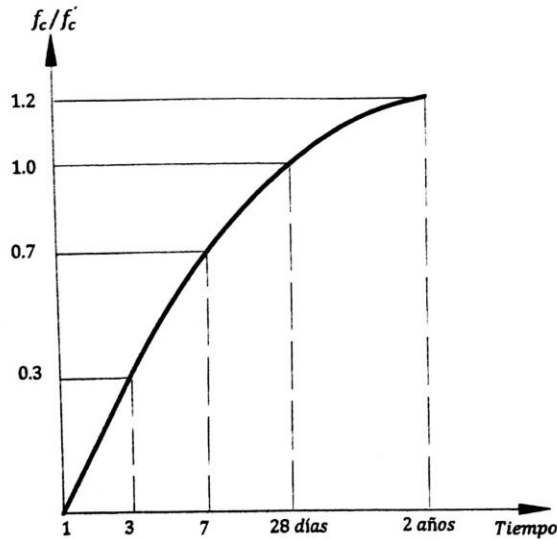


Figura 8. Relación aproximada entre la edad del hormigón y la resistencia del cilindro.
 Fuente: Fargier G. y Fargier S., 2010, p. 2.

2.4.2 Ley de Hooke.

Pytel & Singer (2004) menciona que la relación entre esfuerzo y deformación unitaria puede considerarse lineal para todos los materiales, esta generalización para todos los materiales se conoce como la Ley de Hooke. Simbólicamente esta ley puede expresarse por la ecuación:

$$\sigma = E\varepsilon$$

Donde:

σ = Esfuerzo de compresión (MPa).

E = Módulo de elasticidad del hormigón (MPa).

ε = Deformación unitaria (m/m).

Que simplemente significa que el esfuerzo es directamente proporcional a la deformación unitaria, donde la constante de proporcionalidad es E , esta constante se llama módulo de elasticidad o módulo de Young. Gráficamente E se interpreta como la pendiente de una línea recta hasta el punto del límite de proporcionalidad (Figura 9) sobre un diagrama esfuerzo deformación unitaria axial. El esfuerzo correspondiente al último punto se denomina límite elástico o límite de proporcionalidad, físicamente el módulo elástico representa la rigidez del material bajo una carga impuesta. Un nombre más apropiado hubiera sido quizá el de módulo de rigidez.

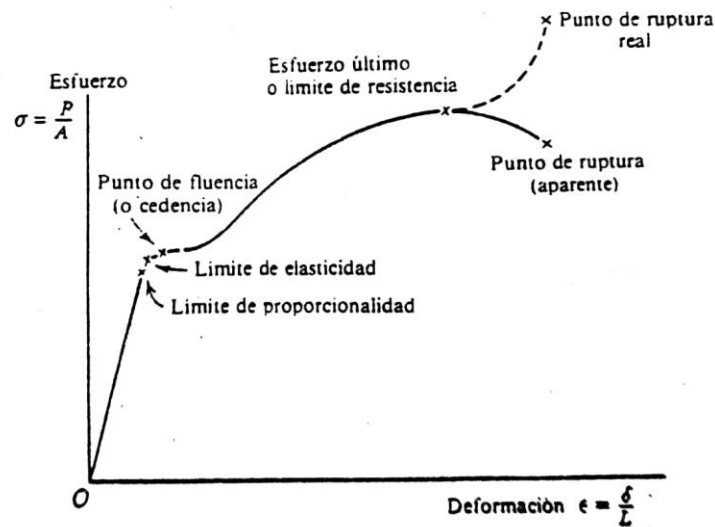


Figura 9. Diagrama esfuerzo-deformación ($\sigma - \varepsilon$).

Fuente: Pytel & Singer, 2004, p. 28.

2.4.3 Relación esfuerzo – deformación del hormigón a compresión.

Harmsen (2002) menciona que las gráficas tienen una rama ascendente casi lineal cuya pendiente varía de acuerdo a la resistencia hasta $1/3$ a $1/2$ de f'_c .

Posteriormente adoptan la forma de una parábola invertida cuyo vértice corresponde al esfuerzo máximo en compresión. La deformación correspondiente a este punto es mayor para

los hormigones más resistentes. Sin embargo, para los de menor resistencia es casi constante e igual a 0,002. La rama descendente de las gráficas tiene una longitud y pendiente que varía de acuerdo al tipo de hormigón. Para hormigones de baja resistencia tiende a tener menor pendiente y mayor longitud que para hormigón de resistencias mayores. De ellos se deduce que los hormigones menos resistentes son los más dúctiles.

La curva esfuerzo – deformación del hormigón varía de acuerdo a la velocidad de aplicación de la carga como se muestra en la figura 10. Si esta se incrementa a un ritmo mayor, la resistencia máxima obtenida es mayor que si la carga se incrementa a razón menor. Este efecto debe tenerse presente cuando se analice los resultados de las pruebas estándar elaboradas en laboratorio. El módulo de elasticidad de un material es un parámetro que mide la variación de esfuerzo en relación a la deformación en el rango elástico.

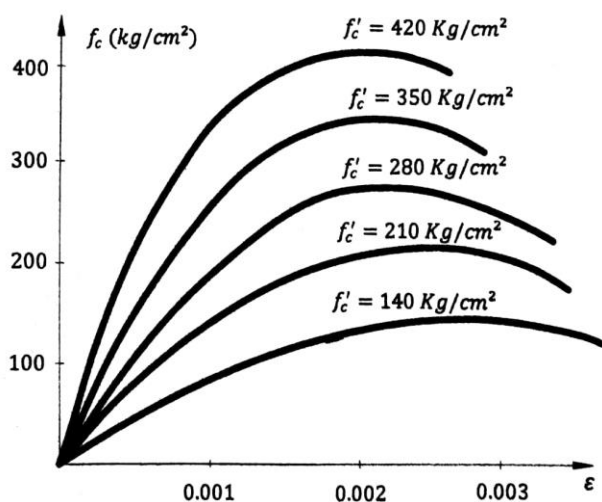


Figura 10. Curvas de esfuerzo-deformación para hormigones de distinta resistencia.

Fuente: Fargier G. y Fargier S., 2010, p. 4.

2.4.4 Deformación.

Pytel & Singer (2004) indica, el valor de la deformación (unitaria) ϵ es el cociente del alargamiento (deformación total) δ y la longitud L en la que se ha producido. Por tanto.

$$\epsilon = \frac{\delta}{L}$$

Sin embargo, de este modo solo se obtiene el valor medio de la deformación. La expresión correcta de la deformación es cualquier punto es que determina el valor de la deformación en una longitud tan pequeña (dL) que puede considerarse constante en dicha longitud.

$$\varepsilon = \frac{d\delta}{dL}$$

No obstante, en ciertas condiciones se puede considerar que la deformación es constante estas condiciones son:

- a) El elemento sometido a tensión debe tener la misma sección transversal o recta constante.
- b) El material debe ser homogéneo.
- c) La fuerza o carga debe ser axial, es decir, producir un esfuerzo uniforme.

2.4.5 Comportamiento elástico.

Las características elásticas de un material son una medida de su rigidez. A pesar del comportamiento no lineal del hormigón, una estimación del módulo elástico (la relación entre el esfuerzo aplicado y la deformación unitaria instantánea dentro de un límite proporcional considerado), es necesario para determinar los esfuerzos inducidos por las deformaciones asociadas con los efectos ambientales. También es necesario para calcular los esfuerzos de diseño bajo carga en elementos simples y los momentos y las deflexiones en estructuras complejas (Kumar y Monteiro, 1998, p. 58).

2.4.6 Carácter no lineal de la relación esfuerzo – deformación.

Kumar y Monteiro (1998) indica la curva típica ($\sigma - \varepsilon$) para el agregado, la pasta de cemento hidratado y el hormigón cargados en compresión uniaxial (Figura 12) resulta inmediatamente aparente, que la relación con el agregado y la pasta de cemento, el hormigón no es realmente un material elástico. Ni la deformación bajo carga instantánea se encuentra que sea verdadera y directamente proporcional al esfuerzo aplicado, ni totalmente recuperable a la descarga.

Desde el punto de vista de la relación entre el nivel de esfuerzo (expresado como porcentaje de carga última) y el micro agrietamiento en el hormigón, la figura 11 muestra cuatro etapas del comportamiento del hormigón. Actualmente es bien sabido que aun antes de la aplicación de cargas externas, existen ya micro agrietamiento en la zona de transición entre la matriz del mortero y el agregado grueso en el hormigón. El número y ancho de las grietas dependerá

de los factores del sangrado, resistencia en la zona de transición y el curado del hormigón. En condiciones ordinaria de curado (cuando el elemento está sujeto a efectos de retracción por secado o a retracción térmica), debido a la diferencia en su módulo de elasticidad, se establecerán deformaciones diferenciales entre la matriz y el agregado grueso, causando grietas en zona de transición. Por abajo aproximadamente 30% de la carga última, las grietas en la zona de transición permanecen estables, por lo tanto, permanece lineal (etapa 1, figura 12).

Por encima del 30% de la carga última (etapa 2), en cuanto se incrementa el esfuerzo, las microgrietas de la zona de transición comienzan a crecer en longitud, ancho y número. Por lo tanto, la relación (σ/ε) se incrementa y la curva comienza a desviarse apreciablemente de la línea recta. Sin embargo, hasta aproximadamente un 50% del esfuerzo último, puede suponerse que existe un sistema estable de microgrietas en la zona de transición; igualmente en esta etapa el agrietamiento de la matriz es despreciable. De 50% a 60% de la carga última, las grietas comienzan a formarse en la matriz. Con un incremento mayor en el esfuerzo de aproximadamente 75% de la carga última (etapa 3), no solo se volverá inestable el sistema de grietas en zona de transición, sino que también se incrementará la proliferación y la propagación de grietas en la matriz, causando que la curva ($\sigma - \varepsilon$) se incline considerablemente hacia la horizontal.

De 75% a 80% de la carga última, la velocidad de deformación por liberación de energía parece llegar al nivel crítico necesario para el crecimiento espontáneo de grietas bajo esfuerzo sostenido y el material se deformará hasta la falla.

Muy cerca del 75% de la carga última (etapa 4); con el incremento del esfuerzo se desarrollan muy altas deformaciones, indicando que el sistema de grietas se está volviendo continuo de grietas se está volviendo continuo debido a la rápida propagación de las grietas en la matriz y en la zona de transición.

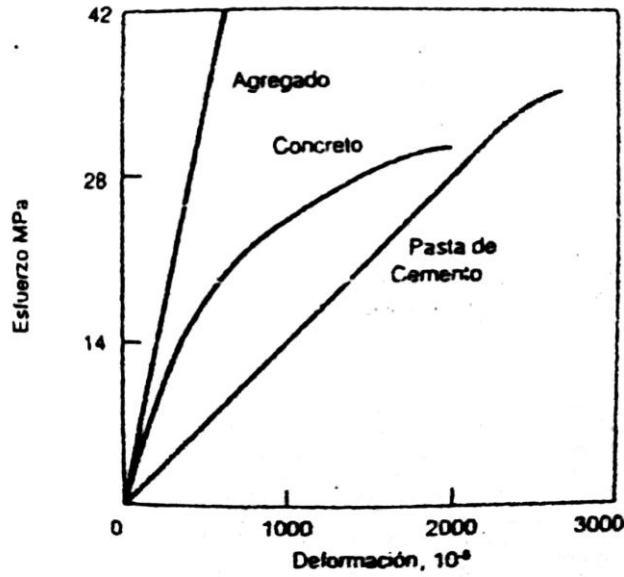


Figura 11. Comportamiento típico esfuerzo - deformación de la pasta de cemento, el agregado y el hormigón.

Fuente: Kumar & Monteiro, 1998, p. 59.

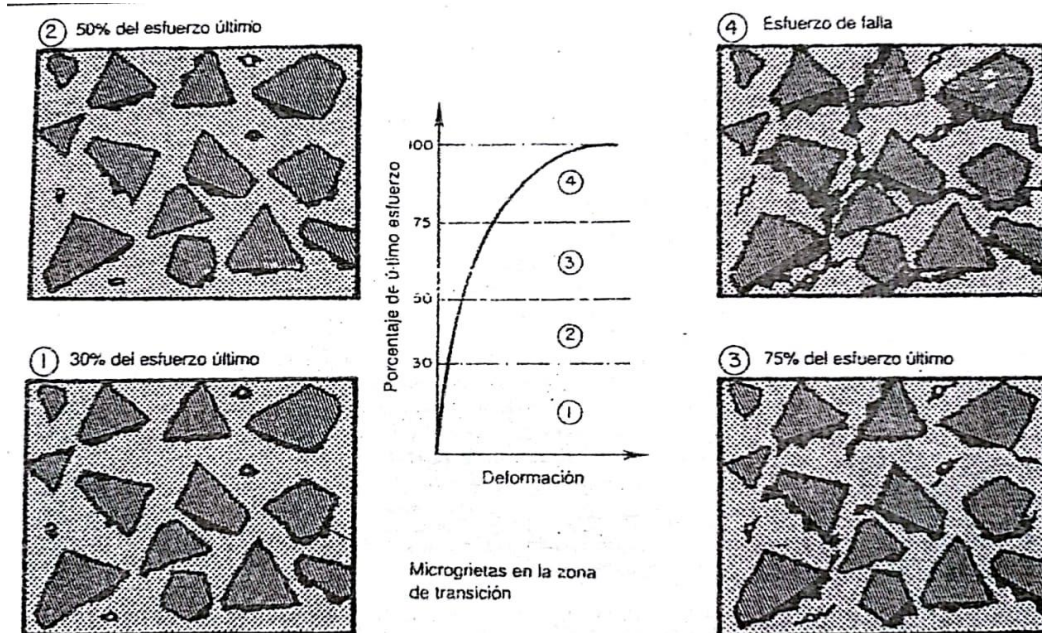


Figura 12. Representación gráfica del comportamiento esfuerzo-deformación del hormigón bajo compresión uniaxial.

Fuente: Kumar & Monteiro, 1998, p. 60.

2.4.7 Módulo de elasticidad estático.

El módulo de elasticidad estático de un material bajo tensión o compresión, está dado por la pendiente de la curva ($\sigma - \varepsilon$) del hormigón bajo carga uniaxial. Puesto que la curva para el hormigón no es lineal, se utiliza tres métodos para calcular el módulo. Esto ha dado lugar a los tres módulos ilustrados en la figura 13 (Kumar & Monteiro, 1998, p. 60-61).

- Módulo tangente es dado por la pendiente de una línea tangente trazada en la curva esfuerzo-deformación en cualquier punto de la curva.
- El módulo secante es dado por la pendiente de una línea trazada desde el origen a un punto en la curva, correspondiente a un esfuerzo de 40% de carga de falla.
- El módulo de cuerda es dado por la pendiente de una línea trazada entre dos puntos de la curva esfuerzo-deformación. En comparación con el módulo secante, en lugar del origen, la línea se traza desde un punto que representa una deformación unitaria longitudinal de $19,7 \times 10^{-6} \mu\text{cm/cm}$, al punto que corresponde a 40% de la carga ultima. Cambiar la línea base por la micro deformación 50, se recomienda para corregir la ligera concavidad que a menudo se observa al comienzo de la curva de esfuerzo-deformación.

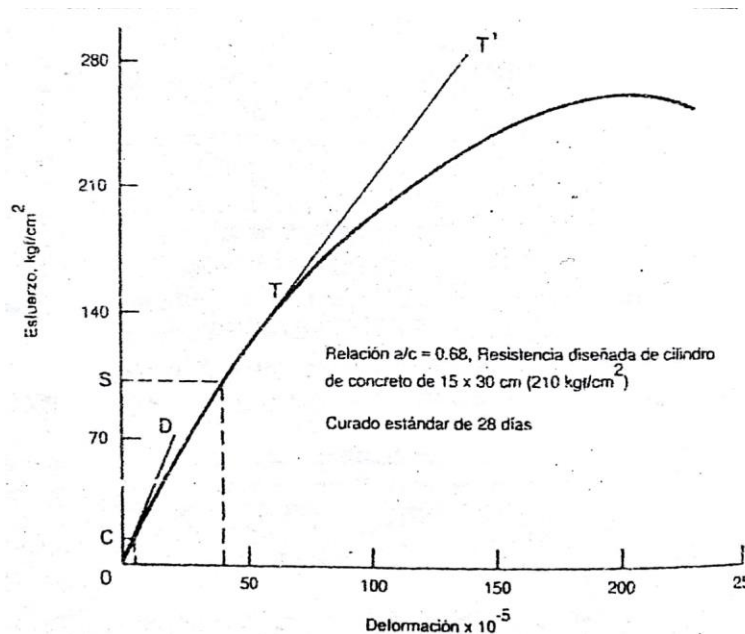


Figura 13. Diferentes tipos de módulos de elasticidad y el método por el cual estos son determinados.

Fuente: Kumar & Monteiro, 1998, p. 60.

2.4.8 Relación de poisson.

Al ensayar un cilindro en compresión axial se producen acortamientos longitudinales (ε) y ensanchamientos de la sección transversal (ε') (Figura 14). Las deformaciones transversales son muy pequeñas hasta una carga unitaria de aproximadamente $0,80 \cdot f'_c$ y por lo tanto el cilindro disminuye de volumen desde $f = 0$ hasta $f = 0,80 \cdot f'_c$.

La relación de poisson $= \varepsilon'/\varepsilon$ varia entre 0,15 y 0,20 (para esfuerzos $f < 0,80 \cdot f'_c$.) (Fargier G. y Fargier S., 2010, p. 4).

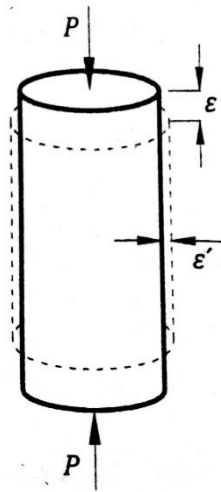


Figura 14. Relación de poisson.

Fuente: Fargier G. y Fargier S., 2010, p. 4.

2.5 Dosificación del hormigón.

2.5.1 Generalidades.

Kumar & Monteiro (1998) menciona que *el proceso de dosificación es considerado un arte más que una ciencia*. Unos de los propósitos de la dosificación es el proporcionamiento de una mezcla que reúna las características especificadas como, la trabajabilidad del hormigón fresco, y la resistencia del hormigón endurecido, a una edad especificada, además de producir una dosificación de hormigón al menor costo posible. Siendo su objetivo el proporcionar una mezcla que reúna los ingredientes adecuados entre los materiales disponibles y determinar la combinación más económica para producir un hormigón con ciertas características mínimas de comportamiento.

2.5.2 Consistencia.

Kumar & Monteiro (1998) indica que es una mitad de la humedad de la mezcla puesto que le asentamiento afecta la facilidad con la cual la mezcla pueda fluir durante su colocación, *la mayoría de los procedimientos para el diseño de mezcla se basan en el asentamiento como un índice burdo de la trabajabilidad*. Hay que hacer notar que, en el laboratorio son necesario realizar varias mezclas de pruebas antes de llegar a un valor cualitativo de la trabajabilidad y resistencia considerado satisfactorio.

En hormigones para edificaciones se recomienda en general que el asiento en cono de Abrams no sea inferior a 6 cm (Montoya, Messenguer & Moran, 2011, p. 41).

2.5.3 Resistencia.

Desde el punto de vista de la seguridad estructural, la resistencia del hormigón especificada por le proyectista es considerada como la resistencia mínima requerida f'_c . Por lo tanto, para tomar en cuenta las variaciones de los materiales, los métodos de mezclado, el transporte y la colocación del hormigón, así como la elaboración, curado y probado de especímenes de hormigón, el reglamento de construcción 318 ACI requiere un cierto grado de resistencia por encima de la diseñada, con base en consideraciones estadística. En otras palabras, dependiendo de la variabilidad de los resultados de las pruebas, las proporciones de las mezclas seleccionadas deben producir una resistencia media o promedio, más alta que la resistencia mínima especificada. Hay que hacer notar que la resistencia promedio f'_{cr} y no la resistencia especificada f'_c , es la que se usa en los cálculos del diseño de mezclas (Kumar & Monteiro, 1998, p. 213).

2.6 Control estadístico de la resistencia del hormigón.

2.6.1 Generalidades.

Adam Neville (1999) indica que un concepto muy importante que hay que tener en cuenta actualmente es que los métodos de diseño estructural en hormigón son probabilísticos. Al ser el hormigón un material heterogéneo, está sujeto a la variabilidad de sus componentes, así como a las dispersiones adicionales debido a las técnicas de elaboración, transporte, colocación y curado en obra. La resistencia del hormigón bajo condiciones controladas sigue con gran aproximación la distribución probabilística Normal

2.6.2 Distribución de resistencia.

Adam Neville (1999) menciona que el comportamiento de la resistencia del hormigón a compresión se ajusta a la Distribución Normal (Campana de Gauss), cuya expresión matemática es:

$$Y = \frac{1}{s \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(X_j - \bar{X})^2}{2s^2}}$$

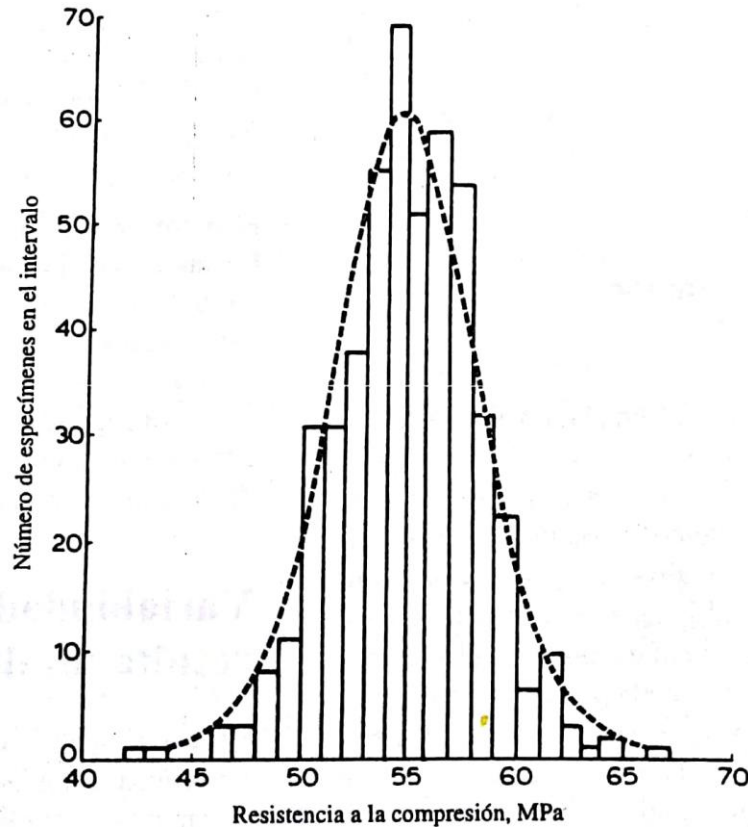


Figura 15. Histogramas de valores de resistencia.

Fuente: Adam Neville, 1999, p. 446.

2.6.3 Desviación estándar.

Adam Neville (1999) menciona que el valor de la desviación estándar determina la dispersión de la resistencia. En la figura 15 se puede observar que la curva es simétrica con respecto al valor promedio y se extiende más o menos al infinito, el área bajo la curva entre ciertos valores de resistencia medidos en términos de la desviación estándar representa de manera similar al histograma. Puede verse a partir del análisis anterior de probabilidad que la

dispersión de resistencia con respecto a la media es una función fija de la desviación estándar, que está definida como la raíz de desviación cuadrada media, es decir.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (X_j - \bar{X})^2}{n - 1}}$$

Donde:

s = Desviación estándar (MPa).

n = Numero de datos realizados.

X_j = Numero de ensayo realizado (MPa).

\bar{X} = Media aritmética de los ensayos (MPa).

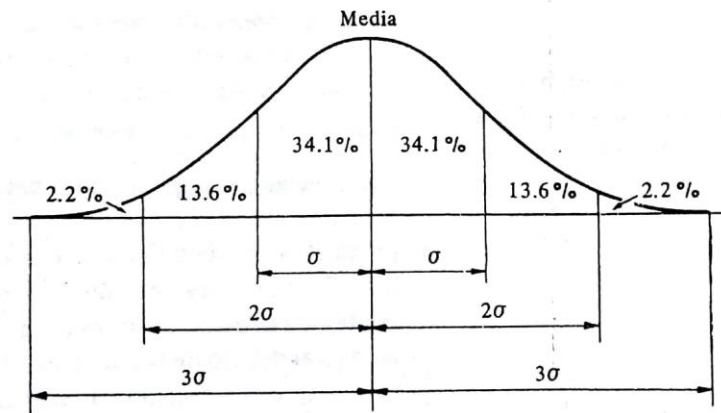


Figura 16. Relación de la serie con respecto a la desviación normal para muestras de diferente tamaño.

Fuente: Adam Neville, 1999, p. 446.

2.6.4 Coeficiente de variación.

Adam Neville (1999) indica que el coeficiente de variación tiene como expresión:

$$CV = \frac{S}{\bar{X}} \times 100 (\%)$$

Este parámetro no permite predecir la variabilidad existente entre los ensayos de resistencia. La distribución normal permite estimar matemáticamente la probabilidad de la ocurrencia de un determinado fenómeno en función de los parámetros indicados anteriormente, y en el caso del hormigón se aplica a los resultados de resistencias.

2.6.5 Variabilidad de la resistencia.

Adam Neville (1999) como se mencionó anteriormente que la resistencia de los ensayos difiere, de la curva de distribución normal, la desviación estándar se representa por debajo del área proporcional y está dado en tablas estadísticas (tabla 6).

Tabla 5. Clasificación de la norma de control con resistencia hasta 35 MPa de acuerdo al ACI 214.77

Norma de control	Desviación estándar (MPa).	
	En el campo.	Mezcla de ensayo de laboratorio.
Excelente	< 3	< 1,5
Muy buena	3 - 3,5	1,5
Buena	3,5 - 4	1,5 - 2
Regular	4,1 - 5	2 - 2,5
Mala	> 5	> 2,5

Fuente: Adam Neville, 1999, p. 515.

CAPITULO III

METODOLOGÍA

3.1 Tipo de investigación.

“Investigación - experimental”.

Esta investigación se desarrollará en tres etapas:

Etapa I: Comprende una investigación realizada en el laboratorio para obtener las propiedades de los materiales que forman un hormigón, para poder realizar una dosificación apropiada para la obtención de probetas de hormigón con una resistencia a la compresión ($f_c^l = 21 MPa$).

Etapa II: Será una etapa que consisten en realizar probetas de hormigón que se basan en una dosificación y la mezcla de los materiales, puestas en condiciones ambientales de laboratorio, se realiza un curado de las probetas de hormigón, y se ensayan los cilindros a compresión a diferentes edades, para determinar su resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad del hormigón.

Etapa III: En esta etapa se realizará un análisis cuantitativo para la recolección y análisis de resultados en base al cálculo numérico y observaciones estadísticas para generar patrones de comportamiento y poder determinar una ecuación matemática calibrada del módulo de elasticidad estático para la cantera de Caiza y Villa Montes.

3.2 Población y muestra.

Para la determinación del número total de probetas en la investigación, primero las probetas de hormigón a realizar en los ensayos deben estar de acuerdo al tamaño de los agregados con el cual se realizarán las probetas, en nuestro caso se utilizaron probetas estándar de:

Altura = 30 cm

Diámetro = 15 cm

Estas son las medidas utilizadas cuando se realiza la toma de muestras testigo y son las que se determinan en la norma ASTM C-192 “Este ensayo consiste en fabricar y curar probetas cilíndricas de hormigón en el laboratorio”; con esta normativa se realizan, generalmente, los

controles de calidad en las construcciones y los resultados que se obtienen en este tipo de molde con dimensiones mencionadas, son satisfactorias, ASTM C-192 menciona que el diámetro de un testigo cilíndrico o la dimensión mínima de la sección transversal de un testigo rectangular debe ser mínimamente tres veces el tamaño máximo nominal del agregado grueso en el hormigón. De acuerdo a esta norma se decidió confeccionar probetas de 15cm x 30cm.

Se elaborarán 70 probetas para ser ensayadas, 35 probetas para la cantera de “Villa Montes” y otras 35 para la cantera de “Caiza”, que serán utilizadas de la siguiente forma.

3.2.1 Probetas para pruebas iniciales.

Serán las primeras probetas elaboradas en nuestra investigación, estas nos servirán para realizar todos los ajustes necesarios en la dosificación y comprobar que las condiciones propuestas para el diseño de la mezcla se cumplan (asentamiento, resistencia), en caso de no cumplir se realizará la corrección al diseño de la mezcla.

- **Cantera de Villa Montes**
 - a. 10 probetas para ser ensayadas a los 28 días (ensayo de compresión simple).
- **Cantera de Caiza**
 - b. 10 probetas para ser ensayadas a los 28 días (ensayo de compresión simple).

3.2.2 Probetas para pruebas finales.

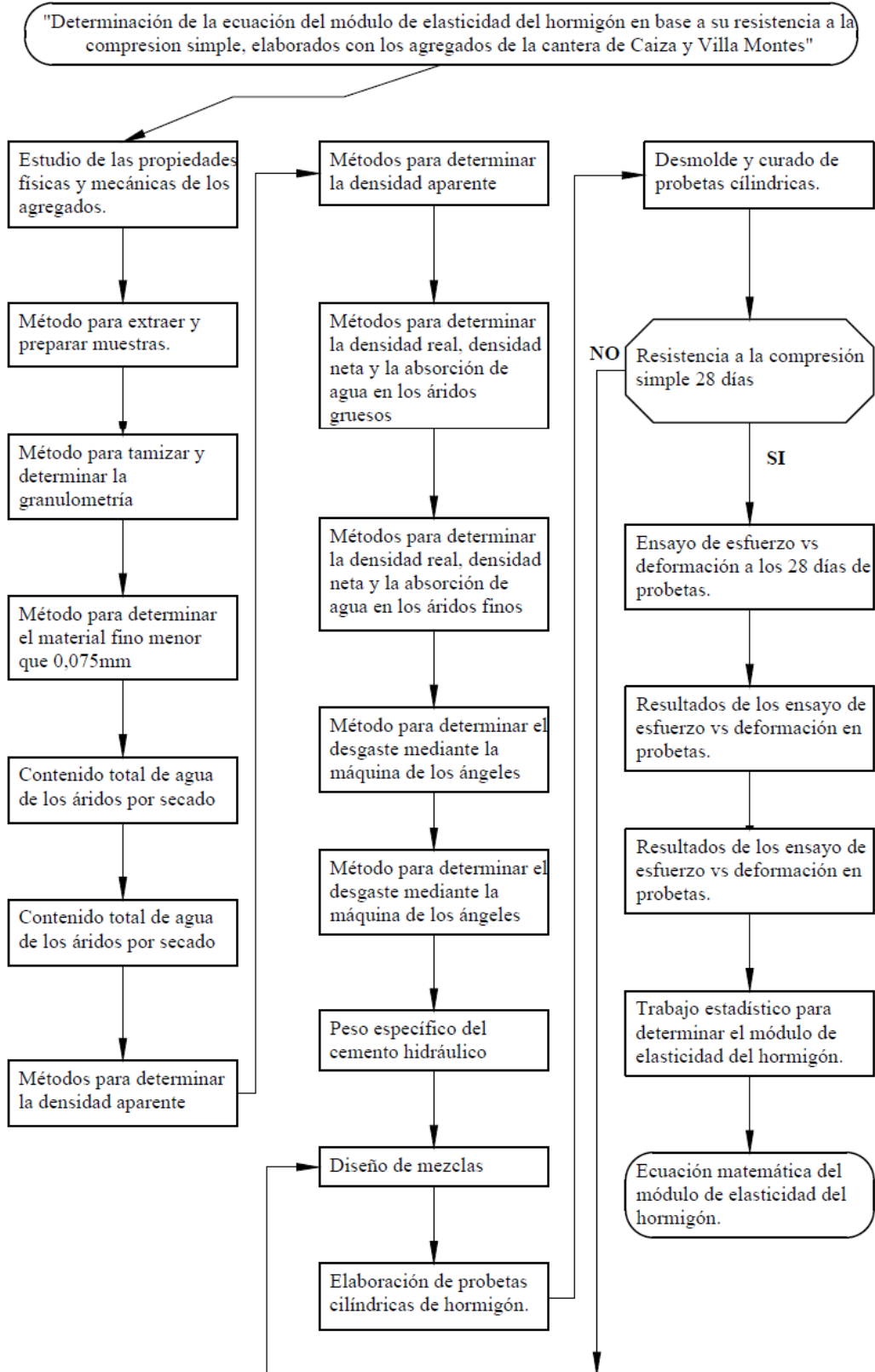
Las probetas de pruebas finales serán el resultado de las pruebas iniciales corregidas, con estas probetas se realizará la investigación propuestas, en las que se determinará la resistencia y el módulo de elasticidad del hormigón.

- **Cantera de Villa Montes**
 - c. 3 probetas para ser ensayadas a los 7 días (ensayo de compresión simple).
 - d. 2 probetas para ser ensayadas a los 14 días (ensayo de compresión simple).
 - e. 10 probetas para ser ensayadas a los 28 días (ensayo de compresión simple).
 - f. 10 probetas para obtener el Módulo de Elasticidad del Hormigón.
- **Cantera de Caiza**
 - g. 3 probetas para ser ensayadas a los 7 días (ensayo de compresión simple).
 - h. 2 probetas para ser ensayadas a los 14 días (ensayo de compresión simple).

- i. 10 probetas para ser ensayadas a los 28 días (ensayo de compresión simple).
- j. 10 probetas para obtener el Módulo de Elasticidad del Hormigón.

Se realizará la suma de 50 probetas estándar sometidas a resistencia a compresión simple, 20 probetas estándar sometidas al ensayo de esfuerzo vs deformación.

3.3 Flujograma de proceso de trabajo de la presente investigación.



3.4 Propiedades de los materiales

Para el análisis de las propiedades físicas y mecánicas del cemento portland tipo I y los agregados de las canteras Villa Montes y Caiza se realizaron basados en las normas Manual de Carreteras Volumen 4 y normas ASTM, como se detallan a continuación:

Tabla 6. Lista de ensayos aplicados a los agregados.

Ítem	Ensayo	Normas	
Agregados Grueso y Fino			
1	Método para extraer y preparar muestras.	H0101	ASTM D-75
2	Método para el cuarteo de muestras	H0102	ASTM C-702
3	Método para tamizar y determinar la granulometría	H0104	ASTM C-136
4	Método para determinar el material fino menor que 0,075mm	H0106	ASTM C-117
5	Contenido total de agua de los áridos por secado	H0107	ASTM C-566
6	Métodos para determinar la densidad aparente	H0108	ASTM C-29
7	Métodos para determinar la densidad real, densidad neta y la absorción de agua en los áridos gruesos	H0109	ASTM C-127
8	Métodos para determinar la densidad real, densidad neta y la absorción de agua en los áridos finos	H01010	ASTM C-128
9	Método para determinar el desgaste mediante la máquina de los ángeles	H01011	ASTM C-131

Fuente: Elaboración propia.

3.4.1 Estudio de las propiedades físicas y mecánicas de los agregados de las canteras Villa Montes y Caiza.

3.4.1.1 Método para extraer y preparar muestras.

Objeto

Este método establece los procedimientos para extraer y preparar las muestras representativas de áridos finos y gruesos. (ABC Manual de Ensayos de Suelos y Materiales *Hormigón Volumen 4, p.1 H0101).

3.4.1.2 Método para el cuarteo de muestras

Objeto

Los diferentes tipos y tamaño de áridos requieren que la muestra sea representativa para los varios ensayos a los que será sometida. El material obtenido en terreno debe ser siempre mayor que la cantidad de la muestra requerida para el ensayo. (ABC Manual de Ensayos de Suelos y Materiales *Hormigón Volumen 4, p.1 H0102).

3.4.1.3 Método para tamizar y determinar la granulometría

Objeto.

Este método establece el procedimiento para tamizar y determinar la granulometría de los áridos. Es aplicable a los áridos que se emplean en la elaboración de morteros, hormigones, tratamientos superficiales y mezcla asfálticas. (ABC Manual de Ensayos de Suelos y Materiales *Hormigón Volumen 4, p.1 H0104).

Resultados.

Tabla 7. Resultados de ensayos medio de granulometría agregado grueso cantera Caiza.

Ensayo N°	% QUE PASA EL TAMIZ N.						
	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	N.º 4	N.º 8
1	100	100	93,25	75,63	55,64	8,15	0,15
2	100	100	93,04	75,44	54,86	8,15	0,22
3	100	100	93,60	75,77	55,73	8,24	0,15
4	100	100	93,25	75,63	55,04	7,56	0,25
5	100	100	93,25	75,65	55,07	7,56	0,26
Media	100	100	93,28	75,63	55,27	7,93	0,21
Norma	100	100	100 - 90	-	55 - 20	10 - 0	5 - 0

Fuente: Elaboración propia.

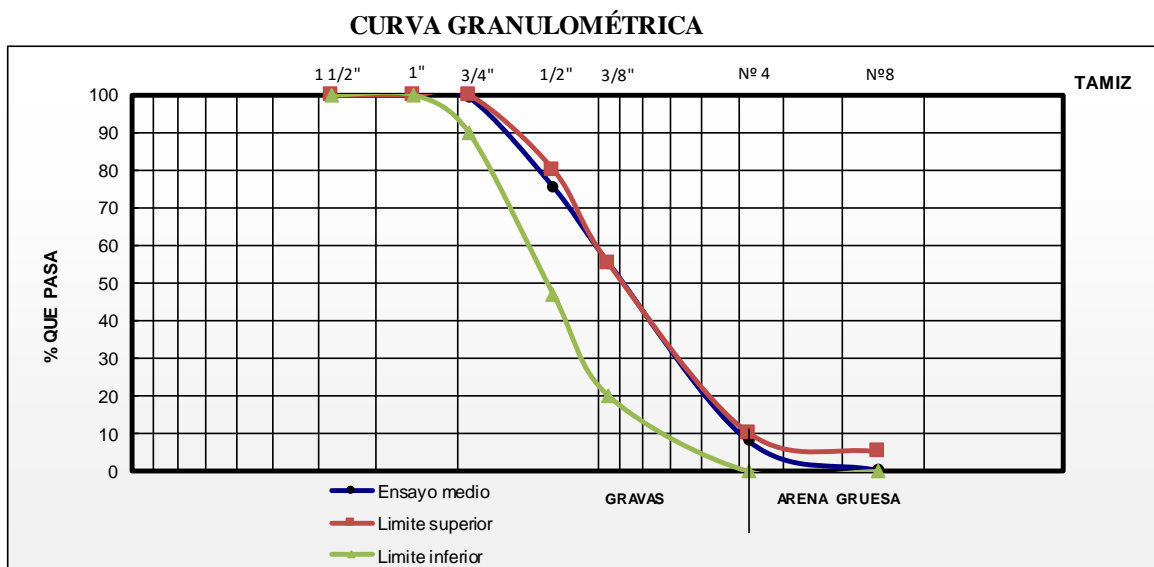


Tabla 8. Resultados de ensayo de granulometría agregado grueso cantera Caiza.

Tamaño máximo:	1"
Tamaño máximo nominal:	3/4"

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9. Resultados de ensayos medio de granulometría agregado fino cantera Caiza.

Ensayo N°	% MEDIO QUE PASA EL TAMIZ N°.						
	3/8"	N°4	N°8	N°16	N°30	N°50	N°100
1	100	96,52	89,26	79,81	60,8	28,37	6,36
2	100	96,68	88,65	79,14	60,22	28,9	6,59
3	100	96,13	89,11	79,66	60,65	29,43	6,32
4	100	96,52	88,49	79,04	60,52	28,09	6,27
5	100	97,09	89,06	79,37	59,9	28,32	6,18
Media	100	96,59	88,91	79,4	60,418	28,622	6,344
Norma	100 -100	100-90	100-80	85-50	60-25	30-5	10-0

Fuente: Elaboración propia.

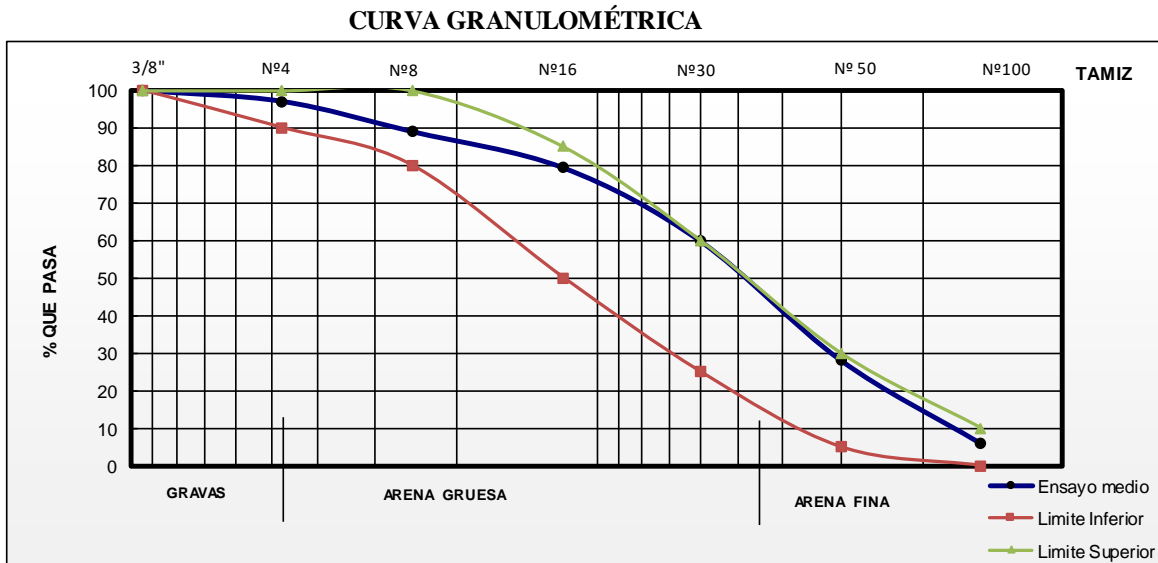


Tabla 10. Resultados de ensayo de granulometría agregado fino cantera Caiza.

Módulo de finura:	2,40
Tamaño máximo nominal:	4,75 mm

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 11. Ensayos medio de granulometría agregado grueso cantera Villa Montes.

Ensayo N°	% QUE PASA EL TAMIZ N.						
	2"	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	N.º 4
1	100	100	100	90,78	27,25	7,77	0,18
2	100	100	100	92,78	26,24	8,42	0,21
3	100	100	100	91,98	26,56	8,11	0,28
4	100	100	100	91,71	26,30	8,27	0,25
5	100	100	100	91,00	27,02	8,29	0,31
Media	100	100	100	91,65	26,67	8,17	0,25
Norma	100	100	100 - 90	-	55 - 20	10 - 0	5 - 0

Fuente: Elaboración propia.

CURVA GRANULOMÉTRICA

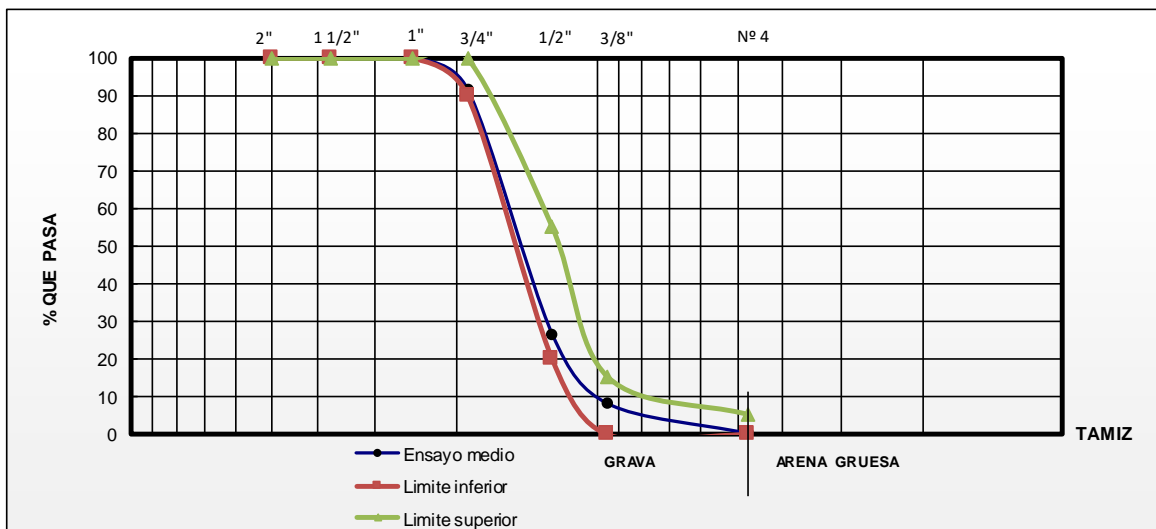


Tabla 12. Resultados de ensayo de granulometría agregado grueso cantera Villa Montes.

Tamaño máximo:	1"
Tamaño máximo nominal	3/4"

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13. Ensayos medio de granulometría agregado fino cantera Villa Montes.

Ensayo N°	% MEDIO QUE PASA EL TAMIZ N°.						
	3/8"	N°4	N°8	N°16	N°30	N°50	N°100
1	100	93,24	81,09	71,41	56,17	25,76	5,15
2	100	93,97	81,65	72,12	57,29	25,86	4,86
3	100	93,24	81,09	71,18	57,06	26,65	5,54
4	100	94,58	81,54	71,86	56,30	26,20	4,19
5	100	92,93	80,78	71,20	56,17	27,11	4,09
Media	100	93,59	81,23	71,55	56,60	26,32	4,77
Norma	100 -100	100-90	100-80	85-50	60-25	30-5	10-0

Fuente: Elaboración propia.

CURVA GRANULOMÉTRICA

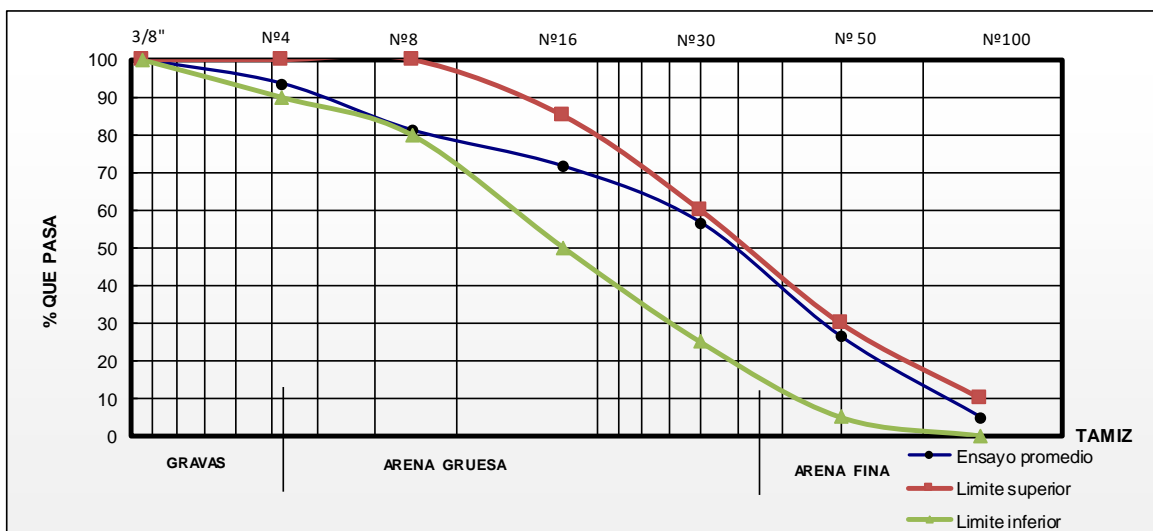


Tabla 14. Resultados de ensayo de granulometría agregado fino cantera Villa Montes.

Módulo de finura:	2,66
Tamaño máximo nominal:	4,75 mm

Fuente: Elaboración propia.

3.4.1.4 Método para determinar el material fino menor que 0,075mm.

Objeto.

El método establece el procedimiento mediante el tamizado húmedo para determinar el contenido de material fino compuesto por partículas inferiores a 0,075 mm (N°200) en los áridos. (ABC Manual de Ensayos de Suelos y Materiales *Hormigón Volumen 4, p.1 H0106).

Resultados.

Tabla 15. Resultados de ensayo del material fino menor que 0,075 mm cantera Caiza.

Asignación	Descripción	Cantidad	Unid.
A	Contenido de material fino inferior que 0,075 mm	1,88	%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16. Resultados de ensayo del material fino menor que 0,075 mm cantera Villa Montes.

Asignación	Descripción	Cantidad	Unid.
A	Contenido de material fino inferior que 0,075 mm	2,56	%

Fuente: Elaboración propia.

3.4.1.5 Contenido total de agua de los áridos por secado.

Objeto.

Este método se aplica para determinar, por secado, el porcentaje de humedad evaporable, en muestras de áridos. (ABC Manual de Ensayos de Suelos y Materiales *Hormigón Volumen 4, p.1 H0107).

Resultados.

Tabla 17. Resultado de ensayo contenido de humedad de los áridos cantera Caiza.

Asignación	Descripción	Cantidad	Unid.
w (%)	Porcentaje de humedad árido grueso	3,65	%
w (%)	Porcentaje de humedad árido fino	1,54	%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 18. Resultado de ensayo contenido de humedad de los áridos cantera Villa Montes.

Asignación	Descripción	Cantidad	Unid.
w (%)	Porcentaje de humedad árido grueso	1,11	%
w (%)	Porcentaje de humedad árido fino	1,81	%

Fuente: Elaboración propia.

3.4.1.6 Métodos para determinar la densidad aparente.

Objeto.

Este método establece los procedimientos para determinar la densidad aparente de los áridos. Es aplicable a los áridos que se emplean en la elaboración de morteros, hormigones, tratamientos superficiales y mezclas asfáltica. (ABC Manual de Ensayos de Suelos y Materiales *Hormigón Volumen 4, p.1 H0108).

Resultados.

Tabla 19. Resultado de ensayo densidad aparente agregado grueso cantera Caiza.

Asignación	Descripción	Cantidad	Unid.
ρ_{as}	Densidad aparente suelta	1.497,00	Kg/m ³
ρ_{ac}	Densidad aparente compactada	1.618,34	Kg/m ³

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 20. Resultado de ensayo densidad aparente agregado fino cantera Caiza.

Asignación	Descripción	Cantidad	Unid.
ρ_{as}	Densidad aparente suelta	1.405,00	Kg/m ³
ρ_{ac}	Densidad aparente compactada	1.669,00	Kg/m ³

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 21. Resultado de ensayo densidad aparente agregado grueso cantera Villa Montes.

Asignación	Descripción	Cantidad	Unid.
ρ_{as}	Densidad aparente suelta	1.581,33	Kg/m ³
ρ_{ac}	Densidad aparente compactada	1.747,00	Kg/m ³

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 22. Resultado de ensayo densidad aparente agregado fino cantera Villa Montes.

Asignación	Descripción	Cantidad	Unid.
ρ_{as}	Densidad aparente suelta	1.602,00	Kg/m ³
ρ_{ac}	Densidad aparente compactada	1.739,67	Kg/m ³

Fuente: Elaboración propia.

3.4.1.7 Métodos para determinar la densidad real, densidad neta y la absorción de agua en los áridos gruesos.

Objeto.

Este método establece los procedimientos para determinar la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua en los áridos. (ABC Manual de Ensayos de Suelos y Materiales *Hormigón Volumen 4, p.1 H0109).

Resultados.

Tabla 23. Resultado de ensayo la densidad real, densidad neta y la absorción de agua en los áridos gruesos cantera Caiza.

Asignación	Descripción	Cantidad	Unid.
ρ_R	Densidad real del árido saturado superficialmente seco	2,54	gr/cm ³
ρ_{RT}	Densidad real del árido seco	2,46	gr/cm ³
ρ_N	Densidad neta	2,69	gr/cm ³
α	Absorción del agua	3,48	%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 24. Resultado de ensayo la densidad real, densidad neta y la absorción de agua en los áridos gruesos cantera Villa Montes.

Asignación	Descripción	Cantidad	Unid.
ρ_R	Densidad real del árido saturado superficialmente seco	2,64	gr/cm ³
ρ_{RT}	Densidad real del árido seco	2,61	gr/cm ³
ρ_N	Densidad neta	2,69	gr/cm ³
α	Absorción del agua	1,13	%

Fuente: Elaboración propia.

3.4.1.8 Métodos para determinar la densidad real, densidad neta y la absorción de agua en los áridos finos.

Objeto.

Este método establece los procedimientos para determinar la densidad real, densidad neta y la absorción de agua en los áridos finos. (ABC Manual de Ensayos de Suelos y Materiales *Hormigón Volumen 4, p.1 H0110).

Resultado.

Tabla 25. Resultado de ensayo la densidad real, densidad neta y la absorción de agua en los áridos finos cantera Caiza.

Asignación	Descripción	Cantidad	Unid.
ρ_R	Densidad real del árido saturado superficialmente seco	2,46	gr/cm ³
ρ_{RT}	Densidad real del árido seco	2,42	gr/cm ³
ρ_N	Densidad neta	2,51	gr/cm ³
α	Absorción del agua	1,56	%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 26. Resultado de ensayo la densidad real, densidad neta y la absorción de agua en los áridos finos cantera Villa Montes.

Asignación	Descripción	Cantidad	Unid.
ρ_R	Densidad real del árido saturado superficialmente seco	2,57	gr/cm ³
ρ_{RT}	Densidad real del árido seco	2,53	gr/cm ³
ρ_N	Densidad neta	2,65	gr/cm ³
α	Absorción del agua	1,80	%

Fuente: Elaboración propia.

3.4.1.9 Método para determinar el desgaste mediante la máquina de los ángeles.

Objeto.

Este método establece el procedimiento para determinar la resistencia al desgaste de los áridos mayores a 2,5 mm, mediante la máquina de Los Ángeles. (ABC Manual de Ensayos de Suelos y Materiales *Hormigón Volumen 4, p.1 H0111).

Resultado.

Tabla 27. Resultado de ensayo al desgaste mediante la máquina de los ángeles cantera Caiza.

Asignación	Descripción	Cantidad	Unid.
P (%)	Porcentaje de desgaste	42,60	%

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 28. Resultado de ensayo al desgaste mediante la máquina de los ángeles cantera Villa Montes.

Asignación	Descripción	Cantidad	Unid.
P (%)	Porcentaje de desgaste	14,96	%

Fuente: Elaboración propia.

3.4.2 Estudio de las propiedades físicas y mecánicas del cemento.

3.4.2.1 Peso específico del cemento hidráulico.

Objeto.

Este método tiene por objeto establecer la determinación del peso específico del cemento hidráulico usando el método del frasco volumétrico de Le Chatelier.

Resultado.

Tabla 29. Resultado de ensayo al desgaste mediante la máquina de los ángeles cantera Caiza.

Asignación	Descripción	Cantidad	Unid.
P (%)	Peso específico del cemento	3,15	gr/cm ³

Fuente: Elaboración propia.

3.5 Pruebas y diseño de mezcla de hormigón.

3.5.1 Diseño de mezcla para $f'_c = 21$ MPa.

La dosificación del hormigón tiene por objeto determinar las proporciones que hay al mezclar los componentes de agua, cemento, agregado grueso y fino, para obtener la masa de hormigón que reúna las propiedades y características exigidas.

El punto de partida para establecer la dosificación del proyecto es la resistencia característica de compresión de 210 kg/cm^2 a los 28 días.

3.5.2 Método de diseño.

3.5.2.1 Método del A.C.I.

Este procedimiento se basa en el informe Practica Estándar para Seleccionar Proporciones para Concreto Normal, Pesado y en Masa, ACI 211.1 Manual Practica del Concreto, parte 1 1991.

El hormigón debe dosificarse para que proporcione una resistencia promedio a la compresión requerida f'_{cr} , empleando una desviación estándar que debe de satisfacer los criterios de durabilidad, además debe de producirse de manera que se minimice la frecuencia de resultados inferiores a la resistencia especificada de diseño f'_c .

El *método de volumen absoluto* es considerado más exacto, que incluye una secuencia de nueve pasos que se presentaran a continuación, los datos antecedentes para realizar el cálculo son los siguientes:

- Análisis granulométrico para agregado grueso y fino.
- Densidad aparente compactada del agregado grueso.
- Densidad neta de los agregados grueso y fino.
- Peso específico del cemento.
- Capacidad de absorción y humedad libre en los agregados.
- Especificaciones de la obra si las hay (como relación agua/cemento máximo, mínimo contenido de aire, tamaño máximo del agregado y resistencia a edades tempranas, normalmente se especifica a los 28 días).

Paso 1: Selección del asentamiento.

Para el proporcionamiento de la mezcla, el asentamiento se habrá determinado según la exigencia de la construcción. Obsérvese que deberá especificarse no solo un valor sino también un valor máximo, este es necesario para evitar la segregación.

Paso 2: Selección del tamaño máximo del agregado.

Tendrá que decidirse por lo general de acuerdo a la granulometría con lo que se disponga en el medio, o lo hará el proyectista de la estructura recordando con cuidado los requisitos geométricos del tamaño del miembro y el espaciamiento del acero de refuerzo o alternativamente, según razones de disponibilidad.

Paso 3: Estimación del contenido de agua y del contenido de aire.

La cantidad de agua por unidad de volumen de hormigón requerida para producir un asentamiento dado, depende del tamaño máximo de las partículas, la forma y granulometría, así como de la cantidad de aire incluido. Si no se encuentran disponibles datos que se basen en la experiencia con los agregados a utilizar, suponiendo partículas de forma normal y bien graduadas, se puede hacer una estimación del agua de mezclado con o sin inclusión de aire basándose en la tabla siguiente.

Tabla 30. Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes asentamientos y tamaño máximo nominal de agregados dados.

Asentamiento (cm)	Agua, kg/m ³ de hormigón para tamaños máximos nominales indicado.					
	9,5 mm	12,5 mm	19 mm	25 mm	37,5 mm	50 mm
hormigón sin aire incluido						
2,5 a 5	207	199	190	179	166	154
7,5 a 10	228	216	205	193	181	169
15 a 17,5	243	228	216	202	19	178
cantidad de aire atrapado	3%	2,5%	2%	1,5%	1%	0,5%

Fuente: ACI 211.1 p. 38.

Paso 4: Selección de la relación agua cemento.

Existen dos criterios para la selección de la relación agua/cemento: resistencia y durabilidad. En lo que corresponde a la resistencia a la compresión, el valor promedio que se busca debe de exceder la resistencia mínima especificada por un margen apropiado.

En lo que corresponde a durabilidad, la relación agua/cemento bien puede ser especificada, por el proyectista o por un reglamento de diseño apropiado. Lo vital es que la relación agua/cemento se la *más baja*.

i) Resistencia promedio a la compresión requerida f'_{cr} a partir de la resistencia especificada f'_c .

- **Dosificación basada en la experiencia y/o en mezcla de prueba.**

Desviación estándar.

Cuando una planta de hormigón tiene registros de ensayos, debe establecerse una desviación estándar de la muestra (s), de la muestra. Los registros de ensayos a partir de los cuales se calcula (s) deben cumplir las siguientes condiciones:

- a) Representar materiales, procedimientos de control de calidad y condiciones similares a las esperadas, y las variaciones en los materiales y en las proporciones dentro de la muestra no deben haber sido más restrictivas que las de la obra propuesta.
- b) Representar un hormigón producido para que cumpla con una resistencia o resistencias especificadas, dentro de 7 MPa de f'_c .
- c) Consistir al menos de 30 ensayos consecutivos, o de dos grupos de ensayos consecutivos totalizando al menos 30 ensayos.

Tabla 31. Factor de modificación para la desviación estándar de la muestra cuando se dispone menos de 30 ensayos.

Número de ensayos.	Factor de modificación para la desviación estándar de la muestra +.
Menos de 15	Emplee la tabla 33
15	1,16
20	1,08
25	1,03
30 o más.	1

Fuente: ACI 211.1.

- **Resistencia promedio requerida.**

Cuando se tiene datos.

Tabla 32. Resistencia promedio a la compresión requerida cuando hay datos disponibles para establecer la desviación estándar.

Resistencia especificada a la compresión, MPa	Resistencia promedio requerida a la compresión, MPa
$f'_c < 35$	$f'_{cr} = f'_c + 1.34s$
	$f'_{cr} = f'_c + 2.33s - 3,5$
$f'_c > 35$	$f'_{cr} = f'_c + 1.34s$
	$f'_{cr} = 0,90f'_c + 2.33s$

Fuente: ACI 211.1.

Cuando no se tiene datos.

Tabla 33. Resistencia promedio a la compresión requerida cuando no hay datos disponibles para establecer la desviación estándar.

Resistencia especificada a la compresión, MPa	Resistencia promedio requerida a la compresión, MPa
$f'_c < 20$	$f'_{cr} = f'_c + 7$
$20 \leq f'_c \leq 35$	$f'_{cr} = f'_c + 8,5$
$f'_c > 35$	$f'_{cr} = 1,10f'_c + 5$

Fuente: ACI 211.1.

ii) **Relación agua/cemento para la resistencia promedio a la compresión requerida.**

Tabla 34. Relaciones entre la relación agua/cemento y la resistencia a la compresión del concreto.

Resistencia a la compresión a 28 días (Mpa)	Relación agua/cemento, por peso.	
	concreto sin aire incluido	concreto con aire incluido
40	0,42	-
35	0,47	0,39
30	0,54	0,45
25	0,61	0,52
20	0,69	0,6
15	0,79	0,7

Fuente: ACI 211.1.

Paso 5. Cálculo del contenido de cemento.

El resultado de los pasos 3 y 4 da el contenido de cemento de manera directa: es el contenido de agua dividida por la relación agua/cemento. Sin embargo, si a partir de las consideraciones de durabilidad.

Paso 6. Estimación de contenido de agregado grueso.

Aquí, se hace la suposición de que la relación óptima del volumen aparente de agregado grueso respecto del volumen total del hormigón depende solamente del tamaño del agregado y de la granulometría del agregado fino. La forma de las partículas del agregado no entra directamente en la relación, sino en la determinación de la densidad aparente.

Tabla 35. Volumen aparente de agregado grueso por volumen unitario de concreto.

Tamaño máximo nominal	Volumen aparente de agregado grueso compactado y secado en horno por volumen unitario de hormigón para módulo de finura de agregado fino.			
	2,4	2,6	2,8	3
(mm)				
9,5	0,50	0,48	0,46	0,44
12,5	0,59	0,57	0,50	0,53
19	0,66	0,64	0,62	0,60
25	0,71	0,69	0,67	0,65
37,5	0,75	0,73	0,71	0,69
50	0,78	0,76	0,74	0,72
75	0,82	0,8	0,78	0,76
150	0,87	0,85	0,83	0,81

Fuente: ACI 211.1

Paso 7. Estimación del contenido de agregado fino.

En este paso, todos los componentes del cemento fueron calculados a excepción del agregado fino su cantidad es determinada por diferencia y en esta fase, se pueden emplear:

El método de volumen absoluto, el volumen total desplazado por los ingredientes conocidos (agua, aire, cemento y agregado grueso), se resta del volumen unitario del concreto (1m^3) para obtener el volumen requerido del agregado fino. Este a su vez es convertido en unidades de peso multiplicándolo por la densidad del material.

Paso 8. Ajuste por humedad.

Generalmente los agregados en el almacén están húmedos, sin la corrección por humedad, la relación real de agua/cemento de la mezcla de tanteo será más alta que la seleccionada en el paso 4, y los pesos de los agregados saturados superficialmente secos serían menores que los estimados. Para la mezcla, el agua se reduce y la cantidad de agregado se incrementa correspondientemente.

3.5.3 Diseño de la mezcla de prueba para la resistencia especificada de 21 MPa.

3.5.3.1 Diseño de mezcla para la cantera de Caiza.

i. Especificaciones de diseño.

Tipo de construcción: Elaboración de probetas para laboratorio.

Exposición: normal.

Resistencia a la compresión: 21 MPa.

ii. Característica de los materiales seleccionados.

Tabla 36. Característica de los materiales cantera de Caiza.

Asignación	Ensayo	Agregado fino	Agregado grueso	Cemento EL PUENTE
TMN	Tamaño máximo nominal (mm)	-	19	-
MF	Módulo de finura	2,4	-	-
ρ_N	Densidad neta (gr/cm^3)	2,51	2,69	3,15
ρ_{ac}	Densidad aparente compactada (Kg/m^3)	1669	1618	-
α	Absorción de agua (%)	1,56	3,48	-

Fuente: Elaboración propia.

iii. Cálculo de las proporciones de mezcla.

Paso 1. Asentamiento= 7,5 a 10 cm (valor adoptado de acuerdo a la trabajabilidad de laboratorio).

Paso 2. Tamaño máximo nominal del agregado= 19 mm.

Paso 3. Contenido de agua de mezclado (sin aire incluido) = 205 lt.

Cantidad aproximada de aires atrapado = 2 %

Paso 4. Resistencia promedio requerida de las ecuaciones (Tabla 13).

$f'_{cr} = f'_c + 8,5$ (resistencia especificada a la compresión $20 \leq f'_c \leq 35$).

$$f'_{cr} = 210 + 85$$

$$f'_{cr} = 295 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Relación agua cemento (A/C)} = 0,547$$

Paso 5. Contenido de cemento (C)= 375 kg.

Paso 6. Fracción del volumen de grava = 0.66

$$\text{Volumen de grava compactada en seco} = 0,66 \times 1618 = 1067,88 \text{ kg.}$$

Paso 8. Estimación del contenido de agregado fino.

$$\text{Volumen desplazado por el agua} = 205/1000 = 0.205 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen desplazado por el cemento} = 375/3150 = 0.119 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen desplazado por la grava} = 1068/2690 = 0.397 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen desplazado por el aire} = 2\% = 0.02 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen total desplazado} = 0.741 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen desplazado por la arena} = 1 - 0.741 = 0,259 \text{ m}^3$$

$$\text{Peso de la arena} = 0,278 \times 2520 = 650.20 \text{ kg.}$$

Paso 8. Ajuste de la humedad y absorción del agua para la mezcla de prueba de hormigón en laboratorio.

Los ajustes por humedad no se realizaron porque se trabajó con agregado previamente lavado y secado en horno, esto es debido a la corrección que se realizara a la mezcla, si nos da un asentamiento mayor o menor a lo propuesto en nuestra dosificación.

Tabla 37. Cantidad de los componentes de la dosificación para 1m³ de hormigón, cantera Caiza.

Material	Agregados secos Kg/m ³	Corrección por absorción del agua Kg/m ³	Proporción de la primera mezcla de prueba Kg/m ³
Cemento	375	375	375
Arena	650.20	650.20x1,56 = 10,14	650.20
Grava	1067.88	1068x3,48 = 37,17	1067.88
Agua	205	(10.14+37.17) = 47.31	252.31
Total	2297.85		2345.16

Fuente: Elaboración propia.

Paso 9. Elaboración de la primera prueba de laboratorio y ajuste de la cantidad de materiales para 10 probetas.

Dimensión de la probeta y volumen de hormigón.

Para la prueba inicial se especificó que se utilizara 10 probetas como ensayo de calibración de la dosificación.

Numero de probetas= 10

Diámetro (d)= 15 cm.

Altura (h)= 30 cm.

$$\text{Volumen (V)} = \frac{\pi}{4} \times 0,15^2 \times 0,30 = 0,0053 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen (V}_T) = 0,0053 \times 10 = 0,053 \text{ m}^3$$

Se considerará un 15% de pérdida de hormigón, entonces nuestro volumen a utilizar será:

$$\text{Volumen (V}_T) = 0,106 \times 15\% = 0,06 \text{ m}^3 = 60 \text{ lt.}$$

Tabla 38. Cantidad de los componentes para la primera prueba de mezclado cantera de Caiza.

Material	Agregados secos	Agregados secos para 60 lt de hormigón	Proporción de la mezcla para la primera mezcla de prueba.
	Kg/m ³	Kg	Kg
Cemento	375	375x0,06= 22.64	22.64
Arena	650.20	650.20x0,06 = 39.28	39.28
Grava	1067.88	1068x0,06= 64,08	64.51
Agua	252.31	252.13x0,06 = 15.14	15.24
Total	2345.16		141.66

Fuente: Elaboración propia.

Como la maquina mezcladora no tiene capacidad para producir los 60 litros de hormigón, teniendo una capacidad de trabajo eficiente para 40 litros, entonces se procedió a dividir en lotes de 30 litros de hormigón, a continuación, se detalla las cantidades de los lotes.

Tabla 39. Cantidad de los componentes para la primera prueba de mezcla por cada lote cantera de Caiza.

Material	Agregados secos	Agregados secos para 30 lt de hormigón	Proporción de la mezcla para la primera mezcla de prueba.
	Kg/m ³	Kg	Kg
Cemento	375	375x0,030 = 11.25	11.25
Arena	650.20	650.20x0,030 = 19.51	19.51
Grava	1067.88	1068x0,03 = 32.04	32.04
Agua	252.31	241,1x0,030 = 7.56	7.56
Total	2345.16		70.36

Fuente: Elaboración propia.

3.5.3.2 Diseño de mezcla para la cantera de Villa Montes.

iv. Especificaciones de diseño.

Tipo de construcción: Elaboración de probetas para laboratorio.

Exposición: normal.

Resistencia a la compresión: 210 kg/cm²

v. Característica de los materiales seleccionados.

Tabla 40. Característica de los materiales cantera de Villa Montes.

Asignación	Ensayo	Agregado fino	Agregado grueso	Cemento EL PUENTE
TMN	Tamaño máximo nominal (mm)	-	19	-
MF	Módulo de finura	2,65	-	-
ρ_N	Densidad neta (gr/cm ³)	2,65	2,69	3,15
ρ_{ac}	Densidad aparente compactada (Kg/m ³)	1740	1747	-
α	Absorción de agua (%)	1,8	1,13	-

Fuente: Elaboración propia.

vi. Cálculo de las proporciones de mezcla.

Paso 1. Asentamiento= 7,5 a 10 cm (valor adoptado de acuerdo a la trabajabilidad de laboratorio).

Paso 2. Tamaño máximo nominal del agregado= 19 mm.

Paso 3. Contenido de agua de mezclado (sin aire incluido) = 205 lt.

Cantidad aproximada de aires atrapado = 2 %

Paso 4. Resistencia promedio requerida de las ecuaciones (Tabla 13).

$$f'_{cr} = f'_c + 8,5 \text{ (resistencia especificada a la compresión } 20 \leq f'_c \leq 35).$$

$$f'_{cr} = 210 + 85$$

$$f'_{cr} = 295 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Relación agua cemento (A/C)} = 0,547$$

Paso 5. Contenido de cemento (C)= 375 kg.

Paso 6. Fracción del volumen de grava (tabla 15) = 0,635

$$\text{Volumen de grava compactada en seco} = 0,635 \times 1747 = 1109,35 \text{ kg.}$$

Paso 8. Estimación del contenido de agregado fino.

$$\text{Volumen desplazado por el agua} = 205/1000 = 0,205 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen desplazado por el cemento} = 375/3150 = 0,119 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen desplazado por la grava} = 1109,35/2690 = 0,412 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen desplazado por el aire} = 2\% = 0,02 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen total desplazado} = 0,756 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen desplazado por la arena} = 1 - 0,756 = 0,244 \text{ m}^3$$

$$\text{Peso de la arena} = 0,244 \times 2650 = 645,62 \text{ kg.}$$

Paso 8. Ajuste de la humedad y absorción del agua para la mezcla de prueba de hormigón en laboratorio.

Los ajustes por humedad no se realizaron porque se trabajó con agregado previamente secado en horno, esto es debido a la corrección que se realizara a la mezcla, si nos da un asentamiento mayor o menor a lo propuesto en nuestra dosificación.

Tabla 41. Cantidad de los componentes de la dosificación para 1m^3 de hormigón cantera de Villa Montes.

Material	Agregados secos Kg/m ³	Corrección por absorción del agua Kg/m ³	Proporción de la primera mezcla de prueba Kg/m ³
Cemento	375	375	375
Arena	645,62	$645,62 \times 1,80\% = 11,62$	645,62
Grava	1109,35	$1109,35 \times 1,13\% = 12,54$	1109,35
Agua	205	$(11,62 + 12,54) = 24,16$	229,16
Total	2334,75		2.358,89

Fuente: Elaboración propia.

Paso 9. Elaboración de la primera prueba de laboratorio y ajuste de la cantidad de materiales para 10 probetas.

Dimensión de la probeta y volumen de hormigón.

Para la prueba inicial se especificó que se utilizara 10 probetas como ensayo de calibración de la dosificación.

Numero de probetas= 10

Diámetro (d)= 15 cm.

Altura (h)= 30 cm.

$$\text{Volumen (V)} = \frac{\pi}{4} \times 0,15^2 \times 30 = 0,0053 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen (V}_T\text{)} = 0,0053 \times 10 = 0,053 \text{ m}^3$$

Se considerará un 15% de pérdida de hormigón, entonces nuestro volumen a utilizar será:

$$\text{Volumen (V}_T\text{)} = 0,053 \times 15\% = 0,060 \text{ m}^3 = 60 \text{ lt.}$$

Tabla 42. Cantidad de los componentes para la primera prueba de mezclado cantera de Villa Montes.

Material	Agregados secos	Agregados secos para 60 lt de hormigón	Proporción de la mezcla para la primera mezcla de prueba.
	Kg/m ³	Kg	Kg
Cemento	375	353x0,06= 22,64	22,64
Arena	645,62	711,49x0,06 = 39,00	39,00
Grava	1109,35	1106,17x0,06= 67,01	67,01
Agua	229,16	144,9x0,06 = 13,84	13,84
Total	2.358,89		142,49

Fuente: Elaboración propia.

Como la maquina mezcladora no tiene capacidad para producir los 60 litros de hormigón, teniendo una capacidad de trabajo eficiente para 40 litros, entonces se procedió a dividir en lotes de 30 litros de hormigón, a continuación, se detalla las cantidades de los lotes.

Tabla 43. Cantidad de los componentes para la primera prueba de mezcla para la cantera Villa Montes.

Material	Agregados secos	Agregados secos para 30 lt de hormigón	Proporción de la mezcla para la primera mezcla de prueba.
	Kg/m ³	Kg	Kg
Cemento	375	353x0,03= 11,25	11,25
Arena	645,62	711,49x0,03 = 19,37	19,37
Grava	1109,35	1106,17x0,03 = 33,28	33,28
Agua	229,16	144,9x0,03 = 6,87	6,87
Total	2.358,89		70,77

Fuente: Elaboración propia.

3.5.4 Análisis de las propiedades del hormigón fresco.

Como se mencionó en el apartado 3.2.1, aquí solo se analizará, si los parámetros propuestos para el diseño de mezcla de cada cantera cumplen con lo especificado, en caso de no cumplir se realizará la corrección al diseño de la mezcla.

En base a las dosificaciones iniciales determinadas en este numeral, se procederá a la fabricación de las mezclas de prueba, las mismas que deben seguir las recomendaciones necesarias para la elaboración de mezclas del hormigón ASTM C-192 “Practica para fabricar y curar probetas cilíndricas” que se encuentran descrito en el apartado 3.6.3. Se toma en cuenta la medida del parámetro de asentamiento ya que este valor nos proporciona información, sobre la mezcla como por ejemplo la trabajabilidad.

Es importante anotar, que para la fabricación de las probetas se debe tener en cuenta las recomendaciones sobre el control de las propiedades del hormigón fresco.

Como resumen de estas propiedades aplicadas a las mezclas de pruebas iniciales, para las 50 probetas cilíndricas de hormigón elaboradas en laboratorio, para las dos procedencias, podemos citar los siguientes resultados:

Tabla 44. Resumen de resultados mezclas de prueba cantera de Caiza.

Lote	f'_c	f'_{cr}	Relación (A/C)	Cemento	Arena	Grava	Agua	Asentamiento
	Kg/cm ²	Kg/cm ²		Kg	Kg	Kg	Kg	cm
1	210	295	0,547	10,60	21,02	32,04	7,23	7,8
2	210	295	0,547	10,60	21,02	32,04	7,23	8

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 45. Resumen de resultados mezclas de prueba cantera de Villa Montes.

Lote	f'_c	f'_{cr}	Relación (A/C)	Cemento	Arena	Grava	Agua	Asentamiento
	Kg/cm ²	Kg/cm ²		Kg	Kg	Kg	Kg	cm
1	210	295	0,547	11,25	19,37	33,28	6,87	8,2
2	210	295	0,547	11,25	19,37	33,28	6,87	8,5

Fuente: Elaboración propia.

3.5.5 Resultado de ensayos a compresión simple de las probetas realizadas con las mezclas de pruebas a los 28 días.

En cuanto a las probetas cilíndricas, el procedimiento a seguir para la determinación de la Resistencia a la Compresión, se indicará con mayor detenimiento en el apartado 3.6.4, donde se refiere a la Norma ASTM C 39 “Resistencia a la compresión de probetas cilíndricas de hormigón”.

Por lo pronto este numeral se limitará a exponer los valores de resistencia a la compresión a edades de 28 días, realizadas sobre las probetas cilíndricas de hormigón que fueron fabricadas en función de las mezclas de prueba.

A continuación, se expone un cuadro resumen de los resultados de los ensayos de Resistencia a la compresión sobre probetas cilíndricas de hormigón a las edades de 28 días

3.5.5.1 Resultado de los ensayos para la cantera de Caiza.

Tabla 46. Resultados de ensayos a la compresión para la mezcla de prueba cantera Caiza.

Muestra	Fecha de elaboración	Fecha de ensayo	Edad	Peso	Dimensiones		Resistencia a los 28 días
					Diámetro	Altura	
			Días	Kg	cm	Cm	MPa
1	13/08/2018	10/09/2018	28	12.89	15	30.50	15.97
2	13/08/2018	10/09/2018	28	12.86	15	30.50	16.67
3	13/08/2018	10/09/2018	28	12.87	15	30.50	16.81
4	13/08/2018	10/09/2018	28	12.91	15	30.50	15.28
5	13/08/2018	10/09/2018	28	12.90	15	30.50	15.56
6	13/08/2018	10/09/2018	28	12.89	15	30.50	15.83
7	13/08/2018	10/09/2018	28	12.88	15	30.50	16.39
8	13/08/2018	10/09/2018	28	12.86	15	30.50	15.14
9	13/08/2018	10/09/2018	28	12.89	15	30.50	17.36
10	13/08/2018	10/09/2018	28	12.87	15	30.50	17.36

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 47. Comparación de la resistencia a los 28 días obtenidos del ensayo a compresión f'_c , con la resistencia requerida de compresión f'_{cr} para la cantera de Caiza.

Muestra	Edad	Resistencia de diseño f'_c	Resistencia promedio requerida f'_{cr}	Resistencia a los 28 días	Porcentaje de resistencia	Observaciones
	Días	MPa	MPa	MPa	%	
1	28	21	29.5	15.97	76,06	Mezcla no aceptable
2	28	21	29.5	16.67	79,37	Mezcla no aceptable
3	28	21	29.5	16.81	80,03	Mezcla no aceptable
4	28	21	29.5	15.28	72,75	Mezcla no aceptable
5	28	21	29.5	15.56	74,08	Mezcla no aceptable
6	28	21	29.5	15.83	75,40	Mezcla no aceptable
7	28	21	29.5	16.39	78,04	Mezcla no aceptable
8	28	21	29.5	15.14	72,09	Mezcla no aceptable
9	28	21	29.5	17.36	82,67	Mezcla no aceptable
10	28	21	29.5	17.36	82,67	Mezcla no aceptable
Promedio:				16.24	77.32	Mezcla no aceptable

Fuente: Elaboración propia.

3.5.5.2 Resultado de los ensayos para la cantera de Villa Montes.

Tabla 48. Resultados de ensayos a la compresión para la mezcla de prueba cantera Villa Montes.

Muestra	Fecha de elaboración	Fecha de ensayo	Edad	Peso	Dimensiones		Resistencia a los 28 días MPa
			Días	Kg	Diámetro cm	Altura cm	
1	13/08/2018	10/09/2018	28	12.89	15	30,5	18.06
2	13/08/2018	10/09/2018	28	12.86	15	30,5	16.67
3	13/08/2018	10/09/2018	28	12.87	15	30,5	18.75
4	13/08/2018	10/09/2018	28	12.91	15	30,5	17.36
5	13/08/2018	10/09/2018	28	12.90	15	30,5	17.08
6	13/08/2018	10/09/2018	28	12.89	15	30,5	18.47
7	13/08/2018	10/09/2018	28	12.88	15	30,5	16.53
8	13/08/2018	10/09/2018	28	12.86	15	30,5	15.97
9	13/08/2018	10/09/2018	28	12.89	15	30,5	16.81
10	13/08/2018	10/09/2018	28	12.87	15	30,5	18.19

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 49. Comparación de la resistencia a los 28 días obtenidos del ensayo a compresión f'_c , con la resistencia requerida de compresión f'_{cr} para la cantera de Villa Montes.

Muestra	Edad	Resistencia de diseño f'_c	Resistencia promedio requerida f'_{cr}	Resistencia a los 28 días	Porcentaje de resistencia	Observaciones
	Días	MPa	MPa	MPa	%	
1	28	21	29.5	18.06	85.98	Mezcla no aceptable
2	28	21	29.5	16.67	79.37	Mezcla no aceptable
3	28	21	29.5	18.75	89.29	Mezcla no aceptable
4	28	21	29.5	17.36	82.67	Mezcla no aceptable
5	28	21	29.5	17.08	81.35	Mezcla no aceptable
6	28	21	29.5	18.47	87.96	Mezcla no aceptable
7	28	21	29.5	16.53	78.70	Mezcla no aceptable
8	28	21	29.5	15.97	76.06	Mezcla no aceptable
9	28	21	29.5	16.81	80.03	Mezcla no aceptable
10	28	21	29.5	18.19	86.64	Mezcla no aceptable
Promedio:				17.39	82.80	Mezcla no aceptable

Fuente: Elaboración propia.

3.5.6 Ajustes de los parámetros de diseño.

3.5.6.1 Contenido de agua.

En una mezcla de hormigón, la humedad de los granulados forma parte del agua para mezclado y hay que tomar en cuenta al determinar la cantidad de agua a agregar a una mezcla. Asimismo, un árido seco absorbe un poco del agua para mezclado.

En nuestro caso para la elaboración de las mezclas, los materiales pétreos entran en condiciones normales que fueron lavados y secados previamente a la dosificación, esto debido a que los materiales procedentes de las canteras contenían partículas finas dichas partículas nos obstaculizarían en la consistencia del hormigón, debido a que estos requirieran una mayor cantidad de agua de amasado.

Como se presentó en las tablas anteriores que los asentamientos obtenidos de cada dosificación de las canteras, corresponden a los rangos de los parámetros establecidos que dichos límites se encuentran establecidos para nuestro diseño de 7,5 cm a 10 cm.

Como los asentamientos del hormigón que se obtuvieron son adecuados, no se realizará un ajuste por la cantidad de agua, se mantendrá la cantidad de agua requerida.

3.5.6.2 Corrección de la resistencia.

3.5.6.2.1 Corrección de resistencia para la cantera de Caiza.

Como se puede observar las resistencias están muy por debajo de las resistencias de diseño para la cantera de Caiza se tiene un porcentaje de resistencia que va del 70% al 85% con una resistencia promedio como se especifica en el apartado 3.5.5.1 es de 16,24 MPa, dicha resistencia se encuentra muy por debajo de la resistencia de diseño f'_c , con un porcentaje de diferencia del 77.32%, esto se debe primordialmente al alto porcentaje de desgaste que presentan frente a la máquina de los ángeles con un valor de 42,62%, dicho valor nos indica que el agregado presenta una baja resistencia. Para la corrección de la mezcla respecto al ACI se debe incrementar la resistencia requerida de diseño f'_{cr} .

De acuerdo al apartado 3.5.2.1. tabla 31. al no contar con un número mayor de 15 muestra de deberá utilizar la siguiente ecuación propuesta en a la tabla 33.

$$f'_{cr} = 295 \text{ Kg/cm}^2$$

$$f'_{cr} = f'_c + 8,5 \text{ (resistencia especificada a la compresión } 20 \leq f'_c \leq 35).$$

$$f'_{cr} = 295 + 85$$

$$f'_{cr} = \mathbf{380 \text{ Kg/cm}^2}$$

3.5.6.2.2 Corrección de resistencia para la cantera de Villa Montes.

Los ensayos de la cantera de Villa Montes como se pueden observar su porcentaje de resistencia es del 55% al 65%, teniendo una resistencia promedio de 17.39 MPa, este valor se especifica en el apartado 3.5.5.2 dicha resistencia también se encuentra muy por debajo de la resistencia de diseño con un porcentaje de diferencia del 82.80%, en este caso también se puede observar las mismas carencia que se presenta la cantera de Villa Montes, para esto será necesario aumentar la resistencia requerida de diseño f'_{cr} .

De acuerdo al apartado 3.5.2.1. tabla 31. al no contar con un número mayor de 15 muestra de deberá utilizar la siguiente ecuación propuesta en a la tabla 33.

$$f'_{cr} = 295 \text{ Kg/cm}^2$$

$$f'_{cr} = f'_c + 8,5 \text{ (resistencia especificada a la compresión } 20 \leq f'_c \leq 35).$$

$$f'_{cr} = 295 + 85$$

$$f'_{cr} = \mathbf{380 \text{ Kg/cm}^2}$$

3.6 Probetas estándar.

3.6.1 Diseño de mezcla corregidas.

El diseño de la mezcla definitiva nos sirve para elaborar una buena cantidad de hormigón, que a la vez nos sirvan para obtener una suficiente producción de probetas. En cierto número se realizarán los ensayos de compresión hasta la rotura y en otros, se tomarán las medidas tanto de la carga aplicada, como de la deformación sufrida para efectos del cálculo del Módulo Estático de Elasticidad.

Esta recopilación de información servirá para determinar posteriormente el objetivo fundamental de esta investigación.

Para poder realizar las mezclas definitivas, se tomó muy en cuenta las dosificaciones de prueba y los resultados de las resistencias que se obtuvieron a los a los 28 días en dichas mezclas.

Luego de ensayar todas y cada una de las probetas cilíndricas de hormigón se puede resumir en los siguientes que la resistencia obtenida de las pruebas iniciales nos permita adoptar la mezcla idónea o ideal para las mezclas corregidas de las canteras mencionadas que nos garantice resistencias y economía.

3.6.1.1 Diseño de mezcla para la cantera de Caiza.

i. Especificaciones de diseño.

Tipo de construcción: Elaboración de probetas para laboratorio.

Exposición: normal.

Resistencia a la compresión: 210 kg/cm²

ii. Característica de los materiales seleccionados.

Tabla 50. Característica de los materiales cantera de Caiza.

Asignación	Ensayo	Agregado fino	Agregado grueso	Cemento EL PUENTE
TMN	Tamaño máximo nominal (mm)	-	19	-
MF	Módulo de finura	2,4	-	-
ρ_N	Densidad neta (gr/cm ³)	2,51	2,69	3,15
ρ_{ac}	Densidad aparente compactada (Kg/m ³)	1669	1618	-
α	Absorción de agua (%)	1,56	3,48	-

Fuente: Elaboración propia.

iii. Cálculo de las proporciones de mezcla.

Paso 1. Asentamiento= 7,5 a 10 cm (valor adoptado de acuerdo a la trabajabilidad de laboratorio).

Paso 2. Tamaño máximo nominal del agregado= 19 mm.

Paso 3. Contenido de agua de mezclado (sin aire incluido) = 205 lt.

Cantidad aproximada de aires atrapado = 2 %

Paso 4. Resistencia promedio requerida.

De acuerdo a las pruebas iniciales se pudo observar los resultados de los ensayos a compresión, para la cual se tiene una resistencia dicho valor se lo describe en el apartado 3.5.6.2.1:

$$f'_{cr} = 380 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Relación agua cemento (A/C)} = 0.44$$

Paso 5. Contenido de cemento (C)= 205/0.256 = 466 Kg.

Paso 6. Fracción del volumen de grava (tabla 36) = 0.66

Volumen de grava compactada en seco = $0.66 \times 1618 = 1067,99$ kg.

Paso 8. Estimación del contenido de agregado fino.

Volumen desplazado por el agua = $205/1000 = 0.205$ m³

Volumen desplazado por el cemento = $466/3150 = 0.148$ m³

Volumen desplazado por la grava = $1068/2690 = 0.397$ m³

Volumen desplazado por el aire = 2% = 0.02 m³

Volumen total desplazado = 0.77 m³

Volumen desplazado por la arena = $1 - 0,77 = 0,23$ m³

Peso de la arena = $0,23 \times 2520 = 579.60$ kg.

Paso 8. Ajuste de la humedad y absorción del agua para la mezcla de prueba de hormigón en laboratorio.

Los ajustes por humedad no se realizaron porque se trabajó con agregado previamente lavado y secado en horno, esto es debido a la corrección que se realizara a la mezcla, si nos da un asentamiento mayor o menor a lo propuesto en nuestra dosificación.

Tabla 51. Cantidad de los componentes de la dosificación corregido para 1m³ de hormigón, cantera Caiza.

Material	Agregados secos	Corrección por absorción del agua	Corrección por absorción del agua	Proporción de la primera mezcla de prueba Kg/m ³
	Kg/m ³	Kg/m ³	Kg/m ³	
Cemento	466	466		466
Arena	579.60	$579.60 \times 1,56 = 9.04$	$579.60 \times 1.2 = 6.96$	577.52
Grava	1067.88	$1068 \times 3,48 = 37.16$	$1,067.88 \times 3.48\% = 37.16$	1067.88
Agua	205	$(9.04 + 37,16) = 46.20$	$6.96 + 5.34 = 12.30$	170.93
Total	2300.89			2,282.33

Fuente: Elaboración propia.

3.6.1.2 Diseño de mezcla cantera Villa Montes.

i. Especificaciones de diseño.

Tipo de construcción: Elaboración de probetas para laboratorio.

Exposición: normal.

Resistencia a la compresión: 210 kg/cm²

ii. Característica de los materiales seleccionados.

Tabla 52. Característica de los materiales cantera de Villa Montes.

Asignación	Ensayo	Agregado fino	Agregado grueso	Cemento EL PUENTE
TMN	Tamaño máximo nominal (mm)	-	19	-
MF	Módulo de finura	2,65	-	-
ρ_N	Densidad neta (gr/cm ³)	2,65	2,69	3,15
ρ_{ac}	Densidad aparente compactada (Kg/m ³)	1740	1747	-
α	Absorción de agua (%)	1,8	1,13	-

Fuente: Elaboración propia.

iii. Cálculo de las proporciones de mezcla.

Paso 1. Asentamiento= 7,5 a 10 cm (valor adoptado de acuerdo a la trabajabilidad de laboratorio).

Paso 2. Tamaño máximo nominal del agregado= 19 mm.

Paso 3. Contenido de agua de mezclado (sin aire incluido) = 205 lt.

Cantidad aproximada de aires atrapado = 2 %

Paso 4. Resistencia promedio requerida.

De acuerdo a las pruebas iniciales se pudo observar los resultados de los ensayos a compresión, para la cual se tiene una resistencia dicho valor se lo describe en el apartado 3.5.6.2.2:

$$f'_{cr} = 380 \text{ kg/cm}^2$$

$$\text{Relación agua cemento (A/C)} = 0,44$$

Paso 5. Contenido de cemento (C)= 205/0,44 = 466 kg.

Paso 6. Fracción del volumen de grava (tabla 36) = 0,635

Volumen de grava compactada en seco = $0,635 \times 1747 = 1109,35$ kg.

Paso 8. Estimación del contenido de agregado fino.

Volumen desplazado por el agua = $205/1000 = 0,205$ m³

Volumen desplazado por el cemento = $466/3150 = 0,148$ m³

Volumen desplazado por la grava = $1109,35/2690 = 0,412$ m³

Volumen desplazado por el aire = 2% = 0,02 m³

Volumen total desplazado = 0,785 m³

Volumen desplazado por la arena = $1 - 0,785 = 0,215$ m³

Peso de la arena = $0,215 \times 2650 = 569,75$ Kg.

Paso 8. Ajuste de la humedad y absorción del agua para la mezcla de prueba de hormigón en laboratorio.

Los ajustes por humedad no se realizaron porque se trabajó con agregado previamente secado en horno, esto es debido a la corrección que se realizara a la mescla, si nos da un asentamiento mayor o menor a lo propuesto en nuestra dosificación.

Tabla 53. Cantidad de los componentes de la dosificación para 1m³ de hormigón corregido cantera de Villa Montes.

Material	Agregados secos Kg/m ³	Corrección por absorción del agua Kg/m ³	Proporción de la primera mezcla de prueba Kg/m ³
Cemento	466	466	466
Arena	569,75	$645,62 \times 1,80\% = 10,26$	645,62
Grava	1109,35	$1109,35 \times 1,13\% = 12,54$	1109,35
Agua	205	$(11,62 + 12,54) = 22,79$	227,79
Total	2350,10		2.372,89

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se detalla los pasos que se siguieron para realizar la dosificación de las probetas cilíndricas iniciales.

3.6.2 Programación de producción de probetas cilíndricas de hormigón.

Una vez que se ha realizado la corrección de la dosificación, se elaborarán las probetas finales dichas probetas son las que se utilizarán para la realización de la investigación.

Como se mencionó en el apartado 3.2.2 para las pruebas finales se utilizarán una cantidad de 50 probetas, 25 probetas para la cantera de Caiza y 25 probetas para la cantera de Villa Montes.

Tabla 54. Programa de producción de probetas para la cantera Caiza.

Lote	N.º de probetas	Fecha de elaboración	Ensayo
1	5	12/09/2018	Compresión simple
2	5	12/09/2018	Compresión simple
3	5	12/09/2018	Módulo de elasticidad
4	5	13/09/2018	Compresión simple
5	5	13/09/2018	Módulo de elasticidad

Fuente: Elaboración propia

Tabla 55. Programa de producción de probetas para la cantera Villa Montes.

Lote	N.º de probetas	Fecha de elaboración	Ensayo
1	5	14/09/2018	Compresión simple
2	5	14/09/2018	Compresión simple
3	5	14/09/2018	Módulo de elasticidad
4	5	14/09/2018	Compresión simple
5	5	14/09/2018	Módulo de elasticidad

Fuente: Elaboración propia

3.6.3 Elaboración de las probetas finales.

El procedimiento de elaboración de probetas se realiza de acuerdo a la norma ASTM C-192 “Práctica para fabricar y curar probetas cilíndricas de hormigón en el Laboratorio”.

La elaboración de probetas cilíndricas de hormigón comprendido en:

- i. Preparación y Mezcla de los materiales.
- ii. Comprobación de la consistencia del hormigón.
- iii. Elaboración de probetas de hormigón.
- iv. Curado de las probetas cilíndricas de hormigón.

3.6.3.1 Preparación y mezcla de los materiales.

Equipos y materiales

- Maquina mezcladora
- Balanza.
- Palas.
- Sacos.
- Agregado fino y grueso.
- Cemento.
- Agua Potable.

Procedimiento.

- a) Primeramente, se limpió, lavo y humedeció todos y cada uno de los instrumentos que van a estar en contacto con el hormigón o sus ingredientes.
- b) Se Pesó con la mayor exactitud y precisión las cantidades de cada uno de los componentes de la dosificación (agregado fino, agregado grueso, cemento y agua). Según lo establecido en la dosificación.
- c) Mezclamos primeramente la grava y el agua.
- d) Posteriormente se añadió el cemento y el agregado fino.
- e) Añadimos lo restante de agua y dejamos mezclar por un tiempo de aproximadamente dos minutos.

3.6.3.2 Comprobación de la consistencia del hormigón.

Equipos y materiales.

- Cono de Abrams.
- Varilla de Compactación.
- Cucharón.
- Flexómetro.
- Muestra de Hormigón.

Procedimiento.

- a) Tomamos una muestra de hormigón.
- b) Colocamos la muestra en el cono de Abrams en 3 capas de igual altura.
- c) Se Compacta cada capa con 25 golpes con la ayuda de una varilla.
- d) Levantamos el molde y medimos su descenso del hormigón.
- e) Comparamos si este asentamiento corresponde al indicado en los datos del diseño.

3.6.3.3 Elaboración de probetas de hormigón.

Equipos y materiales.

- Moldes Cilíndricos para Probetas de Hormigón de 15 x 30 cm.
- Varilla de Compactación.
- Bandejas Metálicas.
- Mazo de Goma.
- Varillero.
- Muestra de Hormigón.

Procedimiento.

- a) Tomamos una muestra de hormigón.
- b) Se lleno los moldes con la mezcla en tres capas.
- c) Compactamos la mezcla con 25 golpes con una varilla metálica y posteriormente se golpeará el cilindro con un mazo de goma de 10 a 15 veces, realizamos este proceso por cada capa para asegurar su compactación.
- d) Retiramos el exceso de la mezcla del cilindro y dejamos la muestra al mismo nivel del tope del cilindro, y aseguramos que la superficie quede completamente horizontal.

3.6.3.4 Curado de las probetas cilíndricas de hormigón.

Equipo.

- Piscina de Curado.
- Herramientas manuales (llaves para desmoldar).

Procedimiento.

- a) Desencoframos los cilindros una vez transcurrido las siguientes 24 horas.
- b) Etiquetamos las probetas.
- c) Trasladamos los cilindros a la piscina de curado con agua a una temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ y que cubrió totalmente las probetas.

3.6.4 Ensayo a la compresión de probetas cilíndricas de hormigón.

Para encontrar la resistencia a la compresión simple se procede a realizar los ensayos a la compresión simple para las diferentes edades, esto es a los 7, 14, 21 y 28 días, para así poder evaluar la curva “tiempo vs resistencia.

Para determinar la resistencia a la compresión de los especímenes de hormigón se realizó el procedimiento que se detalla a continuación:

- i. Dimensiones de las probetas cilíndricas de hormigón.
- ii. Ensayo de Compresión.

3.6.4.1 Dimensiones de las probetas cilíndricas de hormigón.

Equipos.

- Flexómetro.
- Libreta de apuntes.

Procedimientos.

- a) Retiramos el número de probetas destinadas al ensayo según la fecha requerida (28 días).
- b) Registramos el peso de cada uno de los cilindros.
- c) Medimos el diámetro de las probetas en la parte media del mismo.
- d) Medimos la altura de la probeta.

3.6.4.2 Ensayo de compresión.

Equipos.

- Máquina de ensayo.
- Especímenes.

Procedimiento.

- a) Ingresamos las probetas a la máquina de compresión. Centrar dichas muestras en las circunferencias concéntricas.
- b) Encender la máquina de compresión y aplicar carga a una velocidad constante de 0.25 MPa/s.
- c) Apagamos la maquina cuando el indicador de carga empieza a disminuir o cuando la probeta ha fallado.
- d) Registrar la carga de máxima obtenida.

3.6.5 Ensayos a compresión para determinar el esfuerzo vs la deformación (módulo de elasticidad).

Equipos y materiales:

- Máquina de ensayo.
- Compresómetro.
- Probetas cilíndricas de hormigón.

Procedimiento:

- a) Retiramos las probetas cilíndricas del tanque de curado 1 hora antes de su ensayo.
- b) Durante el ensayo las probetas de hormigón se mantuvieron a temperatura ambiente y húmeda tan constante cómo fue posible.
- c) Colocamos las probetas de hormigón en el compresómetro.
- d) Verificamos que el cilindro se encuentre centrado y nivelado.
- e) Colocamos el deformímetro para la medición de la deformación y ajustamos los ejes.
- f) Colocamos las probetas de hormigón en la máquina de ensayo y centramos.
- g) Aplicamos la primera carga y ajustamos los deformímetros sin registrar su deformación.
- h) Aplicamos la segunda carga y fuimos registrando su deformación.

CAPITULO IV

ANALISIS DE LOS RESULTADOS.

4.1 Ensayos a compresión simple de las muestras.

4.1.1 Ensayo de las muestras a los 7, 14 y 28 días.

Los resultados obtenidos de los ensayos a compresión para la resistencia especificada de $f'_c = 21$ MPa para 7, 14 y 28 días se presentan a continuación.

Tabla 56. Resultados de ensayos a la compresión a los 7 y 14 días cantera de Caiza.

Muestra	Fecha de elaboración	Fecha de ensayo	Edad	Peso	Dimensiones		Lectura de la resistencia	
					Diam.	Altura	MPa	%
			Días	Kg	cm	cm		
1	12/09/2018	19/09/2018	7	12.89	15	30.50	10.87	60.85
2	12/09/2018	19/09/2018	7	12.86	15	30.50	10.4	64.57
3	12/09/2018	17/09/2018	7	12.87	15	30.50	10.19	60.30
4	12/09/2018	26/09/2018	14	12.91	15	30.50	16.04	76.38
5	12/09/2018	26/09/2018	14	12.90	15	30.50	15.87	75.57

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 57. Resultados de ensayos a la compresión a los 28 días cantera Caiza.

Muestra	Fecha de elaboración	Fecha de ensayo	Edad	Peso	Dimensiones		Lectura de la resistencia	
					Diam.	Altura	MPa	%
			Días	Kg	cm	cm		
1	12/09/2018	10/10/2018	28	12.89	15	30.50	23.32	111.05
2	12/09/2018	10/10/2018	28	12.86	15	30.50	22.57	107.48
3	12/09/2018	10/10/2018	28	12.87	15	30.50	23.83	113.48
4	12/09/2018	10/10/2018	28	12.91	15	30.50	22.21	105.76
5	12/09/2018	10/10/2018	28	12.90	15	30.50	22.87	108.90
6	12/09/2018	10/10/2018	28	12.89	15	30.50	22.04	104.95
7	12/09/2018	10/10/2018	28	12.86	15	30.50	23.57	112.24
8	12/09/2018	10/10/2018	28	12.87	15	30.50	22.44	106.86
9	12/09/2018	10/10/2018	28	12.91	15	30.50	22.46	106.95
10	12/09/2018	10/10/2018	28	12.90	15	30.50	23.44	111.62

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 58. Resultados de ensayos a la compresión a los 7, 14 días cantera de Villa Montes.

Muestra	Fecha de elaboración	Fecha de ensayo	Edad	Peso	Dimensiones		Lectura de la resistencia	
			Días	Kg	Diam.	Altura	MPa	%
					cm	cm		
1	14/09/2018	21/09/2018	7	12.89	15	30.50	13.56	64.57
2	14/09/2018	21/09/2018	7	12.86	15	30.50	11.65	68.10
3	14/09/2018	21/09/2018	7	12.87	15	30.50	12.55	59.76
4	14/09/2018	28/09/2018	14	12.91	15	30.50	18.76	80.33
5	14/09/2018	28/09/2018	14	12.90	15	30.50	19.34	75.24

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 59. Resultados de ensayos a la compresión a los 28 días cantera Villa Montes.

Muestra	Fecha de elaboración	Fecha de ensayo	Edad	Peso	Dimensiones		Lectura de la resistencia	
			Días	Kg	Diam.	Altura	MPa	%
					cm	cm		
1	14/09/2018	12/10/2018	28	12.89	15	30.50	25.31	120.52
2	14/09/2018	12/10/2018	28	12.86	15	30.50	24.77	117.95
3	14/09/2018	12/10/2018	28	12.87	15	30.50	26.46	126.00
4	14/09/2018	12/10/2018	28	12.91	15	30.50	24.41	116.24
5	14/09/2018	12/10/2018	28	12.90	15	30.50	24.66	117.43
6	14/09/2018	12/10/2018	28	12.89	15	30.50	25.31	120.52
7	14/09/2018	12/10/2018	28	12.86	15	30.50	27.19	129.48
8	14/09/2018	12/10/2018	28	12.87	15	30.50	25.13	119.67
9	14/09/2018	12/10/2018	28	12.91	15	30.50	28.04	133.52
10	14/09/2018	12/10/2018	28	12.90	15	30.50	25.19	119.95

Fuente: Elaboración propia.

4.1.2 Análisis para el diseño $f'_c = 21$ MPa.

Con los resultados obtenidos de los ensayos de 8 probetas de hormigón (3 a los 7 días, 2 a los 14 días y 3 a los 28 días), se obtiene las siguientes resistencia promedio a la compresión para cada edad, así como los porcentajes de la resistencia de 21 MPa especificada de diseño.

Tabla 60. Resultado promedio de resistencia a la compresión simple en probetas cantera Caiza.

Edad	Resistencia	
	MPa	%
7 días	10.49	61.91
14 días	15.96	75.98
28 días	22.88	108.93

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 61. Resultado promedio de resistencia a la compresión simple en probetas cantera Villa Montes.

Edad	Resistencia	
	MPa	%
7 días	12.59	64.14
14 días	19.05	77.79
28 días	25.65	122.13

Fuente: Elaboración propia.

En las tablas presentes, se puede observar que la resistencia a los 28 días tanto de la cantera de Caiza como la cantera de Villa Montes son similares con una variación de +/- 2.77 MPa aproximadamente, ya que la primera cantera Caiza 22.88 MPa con un 108,93% de resistencia obtenida y la cantera Villa Montes 25.65 MPa con un 122.13% de resistencia promedio.

Se realizó una comparación de resultados en un solo grafico para ver el crecimiento de las resistencias por días.

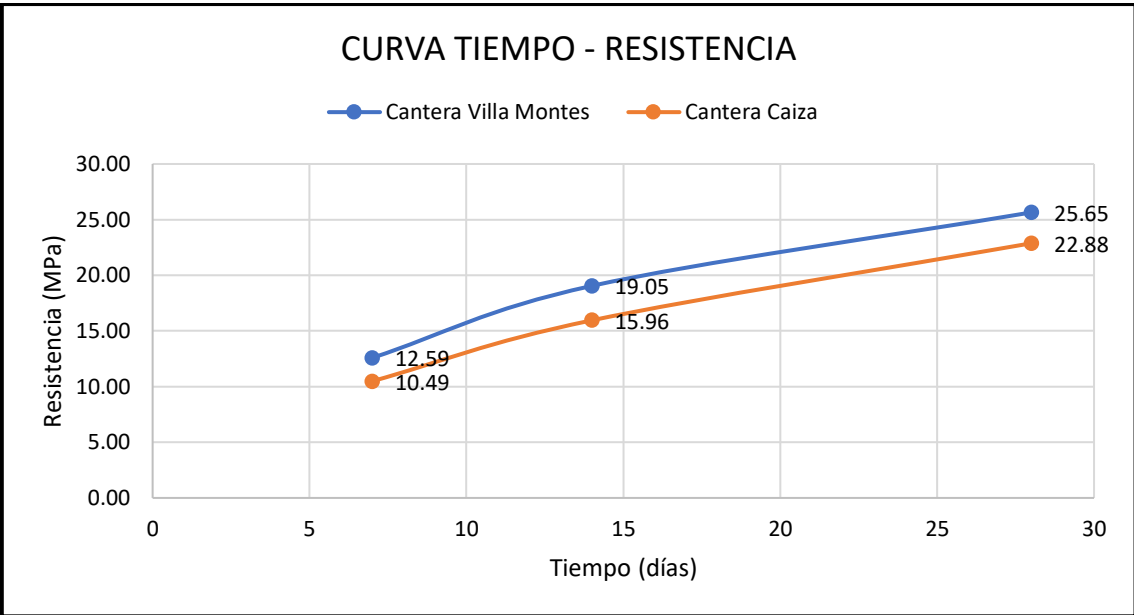


Figura 17. Curva tiempo vs resistencia de las canteras de Caiza y Villa Montes.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.3 Peso específico del hormigón.

A continuación, se muestra el valor obtenido del peso específico del hormigón.

4.1.3.1 Determinación del peso específico del hormigón para la cantera de Caiza.

Tabla 62. Determinación del peso específico del hormigón para la cantera de Caiza.

Muestra	Peso Kg	Dimensiones		Volumen m ³	Peso específico Kg/m ³
		Diam. cm	Altura cm		
1	12.89	15	30.5	0.00539	2392.77
2	12.86	15	30.5	0.00539	2387.20
3	12.87	15	30.5	0.00539	2389.06
4	12.91	15	30.5	0.00539	2396.48
5	12.9	15	30.5	0.00539	2394.63
6	12.89	15	30.5	0.00539	2392.77
7	12.86	15	30.5	0.00539	2387.20
8	12.87	15	30.5	0.00539	2389.06
9	12.91	15	30.5	0.00539	2396.48
10	12.9	15	30.5	0.00539	2394.63
11	12.89	15	30.5	0.00539	2392.77
12	12.86	15	30.5	0.00539	2387.20
13	12.87	15	30.5	0.00539	2389.06
14	12.91	15	30.5	0.00539	2396.48
15	12.9	15	30.5	0.00539	2394.63
16	12.89	15	30.5	0.00539	2392.77
17	12.86	15	30.5	0.00539	2387.20
18	12.87	15	30.5	0.00539	2389.06
19	12.91	15	30.5	0.00539	2396.48
20	12.9	15	30.5	0.00539	2394.63
21	12.89	15	30.5	0.00539	2392.77
22	12.88	15	30.5	0.00539	2390.91
23	12.86	15	30.5	0.00539	2387.20
24	12.89	15	30.5	0.00539	2392.77
25	12.87	15	30.5	0.00539	2389.06

Media aritmética	= 2391.73 kg/m ³
Desviación estándar	= 3,30 kg/m ³
Coefficiente de variación	= 0,14 %
Máximo	= 2396.48 kg/m ³
Mínimo	= 2387.20 kg/m ³
Rango	= 9.28 kg/m ³

Interpretación.

- Analizando el comportamiento del peso unitario de las muestras, se obtiene un valor en promedio de 2391.73 kg/m^3 , luego para la presente investigación se considerará el valor de **2450.00 kg/m^3** .
- La variabilidad o dispersión de las 25 muestras o conjunto de datos con respecto a la media aritmética calculada es de 3.30 kg/m^3 .
- El valor mínimo y máximo registrado del conjunto de datos estadísticos es de **2396.48 kg/m^3** y de **2387.20 kg/m^3** respectivamente.

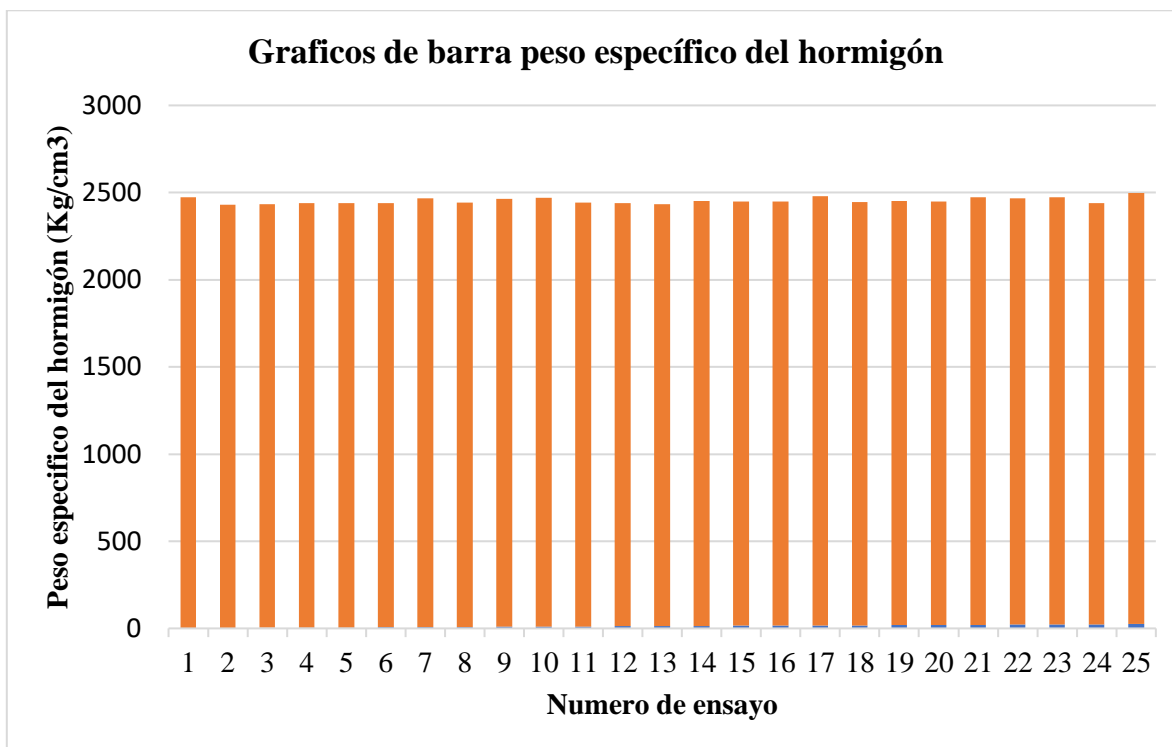


Figura 18. Gráficos de barra peso específico del hormigón.

Fuente: Elaboración propia.

4.1.3.2 Determinación del peso específico del hormigón para la cantera de Villa Montes.

Tabla 63. Determinación del peso específico del hormigón para la cantera de Villa Montes.

Muestra	Peso	Dimensiones		Volumen	Peso específico
		Diam.	Altura		
	Kg	cm	cm	m ³	Kg/m ³
1	12.89	15	30.5	0.00539	2392.77
2	12.86	15	30.5	0.00539	2387.20
3	12.87	15	30.5	0.00539	2389.06
4	12.91	15	30.5	0.00539	2396.48
5	12.9	15	30.5	0.00539	2394.63
6	12.89	15	30.5	0.00539	2392.77
7	12.86	15	30.5	0.00539	2387.20
8	12.87	15	30.5	0.00539	2389.06
9	12.91	15	30.5	0.00539	2396.48
10	12.98	15	30.5	0.00539	2409.48
11	12.89	15	30.5	0.00539	2392.77
12	12.86	15	30.5	0.00539	2387.20
13	12.87	15	30.5	0.00539	2389.06
14	12.91	15	30.5	0.00539	2396.48
15	12.9	15	30.5	0.00539	2394.63
16	12.89	15	30.5	0.00539	2392.77
17	12.86	15	30.5	0.00539	2387.20
18	12.88	15	30.5	0.00539	2390.91
19	12.91	15	30.5	0.00539	2396.48
20	13.05	15	30.5	0.00539	2422.47
21	12.89	15	30.5	0.00539	2392.77
22	12.88	15	30.5	0.00539	2390.91
23	12.86	15	30.5	0.00539	2387.20
24	12.89	15	30.5	0.00539	2392.77
25	12.87	15	30.5	0.00539	2389.06

Media aritmética	= 2393.51 kg/m ³
Desviación estándar	= 7.60 kg/m ³
Coefficiente de variación	= 0.32 %
Máximo	= 2422.47 kg/m ³
Mínimo	= 2387.20 kg/m ³
Rango	= 35.27 kg/m ³

Interpretación.

- Analizando el comportamiento del peso unitario de las muestras, se obtiene un valor en promedio de 2393.51 kg/m^3 , luego para la presente investigación se considerará el valor de **2450.00 kg/m^3** .
- La variabilidad o dispersión de las 25 muestras o conjunto de datos con respecto a la media aritmética calculada es de 7.60 kg/m^3 .

El valor mínimo y máximo registrado del conjunto de datos estadísticos es de **2422.47 kg/m^3** y de **2387.20 kg/m^3** respectivamente.

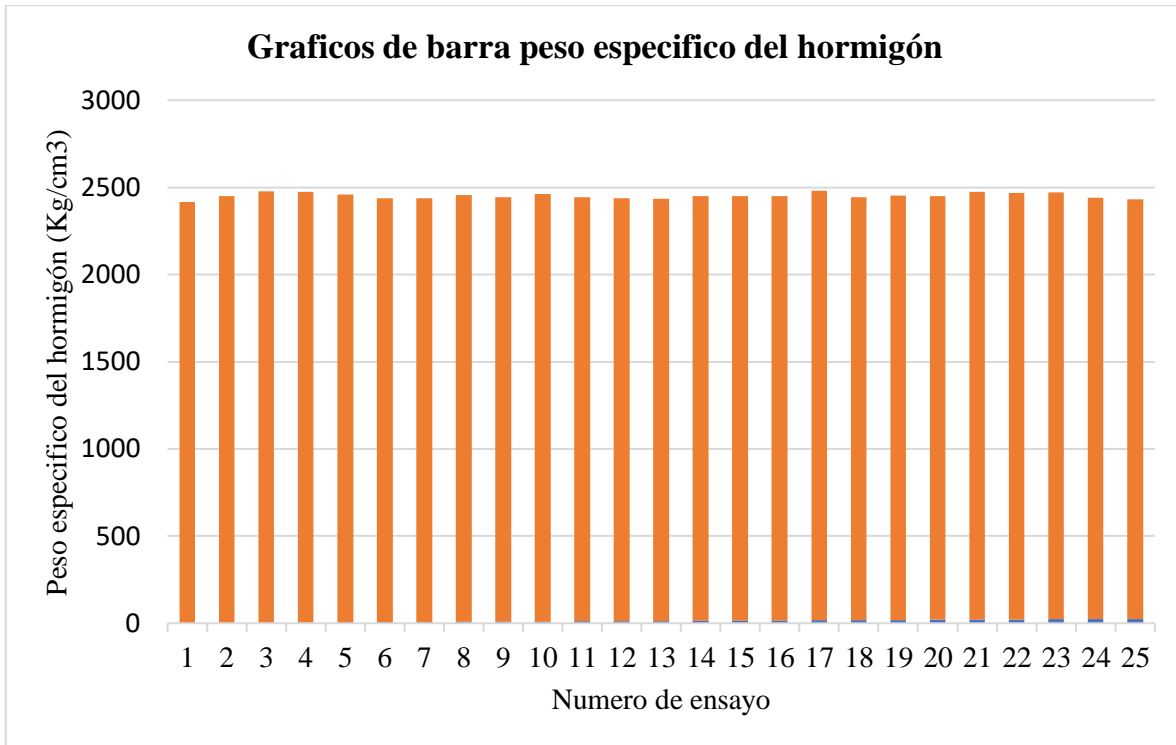


Figura 19. Gráficos de barra peso específico del hormigón.

Fuente: Elaboración propia.

4.2 Análisis de la resistencia característica con los resultados obtenidos.

Para poder definir una sola resistencia confiable a la compresión del hormigón para el diseño de mezcla de 21 MPa, usamos el concepto de resistencia característica del hormigón.

El problema radica en determinar una resistencia a la compresión que represente a todo el grupo de 10 probetas ensayadas por cada diseño de mezcla que se elaboró para el estudio del

módulo de elasticidad del hormigón. La media aritmética podría representar a los 10 ensayos realizados, pero este valor estadístico, no toma en cuenta la dispersión de valores de resistencia obtenidos, como ilustra Montoya, Meseguer & Moran (2011), “Si tenemos dos hormigones con la misma resistencia media, no cabe duda de que es más fiable aquel que presenta menor dispersión.”

Para evitar problemas, por no tomar en cuenta la dispersión de los valores de resistencia experimentales, obtenidos al ensayar a rotura las probetas en estudio de su módulo de elasticidad, se define y calcula las resistencias características recomendadas por un autor.

Entonces con los datos de resistencia máxima obtenidos de los ensayos para determinar el diagrama esfuerzo deformación a los 28 días calculamos la resistencia característica para el diseño de mezcla de 21 MPa, según Montoya-Meseguer-Moran.

4.2.1 Resistencia característica. Según Montoya, Meseguer & Mora (2011).

Se define como resistencia característica, f_{ck} , del hormigón aquel valor que presenta un grado de confianza del 95 por 100, es decir que existe una probabilidad de 0.95 de que se presenten valores individuales de resistencia de probetas más altos que f_{ck} , De acuerdo con esta definición y admitiendo la hipótesis de distribución estadística normal (Fig. 18), la resistencia característica viene definida por la expresión:

$$f_{ck} = f_{cm}(1 - 1,64 \delta)$$

$$f_{cm} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f_{ci}$$

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{f_{ci} - f_{cm}}{f_{cm}} \right)^2}$$

Donde:

f_{cm} = Resistencia característica media

δ = Coeficiente de variación de la población.

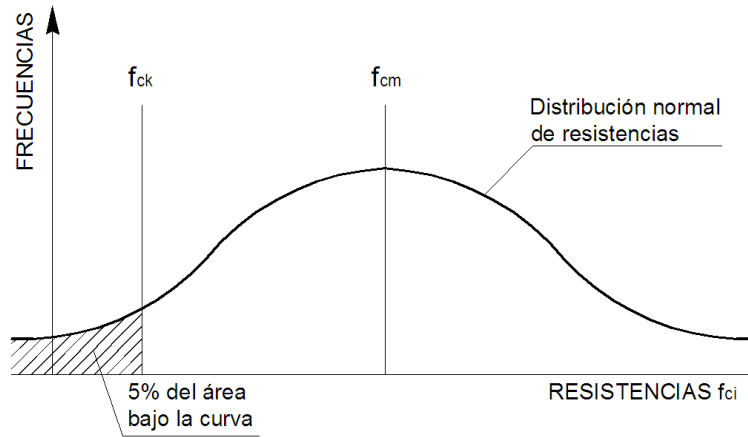


Figura 20. Definición de la resistencia característica.

Fuente: Montoya, Meseguer & Mora, 2011, p. 58.

Una vez definido la resistencia procedemos a calcular con los datos experimentales de la resistencia a compresión de los diseños de mezcla de las dos canteras.

Tabla 64. Cantera de Caiza resistencia máximas según Montoya.

Muestra	Resistencia MPa
1	23,32
2	22,57
3	23,83
4	22,21
5	22,87
6	22,04
7	23,57
8	22,44
9	22,46
10	23,44

Fuente: Elaboración propia.

Desviación estándar	$s = 0,624$ MPa
Resistencia media	$f_{cm} = 22,88$ MPa
Coefficiente de variación de resistencia	$\delta = 2,73$ %
Resistencia característica	$f_{ck} = 21,85$ MPa

Tabla 65. Cantera de Villa Montes resistencia máximas según Montoya.

Muestra	Resistencia MPa
1	25,31
2	24,77
3	26,46
4	24,41
5	24,66
6	25,31
7	27,19
8	25,13
9	28,04
10	25,19

Fuente: Elaboración propia.

Desviación estándar	$s = 1,19$ MPa
Resistencia media	$f_{cm} = 25,65$ MPa
Coefficiente de variación de resistencia	$\delta = 4,64$ %
Resistencia característica	$f_{ck} = 23,70$ MPa

4.3 Determinación teórico, experimental y procesamiento estadístico del módulo de elasticidad.

- Teórico
- Experimental
- Estadístico.

4.3.1 Método teórico.

Para el diseño de mezclas de 21 MPa, calculamos el módulo de elasticidad teórico del hormigón en base a la ecuación del A.C.I. y la Norma Boliviana del Hormigón Estructura (NBHE) y la Norma Boliviana CBH-87.

Primero se presenta el cálculo del módulo de elasticidad utilizando con f'_c cada una respecto a las resistencias máximas obtenidas de los ensayos de 20 probetas a los 28 días luego se calculó el módulo de elasticidad utilizando la resistencia característica ya calculada y su peso específico para ambas canteras.

El módulo de elasticidad según el comité ACI 318 y NBHE 8.5.1 menciona que puede usarse la expresión:

$$E = 0,14 \cdot \gamma^{1,5} \cdot \sqrt{f'_c} \text{ (Kg/cm}^2\text{)}$$

El módulo de elasticidad según la Norma Boliviana CBH-87 5.1.6 menciona que puede usarse la expresión:

$$E = 6000 \cdot \sqrt{f'_c} \text{ (MPa)}$$

4.3.1.1 Módulo de elasticidad teórico cantera Caiza.

Tabla 66. Módulo de elasticidad teórico respecto a la resistencia cantera Caiza.

Muestra	Resistencia a la compresión MPa	Peso específico	Módulo de elasticidad teórico MPa	
		Kg/m ³	ACI 318 y NBHE	CBH-87
1	23.32	2392.77	25,023.25	28,974.47
2	22.57	2387.20	24,531.66	28,504.74
3	23.83	2389.06	25,236.59	29,289.59
4	22.21	2396.48	24,477.27	28,276.49
5	22.87	2394.63	24,809.54	28,693.55
6	22.04	2392.77	24,326.82	28,168.07
7	23.57	2387.20	25,069.23	29,129.37
8	22.44	2389.06	24,489.51	28,422.53
9	22.46	2396.48	24,614.65	28,435.19
10	23.44	2394.63	25,116.81	29,048.92
Media aritmética	22.88	2,392.03	24,769.53	28,694.29

Fuente: Elaboración propia.

4.3.1.1.1 Módulo de elasticidad teórico según Montoya, Meseguer & Moran Cantera Caiza.

La resistencia calculada en el apartado 4.1.1. para la cantera Caiza para el diseño seleccionado según el autor fue de 21,86 MPa. Reemplazando este valor en las ecuaciones plantea por el A.C.I. – N.B.H.E. y la C.B.H.-87, se obtuvo teóricamente el siguiente módulo de elasticidad.

ACI 318 y Norma Boliviana del Hormigón Estructural.

$$E_c = 0.14 (2450^{1.5}) \cdot \sqrt{218.6}$$

$$E_c = 251,016.49 \text{ Kg/cm}^2$$

$$E_c = 25,101.65 \text{ MPa}$$

CBH – 87.

$$E = 6000 \sqrt{21.86}$$

$$E = 28,052.81 \text{ MPa}$$

4.3.1.1.2 Resultado del módulo de elasticidad teórico cantera Caiza.

Tabla 67. Módulo de elasticidad teórico respecto a las medias de la resistencia cantera Caiza.

Resistencia característica		Módulo de elasticidad teórico MPa	
Autor	MPa	ACI 318 y NBHE	CBH-87
Media aritmética	22.88	24,769.53	28,694.29
Montoya, Meseguer & Moran	21.86	25,101.65	28,052.81

Fuente: Elaboración propia.

4.3.1.2 Módulo de elasticidad teórico cantera Villa Montes.

Tabla 68. Módulo de elasticidad teórico respecto a la resistencia cantera Villa Montes.

Muestra	Resistencia a la compresión MPa	Peso específico	Módulo de elasticidad teórico MPa	
		Kg/cm ³	ACI 318 y NBHE	CBH-87
1	25,31	2,392.77	26,069.07	30,185.43
2	24,77	2,387.2	26.720.23	29,861.68
3	26,46	2,389.06	27,616.72	30,863.57
4	24,41	2,396.48	26,525.35	29,643.89
5	24,66	2,394.63	26,660.83	29,795.30
6	25,31	2,392.77	27,009.92	30,185.43
7	27,19	2,387.2	27,995.08	31,286.42
8	25,13	2,389.06	26,913.70	30,077.90
9	28,04	2,396.48	28,429.30	31,771.69
10	25,19	2,409.48	26,945.81	30,113.78
Media aritmética	25,65	2,393.51	26,069.07	30,185.43

Fuente: Elaboración propia.

4.3.1.2.1 Módulo de elasticidad teórico según Montoya, Meseguer & Moran Cantera Villa Montes.

La resistencia calculada en el apartado 4.2.1. para la cantera Villa Montes el diseño seleccionado según el autor fue de 23.70 MPa. reemplazando este valor en las ecuaciones plantea por el A.C.I. – N.B.H.E. y la C.B.H.-87, se obtuvo teóricamente el siguiente módulo de elasticidad.

ACI 318 y Norma Boliviana del Hormigón Estructural.

$$E_c = 0.14 \cdot 2450^{1.5} \sqrt{237.0}$$

$$E_c = 261,367.35 \text{ Kg/cm}^2$$

$$E_c = 26,136.74 \text{ MPa}$$

CBH – 87.

$$E = 6000 \sqrt{23.70}$$

$$E = 29,209.59 \text{ MPa}$$

4.3.1.2.2 Resultado del módulo de elasticidad teórico cantera Villa Montes.

Tabla 69. Módulo de elasticidad teórico respecto a las medias de la resistencia cantera Villa Montes.

Resistencia característica		Módulo de elasticidad teórico MPa	
Autor	MPa	ACI 318 y NBHE	CBH-87
Media aritmética	25.65	26,069.07	30,185.43
Montoya, Meseguer & Moran	23.70	26,136.74	29,209.59

Fuente: Elaboración propia.

4.3.2 Método experimental.

Al momento de realizar un diseño de edificaciones de concreto armado en base teórica a la resistencia ultima o momento último, solo se tenga en consideración los criterios de resistencia. Pero se debe asegurar que las condiciones estructurales de una edificación sean optima, es decir que no sucedan deflexiones excesivas, ni agrietamientos en los elementos estructurales que compondrán, falla frágil, falla diseño mal elaborado del concreto o sobredimensionamiento del acero.

Por esto es necesario verificar el adecuado comportamiento de los elementos hasta cierto límite, se usan los criterios de teoría elástica. Esta teoría se basa en el comportamiento elástico lineal de los materiales, los materiales se comportan elásticamente, además existe una relación lineal entre el esfuerzo y la deformación

4.3.2.1 Procesamiento de los resultados Esfuerzo vs Deformación.

Los resultados obtenidos del módulo de elasticidad del concreto experimental se determinaran de acuerdo a Montoya, Meseguer & Moran que menciona que el concepto de resistencia característica se refiere, a la resistencia a la compresión media sobre probetas cilíndricas 15cm x 30cm de 28 días de edad, fabricadas conservadas y rotas según métodos normalizados, pero puede hacerse extensivo a cualquier tipo de ensayo, clase de probeta, modo de conservación y edad de concreto, ya que se trata de una definición de tipo estadístico.

Teniendo el sustento teórico necesario se procedió a continuar los ensayos según Montoya-Meseguer-Moran y se extiende el concepto de resistencia característica, para calcular un módulo de elasticidad característica para la resistencia diseñada con la siguiente ecuación:

$$E_{ck} = E_{cm}(1 - 1.64 \delta)$$

$$E_{cm} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_{ci}$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_{ci} - E_{cm})^2}{n - 1}}$$

$$\delta = \frac{s}{E_{cm}}$$

Donde:

E_{ck} = Módulo de elasticidad característico.

δ = Coeficiente de variación de la población de módulos.

s = Desviación estándar.

Cuevas (2005) menciona que se tiene un grado de control de laboratorio, si se obtiene un coeficiente de variación entre 5-6%. De esta manera se puede usar el coeficiente de variación, como una medida de control en la fábrica de probetas de hormigón, y debido a que se encuentran en menor a estos porcentajes también se consideran de control de laboratorio.

4.3.2.2 Módulo de elasticidad experimentales para la cantera de Caiza y Villa Montes.

Tabla 70. Módulo de elasticidad experimental de la cantera de Caiza.

Muestra	Resistencia a la compresión MPa	Módulo de elasticidad ASTM C-469 MPa
1	23,32	15,715.37
2	22,57	15,489.60
3	23,83	15,792.46
4	22,21	15,456.54
5	22,87	15,613.98
6	22,04	15,375.83
7	23,57	15,677.49
8	22,44	15,522.90
9	22,46	15,557.11
10	23,44	15,673.34

Fuente: Elaboración propia.

Desviación estándar.

$s = 129.60$ MPa

Media aritmética

$E_{cm} = 15,587.46$ MPa

Módulo de elasticidad característico 15,374.92 MPa

Coefficiente de variación. $CV = 0.83 \%$

Tabla 71. Módulo de elasticidad experimental de la cantera de Villa Montes.

Muestra	Resistencia a la compresión MPa	Módulo de elasticidad experimental ASTM C-469 MPa
1	25,31	18,806.75
2	24,77	18,604.08
3	26,46	18,922.10
4	24,41	18,559.08
5	24,66	18,651.64
6	25,31	18,725.62
7	27,19	18,973.92
8	25,13	18,710.78
9	28,04	19,400.43
10	25,19	18,744.87

Fuente: Elaboración propia.

Desviación estándar. $s = 244.88 \text{ MPa}$

Media aritmética. $E_{cm} = 18.809.93 \text{ MPa}$

Módulo de elasticidad característico $E_{cm} = 18,408.32 \text{ MPa}$

Coefficiente de variación. $CV = 1.30 \%$

4.4 Determinación teórica del módulo de elasticidad según la propuesta ACI 318, NBHE (1225001) Y CBH - 87.

De los resultados obtenidos en los apartados 4.3.1.1.2 y 4.3.1.2.2 de las canteras de Caiza y Villa Montes, se procede a establecer el valor necesario teórico del módulo de elasticidad estático, según el ACI, NBHE y CBH-87, dicho valor adoptado es propuesto por Montoya, Meseguer & Moran debido a su sustento teórico que propone, para así también poder realizar una comparación entre el módulo de elasticidad experimental.

Tabla 72. Selección del módulo de elasticidad según Montoya, Meseguer & Moran cantera Caiza.

Resistencia característica		Módulo de elasticidad teórico MPa	
Criterios	MPa	ACI 318 y NBHE	CBH-87
Media aritmética	22.88	24,769.53	28,694.29
Montoya, Meseguer & Moran	21.86	25,101.65	28,052.81
Módulo de elasticidad teórico		25,101.65	28,052.81

Tabla 73. Selección del módulo de elasticidad según Montoya, Meseguer & Moran cantera Villa Monte.

Resistencia característica		Módulo de elasticidad teórico MPa	
Criterios	MPa	ACI 318 y NBHE	CBH-87
Media aritmética	25.65	26,069.07	30,185.43
Montoya, Meseguer & Moran	23.70	26,136.74	29,209.59
Módulo de elasticidad teórico		26,136.74	29,209.59

Fuente: Elaboración propia.

4.5 Comparación de los módulos de elasticidad experimental y teórico.

Una vez obtenidos los módulos de elasticidad del hormigón mediante los métodos teóricos y experimentales, se muestra a continuación un cuadro de comparación para cada una de las resistencias especificadas, con el fin de determinar la expresión que nos permita calcular el valor del módulo de elasticidad.

$$\% \text{ Relacion} = \frac{E_{ASTM\ C-469}}{E_{Teorico}}$$

Tabla 74. Comparación del módulo de elasticidad experimental media, con la resistencia característica media utilizando las Normas mencionadas cantera Caiza.

Resistencia característica	Módulo de elasticidad teórico			Relación ASTM C-469	
	ASTM C-469	ACI 318 y NBHE	CBH-87	ACI 318 y NBHE	CBH-87
MPa	MPa	MPa	MPa	%	%
21.86	15,374.92	25,101.65	28,052.81	61.25	54.81

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 75. Comparación del módulo de elasticidad experimental media, con la resistencia característica media utilizando las Normas mencionadas cantera Villa Montes.

Resistencia característica	Módulo de elasticidad teórico			Relación ASTM C-469	
	ASTM C-469	ACI 318 y NBHE	CBH-87	ACI 318 y NBHE	CBH-87
MPa	MPa	MPa	MPa	%	%
23.70	18,408.32	26,136.74	29,209.59	70.43	63.02

Fuente: Elaboración propia.

4.6 Determinación de la ecuación del módulo de elasticidad.

4.6.1 Función de regresión múltiple.

Realizando el análisis mediante el programa Statgraphics, donde se analizarán tres variables una variable dependiente siendo el módulo de elasticidad y dos variables independiente (peso específico y resistencia a la compresión).

El procedimiento Regresión Múltiple está diseñado para construir un modelo estadístico que describe el impacto de dos o más factores cuantitativos X en una variable dependiente Y. la presentación general del modelo es:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k$$

Donde k es el número de variables independientes.

4.6.2 Determinación de la ecuación matemática calibrada del módulo de elasticidad estático a compresión del hormigón para la Cantera de Caiza.

Tabla 76. Datos de las variables de análisis para la cantera Caiza.

Muestra	Resistencia a la compresión Kg/cm ²	Peso específico Kg/cm ³	Módulo de elasticidad Kg/cm ²
1	233,2	0.002393	151.868,40
2	225,7	0.002387	150.112,20
3	238,3	0.002389	153.554,30
4	222,1	0.002396	159.295,20
5	228,7	0.002395	151.810,60
6	220,4	0.002393	153.492,90
7	235,7	0.002387	152.746,80
8	224,4	0.002389	144.161,80
9	224,6	0.002396	148.172,70
10	234,4	0.002395	154.517,90

Fuente: Elaboración propia.

Variable dependiente: Modulo de elasticidad (Kg/cm²).

Variables independientes: Resistencia a la compresión (Kg/cm²) - Peso específico (Kg/cm³).

Parámetro	Estimación	Error	Estadístico	Valor-P
		Estándar	T	
CONSTANTE	-8926.65	87143.5	-0.102436	0.9213
Peso específico Kg/cm ³	4.89867E7	3.57443E7	1.37048	0.2129
Resistencia a la compresión Kg/cm ²	208.197	20.911	9.95633	0.0000

Análisis de Varianza.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	1.41522E7	2	7.07609E6	51.38	0.0001
Residuo	964129.	7	137733.		
Total (Corr.)	1.51163E7	9			

R-cuadrada = 93.6219 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 91.7996 por ciento

Error estándar del est. = 371.124

Error absoluto medio = 282.49

Estadístico Durbin-Watson = 2.01484 (P=0.5574)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0.167117.

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre Módulo de elasticidad y 2 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es:

Módulo de elasticidad (Kg/cm²) = -8,926.65 +4.8967E7xPeso Especifico (Kg/cm³) +208.197xResistencia a la Compresión (Kg/cm²)

Puesto que el valor-P es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 93.6219% de la variabilidad en Módulo de elasticidad Kg/cm². El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 91.7996%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 371.124. El error absoluto medio (MAE) de 282.49 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se presentan en el archivo de datos. Puesto que el valor-P es mayor que 0.05, no hay indicación de una autocorrelación serial en los residuos con un nivel de confianza del 95.0%.

Para determinar si el modelo puede simplificarse, note que el valor-P más alto de las variables independientes es 0.2129, que corresponde a Peso específico Kg/cm³. Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0.05, ese término no es estadísticamente significativo con un nivel de

confianza del 95.0% ó mayor. Consecuentemente, debería considerarse eliminar Peso específico Kg/cm³ del modelo.

- Ecuación calibrada para:

$$E_{c\ exp} = - 8,926.65 + 208.197 f_c + 48.967 \gamma_H \quad [Kg/cm^2]$$

Donde:

$E_{c\ exp}$ = Módulo de elasticidad experimental (Kg/cm²).

f_c = Resistencia a la compresion (Kg/cm²)

γ_H = Peso específico del hormigón (Kg/m³)

- Ecuación calibrada para:

$$E_{c\ exp} = -892.665 + 208.197 f_c + 4.897 \gamma_H \quad [MPa]$$

Donde:

$E_{c\ exp}$ = Módulo de elasticidad experimental (MPa).

f_c = Resistencia a la compresion (MPa)

γ_H = Peso específico del hormigón (Kg/m³)

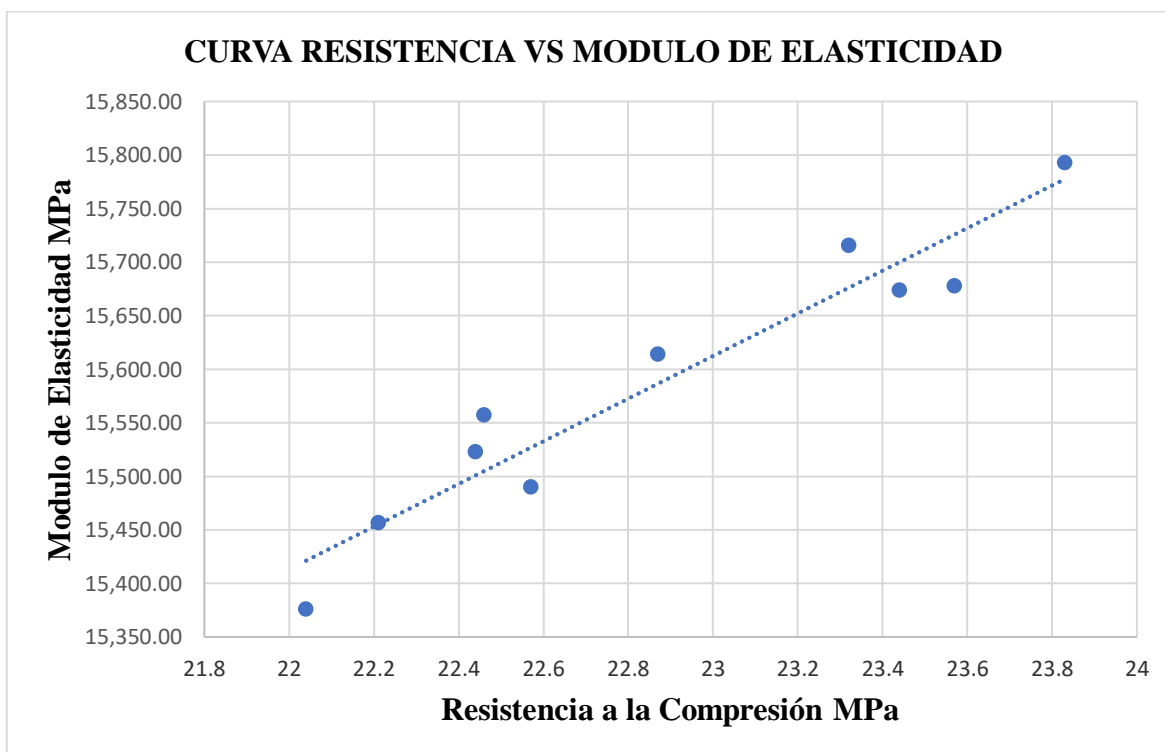


Figura 21. Gráfico Modulo de elasticidad vs Resistencia a la compresión cantera Caiza.

Fuente: Fuente propia

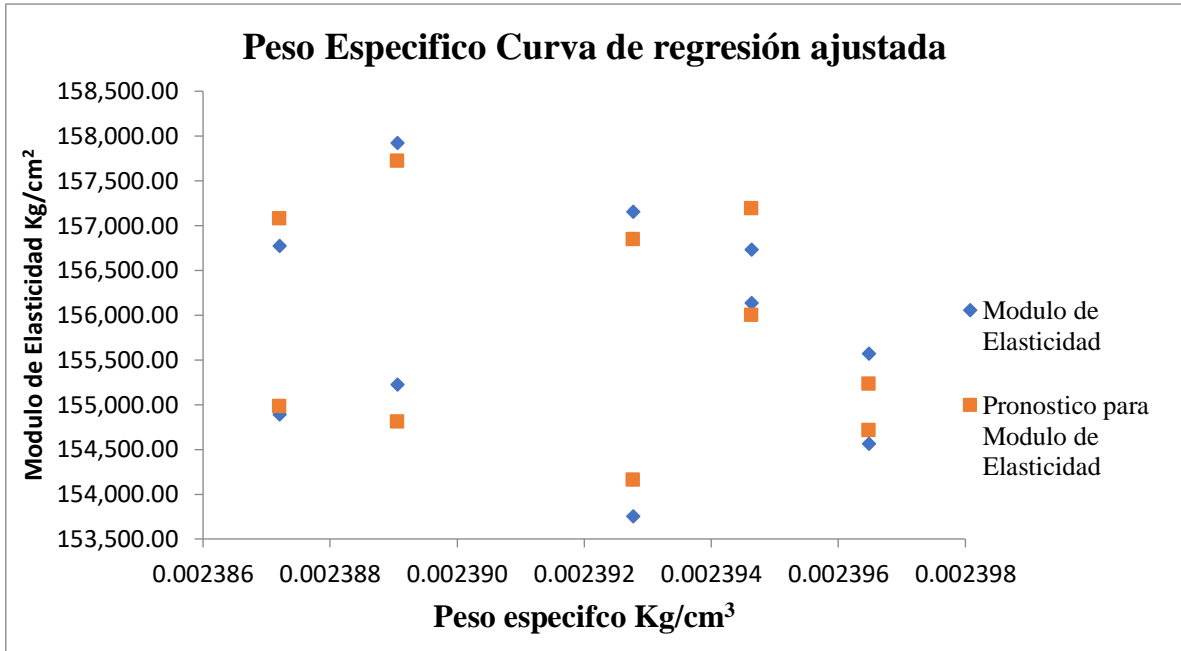


Figura 22. Gráfico de análisis 1 cantera de Caiza.

Fuente: Fuente propia

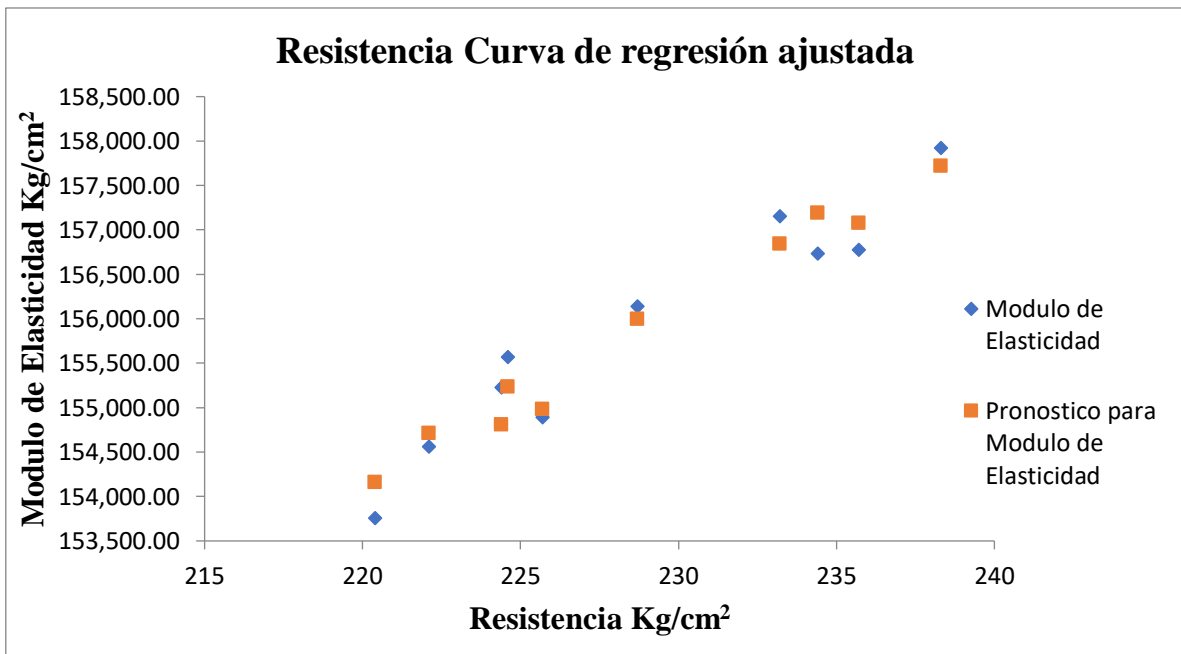


Figura 23. Gráfico de análisis 2 cantera de Caiza.

Fuente: Fuente propia

4.6.3 Determinación de la ecuación matemática calibrada del módulo de elasticidad estático a compresión del hormigón para la Cantera de Villa Montes.

Tabla 77. Datos de las variables de análisis para la cantera Villa Montes.

Muestra	Resistencia a la compresión Kg/cm ²	Peso específico Kg/cm ³	Módulo de elasticidad Kg/cm ²
1	253,10	0.002393	188,067.50
2	247,70	0.002387	186,040.80
3	264,60	0.002389	189,221.00
4	244,10	0.002396	185,590.80
5	246,60	0.002395	186,516.40
6	253,10	0.002393	187,256.20
7	271,90	0.002387	189,739.20
8	251,30	0.002389	187,107.80
9	280,40	0.002396	194,004.30
10	251,90	0.002409	187,448.70

Fuente: Elaboración propia.

Variable dependiente: Modulo de elasticidad (Kg/cm²).

Variables independientes: Resistencia a la compresión (Kg/cm²) - Peso específico (Kg/cm³).

Parámetro	Estimación	Error	Estadístico	Valor-P
		Estándar	T	
CONSTANTE	5249.45	85416.0	0.0614575	0.9527
Resistencia a la compresión Kg/c	202.044	19.287	10.4757	0.0000
Peso específico Kg/cm3	5.47471E7	3.53032E7	1.55077	0.1649

Análisis de Varianza.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	5.07344E7	2	2.53672E7	54.88	0.0001
Residuo	3.23589E6	7	462270.		
Total (Corr.)	5.39703E7	9			

R-cuadrada = 94.0043 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 92.2912 por ciento

Error estándar del est. = 679.905

Error absoluto medio = 456.064

Estadístico Durbin-Watson = 2.045 (P=0.4633)

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0.144282

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre Módulo de elasticidad Kg/cm^2 y 2 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

$$\text{Módulo de elasticidad (Kg/cm}^2\text{)} = 5,249.45 + 202.044 \times \text{Resistencia a la compresión (Kg/cm}^2\text{)} + 5.47471\text{E}7 \times \text{Peso específico (Kg/cm}^3\text{)}$$

Puesto que el valor-P es menor que 0.05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95.0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 94.0043% de la variabilidad en Módulo de elasticidad (Kg/cm^2). El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 92.2912%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 679.905. El error absoluto medio (MAE) de 456.064 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se presentan en el archivo de datos. Puesto que el valor-P es mayor que 0.05, no hay indicación de una autocorrelación serial en los residuos con un nivel de confianza del 95.0%.

Para determinar si el modelo puede simplificarse, note que el valor-P más alto de las variables independientes es 0.1649, que corresponde a Peso específico (Kg/cm^3). Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0.05, ese término no es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95.0% ó mayor. Consecuentemente, debería considerarse eliminar Peso específico (Kg/cm^3) del modelo.

- Ecuación calibrada para:

$$E_{c \text{ exp}} = 5,249.45 + 202.044 f_c + 54.747 \gamma_H \quad [\text{Kg/cm}^2]$$

Donde:

$E_{c \text{ exp}}$ = Módulo de elasticidad experimental (Kg/cm^2).

f_c = Resistencia a la compresion (Kg/cm^2)

γ_H = Peso específico del hormigón (Kg/m^3)

- Ecuación calibrada para:

$$E_{c \text{ exp}} = 524.945 + 202.197 f_c + 5.4747 \gamma_H \quad [\text{MPa}]$$

Donde:

$E_{c \text{ exp}}$ = Módulo de elasticidad experimental (MPa).

f_c = Resistencia a la compresion (MPa)

γ_H = Peso específico del hormigón (Kg/m^3).

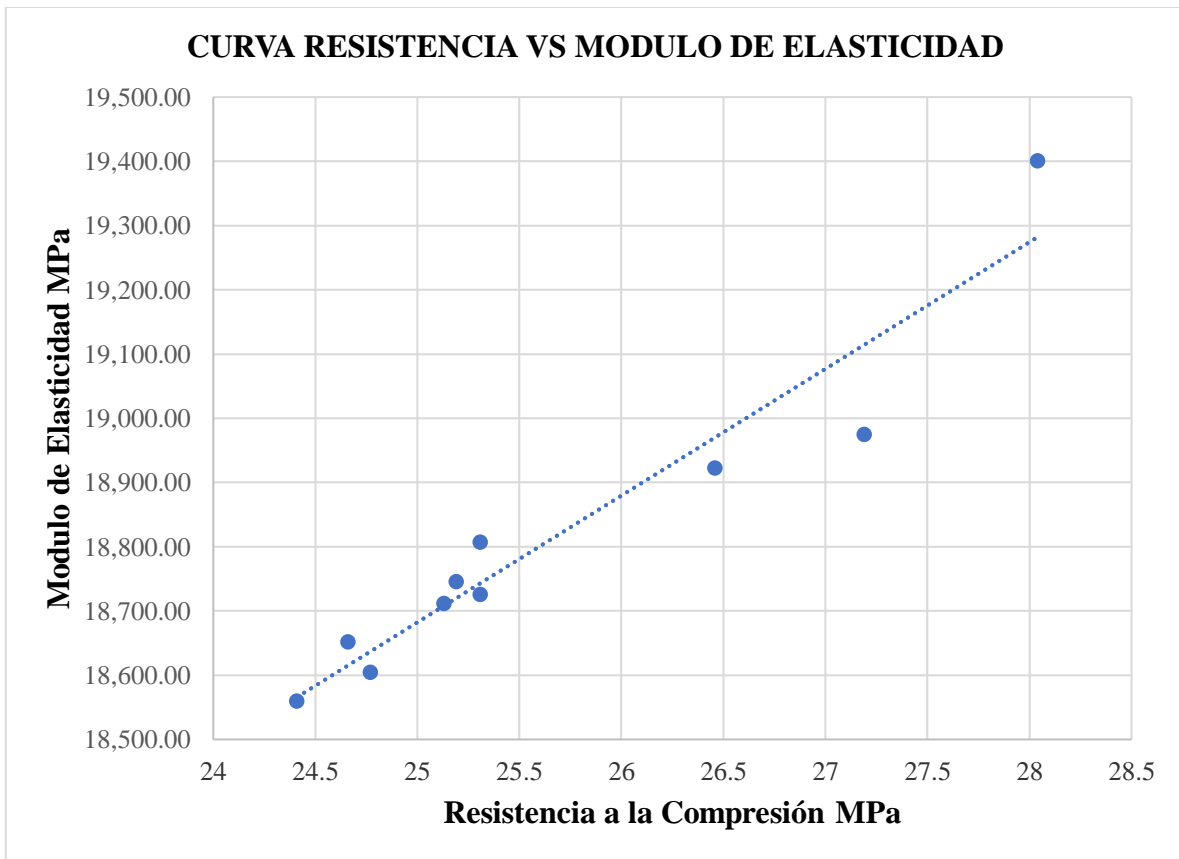


Figura 24. Gráfico Modulo de elasticidad vs Resistencia a la compresión cantera Villa Montes.

Fuente: Fuente propia

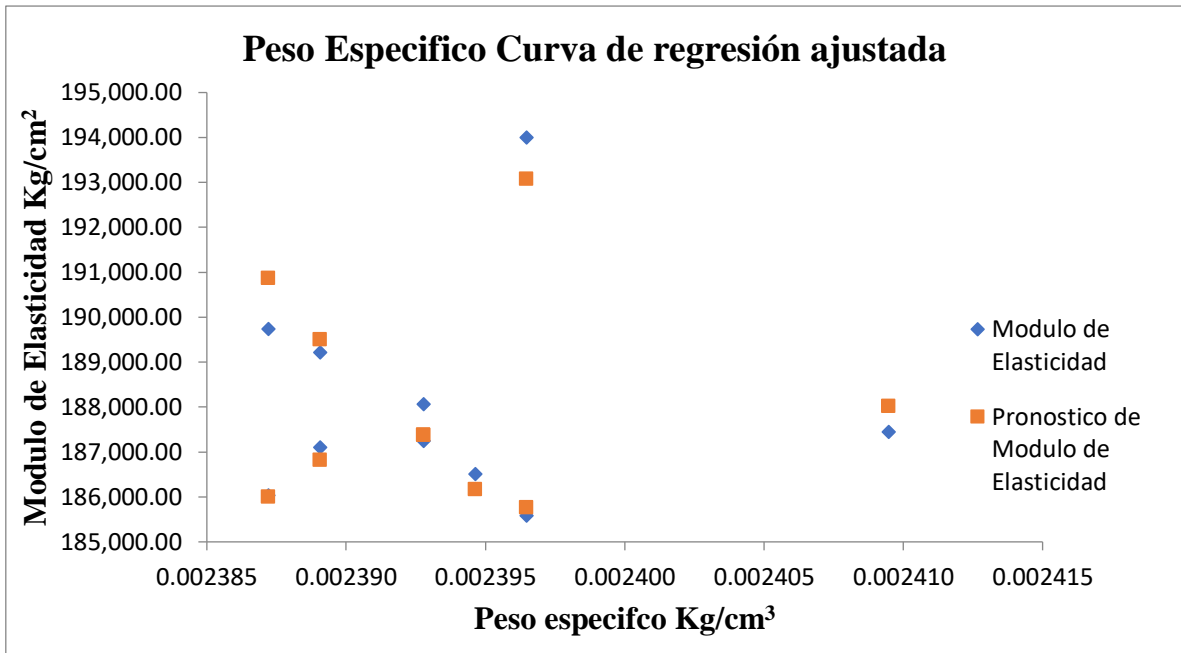


Figura 25. Gráfico de análisis 3 cantera de Villa Montes.

Fuente: Fuente propia

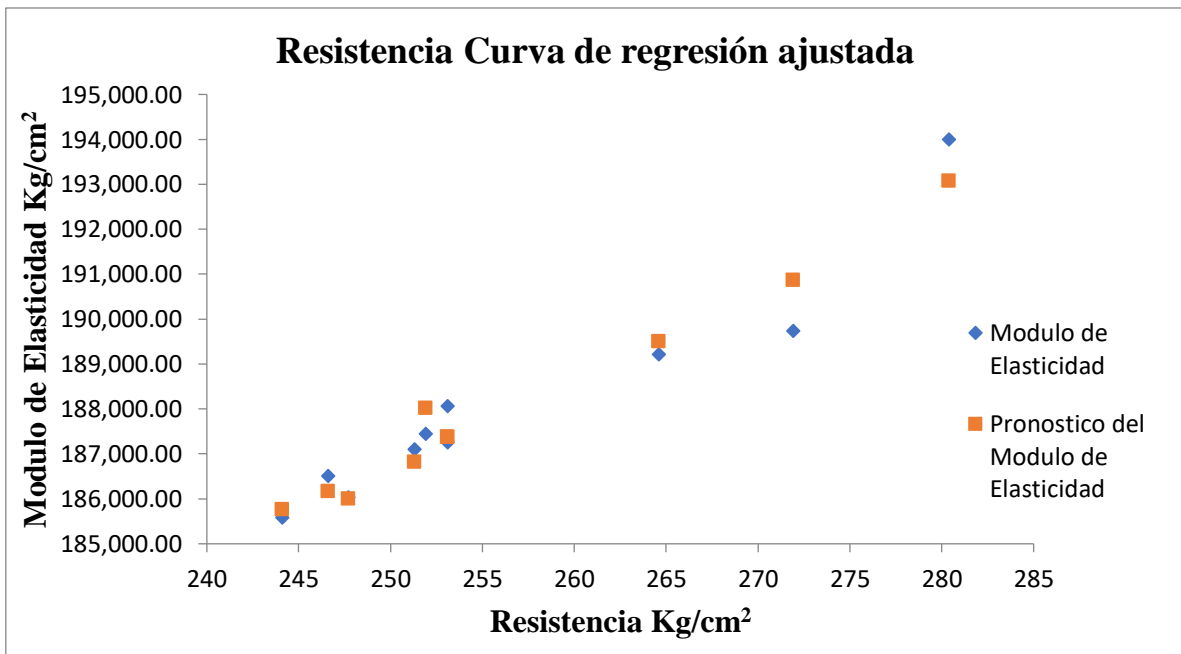


Figura 26. Gráfico de análisis 4 cantera de Villa Montes.

Fuente: Fuente propia

4.6.4 Comparaciones.

4.6.4.1 Comparación de la resistencia característica.

El cálculo de la resistencia característica es un valor representativo de una serie de resultado de ensayos a compresión simple y la cual se realizó una comparación de los resultados obtenido de ambas canteras.

Tabla 78. Resumen de resistencias características medias canteras Caiza y Villa Montes.

Criterios	Resistencia característica Caiza	Resistencia característica Villa Montes
	MPa	MPa
Resistencia media	22,88	25,65
Montoya, Meseguer & Moran	21,86	23,70

Fuente: Elaboración propia.

Al realizar la comparación de resistencia representativas de las 10 probetas ensayadas a compresión simple, calculadas bajo el criterio de Montoya, Meseguer & Moran, debido a que este autor tiene el mejor procesamiento estadístico de los resultados. Para la cantera Caiza se obtuvo una resistencia de 21,86 MPa y para la cantera Villa Montes una resistencia de 23,70 MPa viendo que la variación de resultados no es muy excesiva sino en un +/-1,84 MPa.

4.6.4.2 Comparación de módulos de elasticidad experimental.

Al realizar ensayo de compresión simple a 10 probetas de hormigón y así según la norma ASTM C-469, Se determinó el módulo de elasticidad, que en la cantera Caiza es de 15,374.92 MPa y la cantera Villa Montes es de 18,408.32 MPa estos 2 con el diseño a la compresión simple de 21 MPa realizado, teniendo un porcentaje de 61.25% y 70.43% respectivamente al comité ACI 318 y la Norma Boliviana del Hormigón Estructural y 54.81% y 63.02% respecto a la Norma CBH - 87.

En las siguientes figuras 27 y 28 se verá la diferencia que existe entre los resultados de acuerdo a la ASTM C-469 y los esperados respecto al ACI 318, NBHE 1225001 y CBH-87.

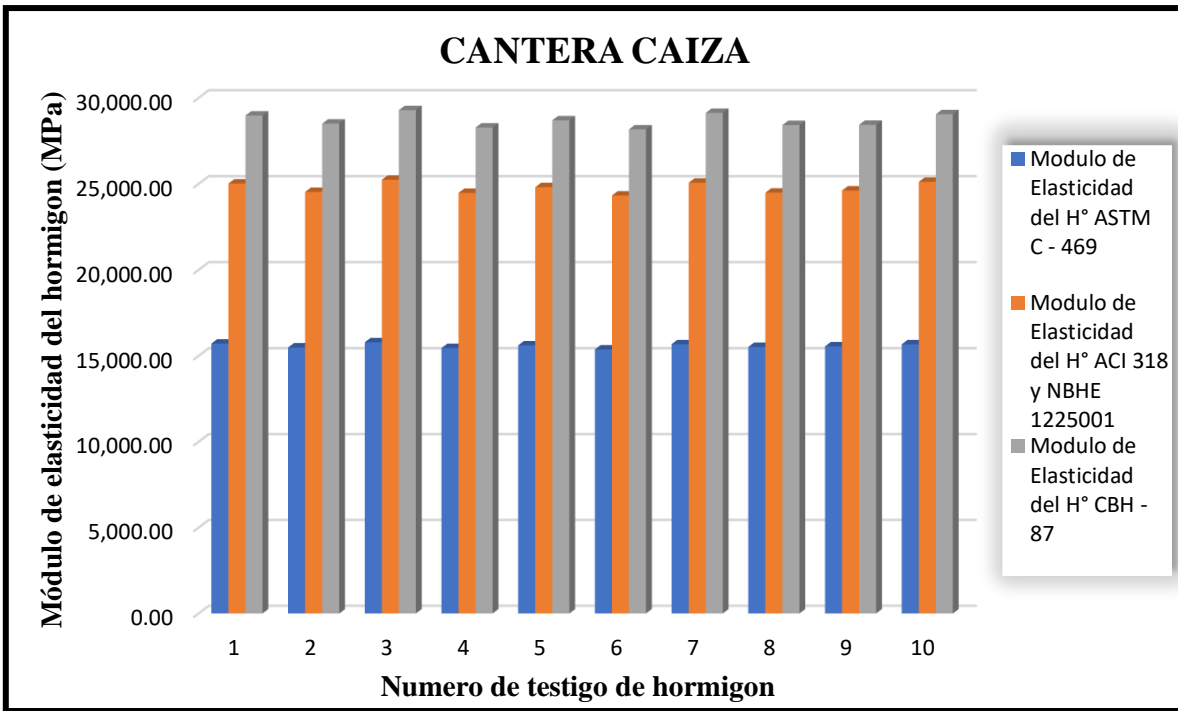


Figura 27. Comparación de resultados observados y resultados esperados de la cantera Caiza.

Fuente: Elaboración propia.

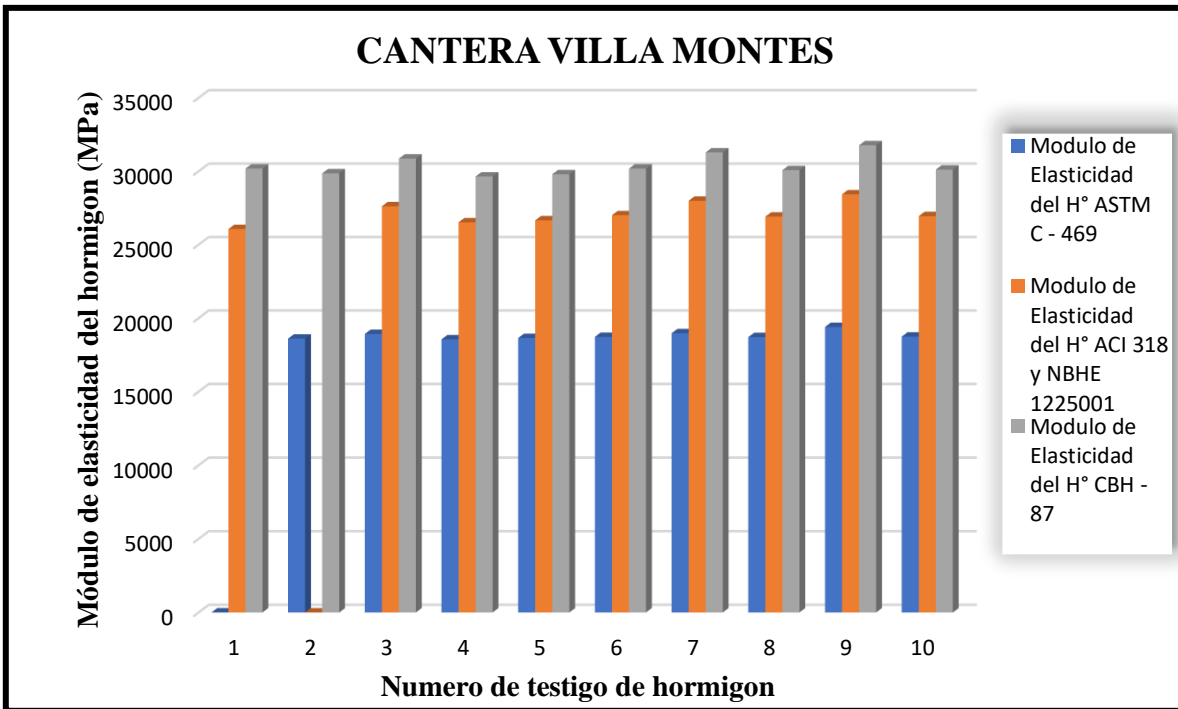


Figura 28. Comparación de resultados observados y resultados esperados de la cantera Villa Montes.

Fuente: Elaboración propia.

CAPITULO V.

CONCLUSION Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusión.

Al usar probetas cilíndricas de hormigón para determinar el valor módulo de elasticidad estático del hormigón **SI** se puede obtener una ecuación matemática calibrada, mediante un análisis de regresión múltiple al analizar una variable dependiente y dos variables independiente por lo tanto la hipótesis es aceptada.

El Módulo de Elasticidad estático del hormigón determinado con agregados de las canteras de Caiza, presentó una variación promedio del -38.75% respecto a la fórmula del ACI 318-05, 8.5.1, NBHE 1225001, 8.5.1 y -45.19% con respecto a la fórmula de la Norma CBH – 87, 5.1.6; para la canteras de Villa Montes se presentó una variación promedio del -29.57% respecto a la fórmula del ACI 318-05, 8.5.1, NBHE 1225001, 8.5.1 y -36.98% con respecto a la fórmula de la Norma CBH – 87, 5.1.6 por lo tanto existe una variación con las ecuaciones planteadas respecto a lo obtenido experimentalmente en laboratorio.

En base a los análisis efectuados se proponen las siguientes ecuaciones para la determinación del módulo de elasticidad estático del hormigón en base a su resistencia a la compresión de 21 MPa, producidos con agregados de las canteras de Caiza y Villa Montes.

Para la cantera Caiza es de:

$$E_{c \text{ exp}} = -8,926.65 + 208.197 f_c + 48.967 \gamma_H \quad [Kg/cm^2]$$

Donde:

$E_{c \text{ exp}}$ = Módulo de elasticidad experimental (Kg/cm²).

f_c = Resistencia a la compresion (Kg/cm²)

γ_H = Peso específico del hormigón (Kg/m³)

- Ecuación calibrada para:

$$E_{c \text{ exp}} = -892.665 + 208.197 f_c + 4.897 \gamma_H \quad [MPa]$$

Donde:

$E_{c \text{ exp}}$ = Módulo de elasticidad experimental (MPa).

f_c = Resistencia a la compresion (MPa)

γ_H = Peso específico del hormigón (Kg/m³)

Para la cantera Villa Montes es de:

$$E_{c \text{ exp}} = 5,249.45 + 202.044 f_c + 54.747 \gamma_H \quad [Kg/cm^2]$$

Donde:

$E_{c \text{ exp}}$ = Módulo de elasticidad experimental (Kg/cm²).

f_c = Resistencia a la compresion (Kg/cm²)

γ_H = Peso específico del hormigón (Kg/m³)

- Ecuación calibrada para:

$$E_{c \text{ exp}} = 524.945 + 202.197 f_c + 5.4747 \gamma_H \quad [MPa]$$

Donde:

$E_{c \text{ exp}}$ = Módulo de elasticidad experimental (MPa).

f_c = Resistencia a la compresion (MPa)

γ_H = Peso específico del hormigón (Kg/m³)

Con esta nueva propuesta de modificación de la fórmula del ACI 318-05, 8.5.1, la Norma Boliviana del Hormigón Estructural, 8.5.1 y el Código Boliviano del Hormigón 5.1.6 se demuestra que el valor del módulo de elasticidad del hormigón según Norma ASTM C-469 se sobreestiman las fórmulas teóricas.

Los agregados tanto de las canteras Caiza y Villa Montes respectivamente, que se utilizó en la elaboración de hormigón, son materiales provenientes de cauce de ríos siendo materiales aluviales y fluviales, generando así un depósito de material para la explotación de estas.

La granulometría de agregado grueso tanto para la cantera Caiza y Villa Montes respectivamente cumplen los usos mencionados en el marco teórico, cumpliendo la norma ASTM C-136.

La granulometría de agregado fino para la cantera Caiza y Villa Montes respectivamente cumplen con los requisitos encontrándose dentro de los límites propuestos es por estos que los valores del módulo de fineza son de 2,39 Caiza y 2,67 Villa Montes, el rango es de 2.3 a 3.1, como se indica en el capítulo II.

La densidad aparente suelto del agregado fino tanto para la cantera Caiza y Villa Montes respectivamente es de 1405 y 1602 Kg/m³, en la página 21 que indica que el rango es de 1200 a 1750 Kg/m³ entonces cumple con los valores obtenidos

La densidad aparente compactado del agregado fino tanto para la cantera Caiza y Villa Montes respectivamente es de 1660 y 1739,67 Kg/m³, en el capítulo II se indica que el rango es de 1500 a 1700 Kg/m³ cumpliendo con lo especificado la cantera de Caiza y no así la cantera de Villa Montes.

La densidad aparente suelto del agregado grueso tanto para la cantera Caiza y Villa Montes respectivamente es de 1497 y 1381,33 Kg/m³, que indica que el rango es de 1200 a 1750 Kg/m³ entonces cumple con los valores obtenidos.

La densidad aparente compactado del agregado grueso tanto para la cantera Caiza y Villa Monte respectivamente es de 1618,34 y 1747 Kg/m³. en el capítulo II se indica que el rango es de 1500 a 1900 Kg/m³ cumpliendo con lo especificado.

Los agregados provenientes tanto de la cantera Caiza y Villa Montes respectivamente proviene de la trituración de rocas naturales producto del cauce de los ríos y el tiempo de transporte, el porcentaje de perdida por desgaste en la máquina de los ángeles es de 42,60% Caiza y 14,96% Villa Montes. haciendo que la norma ASTM C – 131, se cumpla solo para la cantera de Villa Montes y no así para la cantera de Caiza.

La absorción tanto de los agregados fino y gruesos provenientes de la cantera Caiza y Villa Montes se encuentre dentro de 1.61% y 1.80% indicando que retiene poca agua, lo cual fue bueno debido a que se realizó una buena dosificación del hormigón.

Se concluye que en esta investigación se utilizó Cemento Portland IP-30 debido a que es el más comercializado y el peso específico obtenido fue de un valor de 3.15 gr/cm³.

Los diseños de mezcla realizados para la resistencia a la compresión simple de 21 MPa; alcanzaron la máxima resistencia y adecuada a los 28 días para ambas canteras Caiza y Villa Montes llegando inclusive a más del 100%, debido a que lo cementos adicionados como son el cemento Portland IP con adición de puzolana tienden a ganar su máxima resistencia a los 28 días.

La obtención de este valor bajo respecto a al ACI 318, debe principalmente al alto porcentaje de desgaste que representan las canteras además de que su procesamiento no es estandarizado y sobre todo no existe un control de calidad en la obtención de los áridos, contando con equipos adaptado al lugar hasta incluso improvisando. Cabe recordar que su composición mineralógica no es una roca de altas resistencia siendo de roca pizarra, esta roca es la

derivación de la roca sedimentaria, es por eso que es una laja que por el transporte fluvial llega a recorrer obteniendo forma de redondez asta incluso alargada no obstante también su porosidad afecta al módulo de elasticidad siendo este una principal característica de los agregados, que influye en la resistencia.

El control estadístico realizados a la resistencia del hormigón se detallan en el apartado 2.6, obteniendo un control en la excelente en la resistencia, como indica la tabla 5, teniendo una desviación estándar de 0,62 MPa y 1,19 MPa para la cantera de Caiza y Villa Montes, siendo estos valores inferiores a 1,5 MPa como se indica.

5.2 Recomendación.

Utilizar la ecuación planteada en esta investigación para el cálculo del módulo de elasticidad estático del hormigón cuando se utilicen agregados de las canteras Caiza y Villa Montes respectivamente ubicados a las cercanías de la Ciudad de Yacuiba y Villa Montes.

Al momento de la explotación de las Canteras Caiza y Villa Montes, se tenga en cuenta el Tamaño Máximo de los agregados, debido a que varían de acuerdo a la profundidad con que son extraídos y a veces contiene grumos de arcillas.

La toma del contenido de humedad de los agregados se deba ser tomar 24 horas antes de la fabricación de hormigones, ya que este valor influirá mucho al realizar una adecuada corrección por humedad en el diseño de mezclas.

Para el ensayo de rotura y deformación de las probetas cilíndricas de hormigón, se deberá realizar grupos de la misma dosificación para ser ensayadas, teniendo cuidado al instalar y nivelar el compresómetro sobre la probeta así mismo teniendo cuidado al centrar la probeta con el equipo instalado sobre la máquina de ensayo a compresión.

Esta investigación nos permite tener conocimiento del módulo de elasticidad del hormigón bajo condiciones de carga lenta, la misma puede emplearse como base para futuras investigaciones sobre el módulo de elasticidad dinámico del hormigón (cargas rápidas), con el fin de conocer el comportamiento real del hormigón bajo la acción de un sismo.

Se recomienda realizar estudios similares en otras canteras de la Ciudad de Yacuiba y Villa Montes para garantizar mejores diseños y evaluar las ecuaciones propuestas por la Norma ACI – 318, NBHE 1225001 y la Norma CBH - 87.