

1. CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 El Problema

1.1.1 Antecedentes

Los hormigones denominados tradicionales o de “Peso normal” son ejecutados con agregados de elevado peso específico, con la finalidad de obtener una mezcla cementicia tan compacta como sea posible. Estos hormigones se caracterizan por su elevado peso específico, su gran resistencia mecánica y por ser impermeables a los fluidos y relativamente buenos conductores del ruido y del calor. En términos generales, estas propiedades son tanto más acentuadas cuanto más denso y compacto es el hormigón.

La búsqueda de reducir el peso muerto de la estructuras, ha llevado a la ingeniería a desarrollar nuevas técnicas con el objetivo de alcanzar nuevos hormigones más livianos que cumplan las características de los hormigones convencionales. La disminución del peso de estos hormigones se produce por una presencia de vacíos en los áridos y/o mortero.

En términos generales los hormigones livianos se pueden considerar como el resultado de la tendencia generalizada de obtener un material de construcción que, con las características de los hormigones convencionales, reúna en grado apreciable cualidades de liviandad, capacidad aislante y economía.

1.1.2 Planteamiento

En las construcciones que involucran al hormigón como material resistente, el peso propio de la estructura representa una proporción importante en la carga total a considerar, por lo que la reducción del peso del hormigón (menor carga muerta) es un beneficio considerable. Esto conlleva a la reducción de tamaño de los distintos elementos estructurales, llegando a los cimientos y al suelo con menores cargas. Teniendo como consecuencia la disminución del costo de la edificación.

Además dicha reducción de peso resulta ser un factor ventajoso si consideramos su influencia directa en aspectos tales como transporte, montaje de elementos y estructuras.

El peso propio del hormigón se debe básicamente a:

- Peso del agregado fino

- Peso del agregado grueso
- Peso del cemento hidratado

El uso de Hormigones livianos es una solución para la disminución del peso. Estos hormigones son clasificados de la siguiente manera:

- Hormigones celulares
- Hormigones con agregados livianos
- Hormigones cavernosos o “sin finos”

1.1.3 Sistematización

Variables independientes

El hormigón es un material compuesto empleado en construcción formado principalmente por un aglomerante al que se agrega partículas o fragmentos de un agregado, agua y aditivos específicos.

Dependiendo del tamaño de las partículas, estas se pueden clasificar en: grava, gravilla y arena.

El peso del hormigón está influenciado directamente del peso de los áridos y del cemento hidratado, por lo tanto es imprescindible la descripción de dichos componentes.

Áridos

Los áridos empleados en la preparación de hormigones se obtienen a partir de mezclas de distintos tamaños de partículas, con el fin de conseguir una curva granulométrica óptima. Cuanto mayor sea el tamaño máximo del agregado, menores serán las necesidades de cemento y de agua.

Cemento hidratado

En general, se llaman conglomerantes hidráulicos aquellos productos que amasados con el agua fraguan y endurecen tanto expuestos al aire como al agua.

Para una cantidad de cemento dada existe una cantidad de agua del total de la agregada que se requiere para la hidratación del cemento; el resto del agua sólo sirve para aumentar la fluidez de la pasta para que cumpla la función de lubricante de los agregados y adquiera una trabajabilidad adecuada.

Alternativas solución

La clasificación general de hormigones livianos se presenta en el Figura N° 1. Esencialmente se basa en los tres procedimientos que, conducen a la elaboración de los distintos tipos de hormigones livianos, a saber:

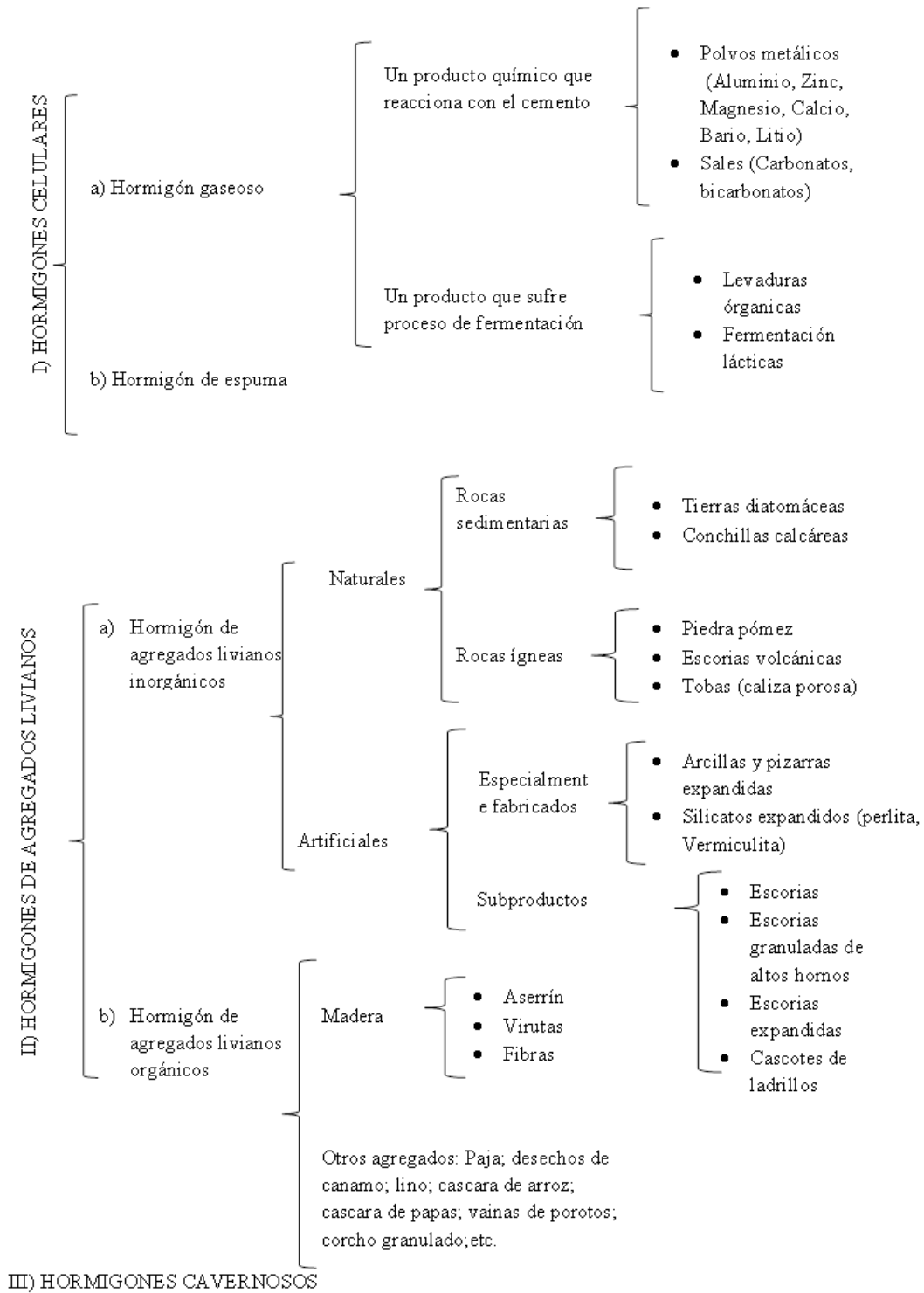
1. Formación de numerosas pequeñas celdas por incorporación de aire o gas en el seno de la masa de hormigón fresco y su mantenimiento hasta que aquél se endurezca (Hormigones Celulares).
2. Utilización de agregados livianos (Hormigones de Agregados Livianos).
3. Realización de grandes huecos por la disminución en grandes cantidades de los elementos finos del agregado, el cual tendrá una granulometría uniforme (Hormigones Cavernosos o “Sin Finos”).

Alternativa viable

La alternativa que se estudiará como solución al problema del elevado peso del hormigón será “Hormigón Cavernoso”.

FIGURA Nº1.

Clasificación de hormigones livianos



Fuente: Instituto del Cemento Portland Argentino

1.2 Objetivos

En el presente trabajo de investigación se proponen los siguientes objetivos:

1.2.1 General

El objetivo principal del trabajo es, estudiar el comportamiento físico-mecánico de los hormigones cavernosos, como ser el peso específico y la resistencia mecánica a compresión, a través de procedimientos experimentales que ayuden a elaborar este hormigón, su dosificación, y mezclado, utilizando dos tipos diferentes agregados gruesos provenientes de yacimientos regionales.

1.2.2 Específicos

Los objetivos específicos, que pretende lograr este trabajo de investigación:

- Caracterizar los agregados a utilizar, para así conocer mejor las propiedades de cada uno.
- Estudiar las características de los hormigones cavernosos, como ser sus propiedades, elaboración y sus componentes para tener como una base de estudio.
- Analizar el comportamiento mecánico del hormigón cavernoso en los diversos ensayos experimentales.
- Evaluar mediante la elaboración de curvas las variables: Peso específico y resistencia mecánica a compresión, relacionadas con la cantidad de agregado fino impuesta para cada probeta del ensayo.
- Realizar un análisis comparativo entre los resultados de los ensayos para los diferentes yacimientos.
- Hacer una interpretación y una validación del análisis al que fue sometido el hormigón.

1.3 Justificación

La justificación de la realización del trabajo de investigación es:

1.3.1 Teórica

La investigación propuesta busca, mediante la aplicación de la teoría, generar conocimientos sobre la alternativa adoptada para alivianar el hormigón con materiales regionales.

1.3.2 Metodológica

Para lograr el cumplimiento del trabajo de investigación, se emplearán ensayos de laboratorio de tipo:

- Ensayos en el hormigón fresco necesarios para la realización de una dosificación adecuada.
 - Granulometría.
 - Peso específico.
 - Peso unitario.
- Ensayo de compresión para hormigones endurecidos.

1.3.3 Práctica

Se dará a conocer una alternativa para aliviar el peso del hormigón, siendo esta, el uso de hormigones cavernosos.

Estos hormigones tienen aplicaciones no estructurales dentro de la construcción.

1.4 Tipo de investigación

El trabajo de investigación es de tipo experimental, donde se estudia un objeto, en el cual se crean las condiciones necesarias o adecua las existentes, para el esclarecimiento de las propiedades y relaciones del objeto, en este caso las propiedades físico -mecánicas como es el peso específico y la resistencia a compresión, para verificar una o más hipótesis, que son de utilidad en la investigación.

El experimento siempre está indisolublemente unido a la teoría y se experimenta para comprobar.

Se usó como método el hipotético deductivo a través del cual, primero se formulan hipótesis y después se arriba a conclusiones, que posteriormente se pueden comprobar experimentalmente.

1.5 Alcance del estudio

Será un trabajo de tipo experimental, donde por medio de pruebas de laboratorio se aceptará o rechazará la hipótesis planteada.

Para la elaboración de hormigones cavernosos se pretende partir de la dosificación de un hormigón convencional con resistencia característica de 210kg/cm^2 que contemple con

todas las características del hormigón estudiado. A dicha mezcla se le aplicará el concepto de hormigones cavernosos que es “La reducción de agregado fino” en ciertos porcentajes partiendo de 20%, 40%, 60%, 80%, para analizar el comportamiento de un hormigón con reducción de finos, y se pretende reducir hasta el 90%, 95% de agregado fino para verificar la existencia de hormigones cavernosos y sobre esto comprobar las demás hipótesis.

Así mismo se realizará una comparación de costos con el hormigón patrón.

1.5.1 Planteamiento de hipótesis

Las hipótesis planteadas en el trabajo de investigación son:

- La reducción de agregado fino crea un hormigón más liviano llamado hormigón cavernoso.
- La disminución de agregado fino en ciertos porcentajes (90%,95%) en la dosificación del hormigón, hace que el hormigón disminuya su peso en un rango comprendido entre el 13% al 30% comparado con el hormigón convencional.
- La resistencia a la compresión en hormigones cavernosos estará comprendida entre 15 kg/cm^2 y 140 kg/cm^2 .

1.5.2 Restricciones del estudio

El alcance del presente trabajo de investigación está delimitado al análisis de las características físico-mecánicas del hormigón cavernoso, principalmente el peso específico y la resistencia a la compresión que alcanzan los hormigones cavernosos, de modo que concluidos los ensayos se elaborarán curvas con las variables estudiadas, como ser:

- Porcentaje de agregado fino vs. Peso específico.
- Porcentaje de agregado fino vs. Resistencia a la compresión.
- Peso específico vs. Resistencia.

Los hormigones a ser ensayados estarán dosificados con la norma ACI 211 y en base a parámetros que se describen en bibliografías anteriores, utilizando materiales existentes en nuestro medio.

2. CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Definición de hormigón

El hormigón, es un material artificial, creado de materiales: Agregado grueso, agregado fino y cemento, de gran resistencia a la compresión, pero muy poca a la tensión.

Es un material muy durable, resistente al fuego y a la intemperie; muy versátil, y puede adoptar cualquier forma, dependiendo del recipiente que lo contenga. Posee una resistencia a la compresión, con valores típicos en el país entre 210 y 350 kg/cm². Sin embargo, se producen actualmente hormigones denominados de “Alta resistencia” con valores de resistencia hasta de 1200 kg/cm².

Los hormigones suelen catalogarse según su peso, resistencia mecánica, tipo de elaboración, según su tipo ya sea en masa o armado, también existen los hormigones especiales que son: hormigones livianos, hormigones con fibras, hormigones con polímeros.

Dentro de los hormigones livianos como clasificación general se encuentran los hormigones celulares, hormigones de agregados livianos y los hormigones cavernosos.

2.2 Clasificación por peso

El peso unitario del hormigón normal, es decir, el hormigón con agregados de áridos naturales, varía aproximadamente entre 2250 y 2450 kg/m³ y puede generalmente suponerse igual a 2300 kg/m³. Los hormigones livianos y los hormigón pesados se han venido utilizando cada vez con mayor frecuencia para propósitos especiales.¹

Hay tres tipos de hormigones livianos: Hormigones de baja densidad que se emplean principalmente para aislamiento y cuyo peso unitario raramente excede 800 kg/m³, hormigones de resistencia moderada cuyos pesos unitarios varían entre aproximadamente 960 a 1360 kg/m³ y cuyas resistencias a la compresión están entre 70 y 180 kg/cm² y se utilizan principalmente como relleno, por ejemplo sobre láminas de acero de bajo calibre para entrepisos; y los hormigones estructurales con pesos unitarios entre 1440 y 1920 kg/m³ y con resistencias a la compresión similares a las adquiridas para los hormigones normales.

¹ ARTHUR H. NILSON, “Diseño de estructuras de concreto”, 12^{ma} edición.

Los hormigones pesados se requieren en algunos casos para protección contra rayos Gamma y X en reactores nucleares e instalaciones similares, para estructuras de protección y propósitos especiales tales como contrapesos en puentes colgantes. Para estos hormigones se utilizan agregados pesados que consisten en minerales pesados de hierro o rocas de sulfato de bario (baritas) trituradas en tamaños adecuados. Asimismo se utilizan aceros en forma de fragmentos, pedregones (a manera de finos). Los pesos unitarios para los hormigones pesados con agregados naturales de roca pesada varían aproximadamente entre 3200 y 3690 kg/m³, se agregan fragmentos de hierro a los minerales de alta densidad pueden alcanzarse pesos hasta de 4330 kg/m³. El peso puede llegar hasta 5300 kg/m³ si se utilizan únicamente minerales de hierro para los finos y aceros para los agregados gruesos.

2.3 Hormigones livianos ²

Los hormigones livianos son hormigones de densidades menores a las de los hormigones normales hechos con áridos comunes. La disminución de la densidad de estos hormigones se produce por una presencia de vacíos en el árido, en el mortero o entre las partículas de árido grueso. Esta presencia de vacíos ocasiona la disminución de la resistencia del hormigón, por lo que muchas veces la resistencia no es la condición predominante para estos hormigones, y en otros casos se compensa.

Según su método de producción los hormigones livianos suelen clasificarse de la siguiente manera:

- *Hormigón Aireado, celular, espumoso o gaseoso:* Se introducen vacíos dentro del hormigón que se distinguen de los huecos producidos por el arrastre de aire.
- *Hormigón de Árido Liviano:* Uso de áridos livianos porosos de baja gravedad específica aparente.
- *Hormigón sin finos:* Se omite el árido de finos, por lo que gran número de vacíos intersticiales están presentes, los áridos gruesos son de peso específico normal.

² INSTITUTO DEL CEMENTO PORTLAND ARGENTINA.

2.4 Hormigones cavernosos ³

2.4.1 Consideraciones generales

Los hormigones cavernosos llamados también “Sin finos” o de textura abierta son mezclas constituidas por agregados gruesos o medianos y cemento portland destinado a aglomerarlos.

Contienen en la mezcla un volumen de agregado fino menor a 10% del volumen del agregado grueso.

Estos hormigones se diferencian esencialmente de los normales en la granulometría de los agregados utilizados, obteniéndose la disminución de peso específico por la formación de grandes huecos en su masa como consecuencia de la reducción del agregado fino.

Esto es posible por el hecho de que el aglomerante tiene como única función envolver los granos de agregado grueso y vincularlos entre sí. El lugar ocupado en el hormigón ordinario por el agregado fino es reemplazado en los hormigones cavernosos, por huecos llenos de aire.

2.4.2 Elementos constituyentes

El hormigón es un material compuesto formado esencialmente por un aglomerante al que se añade agregados y agua.

El aglomerante es en la mayoría de las ocasiones cemento (generalmente cemento Portland) mezclado con una proporción adecuada de agua para que se produzca una reacción de hidratación.

Los agregados, que se clasifican en agregado grueso (grava) y agregado fino (arena).

2.4.2.1 Cemento

Definición

Los cementos Portland son cementos hidráulicos compuestos principalmente de silicatos hidráulicos de calcio. Los cementos hidráulicos se fraguan y se endurecen por la reacción química con el agua. Durante la reacción, llamada hidratación, el cemento se combina con el agua para formar una masa, llamada pasta.

³ INSTITUTO DEL CEMENTO PORTLAND ARGENTINA.

Cuando se adiciona la pasta a los agregados (arena y grava, piedra triturada, pedrejón u otro material granular), la pasta actúa como un adhesivo y une los agregados para formar el hormigón.

En hormigones cavernosos existe la posibilidad de reducir la cantidad de cemento, teniendo en cuenta que la superficie total de los agregados contenidos en un volumen dado de hormigón cavernoso es muy inferior a la de un hormigón que contenga agregados finos. Por lo tanto, la considerable cantidad de cemento necesaria para recubrir estos últimos, se podría eliminar.

Todo exceso de cemento no hará más que reducir el volumen de los huecos formados en el seno del hormigón cavernoso.

En cuanto a la cantidad de cemento queda dicha que será la indispensable para recubrir y adherir las diversas partículas.

Componentes del cemento ⁴

Existen diferentes componentes del cemento de manera que dosificadas en distintas proporciones dan origen a los distintos tipos de cemento, como ser:

a) Clínteres Portland

Son productos que se obtienen al calcinar hasta la fusión parcial mezclas preparadas artificialmente, de calizas y arcillas, hasta conseguir la combinación prácticamente total de sus componentes.

b) Clínteres aluminosos

Son productos que se alcanzan por fusión de una mezcla de calizas y bauxitas de composición y granulometría adecuadas para conseguir un contenido mínimo de aluminio.

c) Escoria siderúrgicas

Son granulados de horno alto, que se obtienen por templado o enfriado brusco, con agua o con aire, de la ganga fundida procedente de procesos siderúrgicos. Deben poseer carácter básico e hidraulicidad latente o potencial, así como un contenido mínimo de fase vítrea.

⁴ JIMENEZ MONTOYA Pedro, “Hormigón Armado”, 14^{va} edición.

d) Puzolanas naturales

Son principalmente rocas tobáceas, volcánicas vítreas, de naturaleza tranquítica alcalina o pumítica. Finalmente divididas no poseen ninguna propiedad hidráulica, pero contiene constituyentes (sílice y alumina) capaces de fijar cal a la temperatura ambiente en presencia de agua, formando compuestos de propiedades hidráulicas.

e) Cenizas volantes

Son los residuos sólidos que se recogen por precipitaciones electrostáticas o por captación mecánicas, de los polvos que acompañan a los gases de la combustión de los quemadores de centrales termoeléctricas alimentadas con carbones pulverizados.

f) Humo sílice

Es un subproducto de la obtención del silicio y del ferrosilicio. Se reduce en horno eléctrico cuarzo muy puro y carbón, recogándose del humo generado, mediante filtro electrostático, partículas de muy pequeño diámetro formadas, principalmente, por sílice muy reactiva.

g) Filleres calizos

Son compuestos principalmente de carbonato cálcico en forma de calcita (superior al 85%) que molidos conjuntamente con el clínker portland, en proporciones determinadas, afectan favorablemente a las propiedades y comportamiento de los morteros y hormigones, tanto frescos como endurecidos. Su acción principal es de carácter físico: Dispersión, hidratación, trabajabilidad, retención de agua, capilaridad, permeabilidad, retracción, fisuración.

h) Reguladores de fraguado

Son materiales naturales o productos artificiales que añadidos a los clínkeres portland y a otros constituyentes del cemento, en pequeñas proporciones, y molidos conjuntamente, proporcionan cementos con un fraguado adecuado. El regulador de fraguado más usual es el sulfato cálcico en alguna de sus variedades o en mezcla de ellas.

i) Aditivos de los cementos

Son productos que pueden emplearse en la fabricación del cemento, para facilitar el proceso de moliendo o bien para aportar al cemento o a sus derivados algún

comportamiento específico (incluidores de aire). La dosificación de los aditivos debe ser inferior al 1% en masa.

La composición química del cemento es mostrada en la Tabla N° 2.1:

TABLA N° 2.1
Composición química del cemento

Componente	Nomenclatura	Porcentaje [%]
Cal combinada	CaO	62.50
Sílice	SiO ₂	21.00
Alumina	Al ₂ O ₃	6.50
Hierro	Fe ₂ O ₃	2.50
Azufre	SO ₃	2.00
Magnesia	MgO	2.00
Pérdida al fuego	PF	2.00
Residuo soluble	RI	1.00
Alcalis	-	0.50

Fuente: JIMENEZ MONTOYA, "Hormigón Armado"

Clasificación del cemento⁵

La Sociedad americana de ensayos de materiales (American Society for Testing and Materials; ASTM) clasifica los cementos Portland en cinco tipos. A continuación se da una descripción de los tipos de cemento:

- TIPO I. El cemento común de propósitos múltiples usado en trabajo de construcción en general.
- TIPO II. Un cemento modificado que tiene menor calor de hidratación que el tipo I y que puede resistir alguna exposición al ataque de los sulfatos.
- TIPO III. Un cemento de fraguado rápido que produce en las primeras 24 horas un hormigón con una resistencia aproximadamente doble a la del cemento tipo I. Este cemento produce calor de hidratación muy alto.
- TIPO IV. Un cemento de bajo calor que produce un hormigón que disipa muy lentamente el calor. Se usa en estructuras de hormigón de gran tamaño.

⁵ JACK C. McCORMAC, "Diseño de concreto reforzado", 4^{ta} edición.

- TIPO V. Un cemento usado para hormigones que van a estar expuestos a altas concentración de sulfatos.

Si el tipo requerido de cemento no está disponible en el mercado, pueden adquirirse aditivos que combinándolos con las características del cemento tipo I se produzcan las características deseadas.

Cemento Portland (Tipo I) ⁶

Los cementos Portland se obtienen por trituración conjunta de Clinker Portland, una cantidad adecuada de regulador de fraguado y, eventualmente, hasta un cinco por ciento de adiciones. Estas adiciones pueden ser una sola o varias entre escoria siderúrgica, puzolana natural, cenizas volantes, filler calizo y humo sílice.

- **Peso específico**

Según la norma Estándar de especificaciones y pruebas para el cemento Portland (ASTM C-150), el peso específico del cemento no debe ser menos a 3.10 (3.07 para cemento portland blanco).

- **Finura**

La finura del cemento influye en el calor de hidratación liberado y en la velocidad de hidratación. A mayor finura del cemento, mayor rapidez de hidratación del cemento y por lo tanto mayor desarrollo de resistencia.

La finura del cemento se determina mediante los siguientes ensayos:

- Ensayo Blaine de permeabilidad al aire. (ASTM C-204).
- Ensayo tamiz N^o. 325 Ensayo tamiz No. 325 (ASTM C-204).

Éste último es el que más se asemeja a nuestro ensayo, ya que en las normas bolivianas no está establecido este ensayo.

⁶ JIMENEZ MONTOYA Pedro, “Hormigón Armado”, 14^{va} edición.

La relación que se utiliza para comprobar el porcentaje de finura es la siguiente:

- Si el porcentaje de finura (%F) es menor al 5%, significa que este es un cemento Portland de endurecimiento rápido.
- Si el porcentaje de finura (%F) es menor que el 10% es que es un cemento Portland para uso ordinario.

El residuo que se queda en el tamiz estándar N^o. 200 no debe exceder al 22% en peso.

En un cemento normal la superficie específica puede estar alrededor de 200 m²/kg.

• **Fraguado y endurecido**

El fraguado indica de una forma aproximada el comienzo de la hidrólisis inicial, de la hidratación y el comienzo del endurecimiento del conglomerante. La norma ASTM C-150 dice que el fraguado deberá iniciarse aproximadamente una hora después del amasado del cemento y que deberá finalizar después de 10 horas. El proceso del endurecimiento va unido al del fraguado.

• **Resistencia**

La velocidad de endurecimiento del cemento depende de las propiedades químicas y físicas del propio cemento y de las condiciones de curado, como son la temperatura y la humedad. La relación agua/cemento (A/C) influye sobre el valor de la resistencia última, con base en el efecto del agua sobre la porosidad de la pasta. La resistencia es medida a los 3, 7 y 28 días, teniendo estas que cumplir los valores mínimos que se expresan en la Tabla N^o2.2:

TABLA N^o2.2.

Valores de resistencia del cemento

Categorías resistentes		Resistencias a la compresión [MPa]		
		Mínima a 3 días	Mínima a 7 días	Mínima a 28 días
Alta	40	17	25	40
Media	30	-	17	30
Corriente	25	-	15	25
Tipo de Cemento		Resistencias a la compresión [MPa] (ASTM 109)		
Tipo I		12	19	-

Fuente: American Society for Testing and Materials

- **Calor de hidratación**

Se llama calor de hidratación al calor que se desprende durante la reacción que se produce entre el agua y el cemento al estar en contacto.

El calor de hidratación que se produce en un cemento normal es del orden de 85-100 cal/gr. En la Tabla N°2.3 se muestra la apreciación cualitativa de la participación de los compuestos principales del cemento Portland en la rapidez de reacción con el agua y en el calor de hidratación por unidad de compuesto.

TABLA N°2.3

Calor de hidratación según participación de cada compuesto del cemento

Propiedad	Participación de cada compuesto			
	C3A	C4AF	C3S	C2S
Grado de reacción	Rápido	Lento	Mediano	Lento
Calor liberado	Grande	Pequeño	Mediano	Pequeño

Fuente: Enciclopedia digital Wikipedia

Donde:

C3S= Silicato tricálcico

C2S= Silicato dicálcico

C3A= Aluminato tricálcico

C4AF= Ferrita aluminato tetracálcico

2.4.2.1.1 Tipo de cemento a ser utilizado

Existen diversos tipos de cemento, diferentes por su composición, por sus propiedades de resistencia y durabilidad, y por lo tanto por sus destinos y usos. La norma boliviana (NB-011) clasifica los tipos de cemento según un código compuesto de dos partes.

Las dos primeras letras catalogan al cemento según los materiales usados para su fabricación (Tabla N°2.4):

TABLA N°2.4

Clasificación de tipos del cemento

Tipo de cemento			Proporción en masa [%]			
			Componentes principales			Componentes adicionales
Denominación	Designación	Tipo	Clinker	Puzolana	Filler	
Cemento Portland	Portland	I	95 a 100	-	-	0 a 5
	Portland con puzolana	IP	60 a 94	6 a 40	-	0 a 5
	Portland con filler calizo	IF	65 a 94	-	6 a 35	0 a 5
Cemento puzolánico		P	45 a 60	40 a 55	-	0 a 5

Fuente: Norma boliviana NB-011

El número que se ve a continuación del código representa el valor de resistencia a compresión mínima para un ensayo normalizado (NB-470). EL CEMENTO IP-30, que es el más comercial en nuestro medio representa un cemento Portland Tipo Puzolánico con una resistencia a compresión de 30 MPa a los 28 días de edad.

El cemento a ser utilizado en este trabajo de investigación será el cemento Portland IP-30.

Producto adquirido de la molienda conjunta de Clinker, yeso y puzolana.

Sus principales propiedades son: resistencia mecánica media, bajo calor de hidratación, menor retracción debido a la inclusión de Puzolana y endurecimiento algo más lento.

Sus características más significativas son: Resistencia mecánica media, bajo calor de hidratación, menor fisuración y retracción química, mejor trabajabilidad, mayor resistencia a ataques químicos, mayor impermeabilidad, mayor durabilidad.

2.4.2.2 Agua

Casi cualquier agua natural que se pueda beber (potable) y que no tiene un sabor u olor marcado, puede utilizarse como agua de mezclado en la elaboración del hormigón. Cuando las impurezas en el agua de mezclado son excesivas, pueden afectar no sólo el tiempo de fraguado, la resistencia del hormigón y la estabilidad volumétrica (variación dimensional), sino que también pueden provocar eflorescencia o corrosión en el refuerzo. Siempre que sea posible, debe evitarse el agua con altas concentraciones de sólidos disueltos.

Las sales u otras sustancias nocivas que provengan del agregado o de los aditivos, deben sumarse a la cantidad que puede contener el agua de mezclado. Estas cantidades adicionales deben tomarse en consideración al hacer la evaluación respecto a la aceptabilidad del total de impurezas que pueda resultar nocivo, tanto para el hormigón como para el acero.

Tanto el agua de amasado como el agua de curado deben reunir ciertas condiciones para desempeñar eficazmente su función. En general, se debe ser más estricto el cuidado en un agua para curado que en el agua para amasado. 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 amasado 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.

2.4.2.2.1 Agua de amasado ⁷

El agua empleada en el mezclado del hormigón debe estar limpia y libre de cantidades perjudiciales de aceites, ácidos, álcalis, sales, materia orgánica u otras sustancias nocivas para el hormigón.

El agua de amasado 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 huecos en el hormigón que disminuyen la resistencia del hormigón, pero por otra parte, no puede disminuirse excesivamente el contenido en agua, pues podrían obtenerse masas poco trabajables y de difícil colocación en obra.

Se puede utilizar satisfactoriamente el agua para el preparo del hormigón con menos de 2000 partes por millón (ppm) de sólidos disueltos. El agua que contiene más de 2000 ppm de sólidos disueltos se debe analizar para comprobar su efecto sobre la resistencia y el tiempo de fraguado.

⁷ JIMENEZ MONTOYA Pedro, "Hormigón Armado", 14^{va} edición.

2.4.2.2 Agua de curado

El agua de curado, durante el proceso de fraguado y primer endurecimiento del hormigón, tiene de finalidad evitar la desecación, mejorar la hidratación del cemento e impedir una retracción prematura.

2.4.2.3 Agregados

2.4.2.3.1 Generalidades

El agregado a emplear será duro, bien lavado, de naturaleza silíceo, calcáreo o silico-calcáreo, rodados o chancados, no debiendo tener arcillas ni carbonillas.⁸

Mientras se cumplen las especificaciones procedentes podrá utilizarse tanto agregados ordinarios (pesados) como agregados livianos, lográndose, con este último, una mayor disminución del peso específico del hormigón que se elabora.

Los agregados pueden ser rodados o chancados. Los primeros proporcionan hormigones más dóciles y trabajables, requiriendo menor cantidad de agua que los segundos. Los agregados chancados confieren al hormigón fresco una cierta aspereza que dificulta su puesta en obra. Los agregados de machaqueo proporcionan una mayor ligazón que se refleja en una mayor resistencia del hormigón, especialmente a tracción.

2.4.2.3.2 Agregado grueso⁹

Se denomina igualmente grava a la fracción mayor a 4 mm.

2.4.2.3.3 Agregado fino¹⁰

Se llama asimismo arena a las partículas que poseen un tamaño menor a 4mm.

Suele dividirse en dos: arena gruesa a la fracción entre 0.063 – 4 mm y arena fina a la fracción inferior a 0.063 mm.

⁸ HUGON. M. SERRE, “Técnicas de la construcción”.

^{9,10} JOHNNY ORGAZ F., “Manual de laboratorio de hormigón”, 1991.

2.4.2.3.4 Características físicas de los agregados

- **Granulometría**

La distribución de los distintos tamaños de los granos que componen un agregado tiene una importancia decisiva en las características del hormigón. El estudio de dicha distribución suele efectuarse mediante la curva granulométrica, que se determina cribando el agregado a través de una serie normalizada de cribas o tamices.

Los tamices normalmente empleados corresponden a la serie ASTM E-11/87, cuyas aberturas están en progresión geométrica. Sus valores están dados en la Tabla N°2.5:

TABLA N° 2.5
Serie de tamices

N° de tamiz	Luz	N° de tamiz	Luz
5"	125 mm	3/8"	9.5 mm
4.24"	100 mm	1/4"	6.3 mm
3"	75 mm	N° 4	4.75 mm
2 1/2"	63 mm	N° 8	2.36 mm
2"	50 mm	N° 16	1.18 mm
1 1/2"	37.5 mm	N° 30	600 µm
1"	25 mm	N° 50	300 µm
3/4"	19 mm	N° 100	150 µm
1/2"	12.5 mm	N° 200	75 µm

Fuente: American Society for Testing and Materials (ASTM)

Las dimensiones límites del agregado serán 5 mm y 30 mm, aunque se aconseja mantenerse en lo posible dentro de los 15 mm a 20 mm. De cualquier manera, lo que interesa es reducir el mínimo la diferencia entre las dimensiones de los granos extremos.¹¹

- **Módulo de finura**

Se denomina módulo de finura del agregado grueso a la suma de los porcentajes acumulados retenidos sobre cada uno de los siguientes tamices de la serie ASTM: 1 1/2", 3/4", 3/8" y No. 4, dividido por 100.

¹¹ INSTITUTO DEL CEMENTO PORTLAND ARGENTINA.

$$MF = \frac{\sum \%ret \left(1 \frac{1}{2} + \frac{3}{4} + \frac{3}{8} + N^{\circ}4 + 500 \right)}{100}$$

Y el módulo de finura del agregado fino es la suma de los porcentajes acumulados retenidos sobre cada uno de los siguientes tamices: 3/8”, No.4, No.8, No.16, No.30, No.50 y No.100, dividido por 100.

$$MF = \frac{\sum \%ret. acum \left(\frac{3}{8} + N^{\circ}4 + N^{\circ}8 + N^{\circ}16 + N^{\circ}30 + N^{\circ}50 + N^{\circ}100 \right)}{100}$$

El valor del módulo de finura es tanto más alto cuanto más grueso es el agregado.

Se puede considerar al módulo de finura como promedio ponderado de tamaño del tamiz en el cual es retenido el material, siendo los tamices contados a partir del más fino.

- **Tamaño máximo nominal**¹²

Está definido como la abertura del tamiz inmediatamente superior a aquel cuyo porcentaje retenido acumulado sea del 15% o más.

- **Tamaño máximo del agregado grueso**¹³

Está descrito como la abertura del menor tamiz de la serie, que permite el paso del 100% del material.

- **Peso específico**

El peso específico es la relación del peso de la muestra de un material en el aire, al peso del agua desplazado por el mismo, incluyendo sus poros permeables. Según sea que el peso en el aire se considere seco (en horno constante) o en la condición de saturado y superficie seca, el peso específico se refiere a una de esas condiciones debiendo al expresarlo señalar lo que corresponde.

Existen varios tipos de pesos específicos.

El peso específico absoluto se refiere al volumen del material sólido que excluye a todos los poros, y se puede definir como resultado de esto, como la relación de la masa del sólido, referido a vacío, respecto de la masa de un volumen igual de agua destilada libre de gases, tomadas a una temperatura dada.

^{12, 13} CARRASCO ARNOLD Paul, “Compendio Tecnología del Hormigón”.

El peso específico aparente es la relación de la masa del agregado secado al horno a 100°C -110°C durante 24 horas, respecto de la masa del agua que ocupa un volumen igual al del sólido, incluyendo los poros impermeables.

El peso específico en condición saturado y superficie seca, es la relación del peso de la muestra saturada pero con la superficie seca y la pérdida de peso de la muestra sumergida y o sea el volumen de agua desplazado o volumen de la muestra.

- **Peso unitario**

El peso unitario se refiere al volumen de las partículas individuales, pero físicamente no es posible compactar esas partículas para que no haya huecos entre ellas. Cuando el agregado se va a dosificar por volumen, es necesario saber la masa de agregado que llenaría un recipiente de volumen unitario.

Este peso depende claramente de que tan densamente el agregado sea compactado, y se sigue que, para un material de un peso específico dado, el peso depende de la distribución de tamaño y de la forma de las partículas.

Este peso unitario para efectos de estudio puede darse según el grado de compactación que se le ejerza.

- **Absorción**

La absorción de agua de los agregados se determina midiendo el aumento en masa de una muestra secada en horno, y sumergida después en agua durante 24 horas (habiendo quitado el agua de la superficie). La relación que existe entre el aumento en masa con respecto a la masa de la muestra seca, expresada en porcentaje, se llama absorción.

- **Humedad natural (contenido de humedad) ¹⁴**

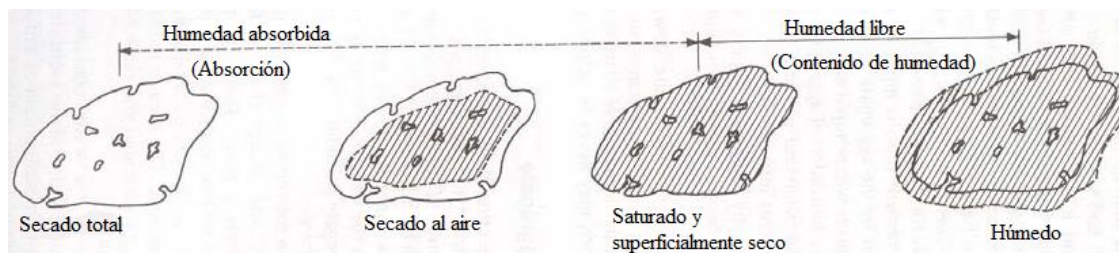
La humedad superficial (la que sobre de la que ha mantenido el agregado en su condición de saturado y superficialmente seco) se expresa como un porcentaje de la masa del agregado saturado y superficialmente seco y se la conoce como contenido de humedad.

¹⁴ ADAM M. NEVILLE, "Tecnología del concreto", 4^{ta} edición.

Puesto que la absorción representa el contenido de agua del agregado en condiciones de saturado y superficialmente seco y el contenido de humedad es el agua sobrante en dicho estado, el contenido total de agua de un agregado húmedo será igual a la suma de la absorción y el contenido de humedad.

FIGURA N° 2.1

Representación diagramática de la humedad en el agregado



Fuente: ADAM M.NEVILLE, "Tecnología del concreto"

2.4.2.3.5 Características mecánicas de los agregados¹⁵

• **Resistencia**

En términos generales, la resistencia y elasticidad de los agregados dependen de su composición, textura y estructura. De hecho, es difícil probar la resistencia a la trituración de las partículas individuales del agregado y generalmente la información necesaria se obtiene de pruebas indirectas como ser: Valor de trituración del agregado a granel, fuerza requerida para compactar agregado a granel y comportamiento de agregado en el hormigón.

Esto afecta directamente en la resistencia del hormigón, por lo que una baja resistencia puede deberse a la debilidad de los granos que lo constituyen, o bien, a que siendo éstos lo suficientemente resistentes no estén bien unidos o cementados unos a otros.

• **Tenacidad y Dureza**

Estas propiedades son de especial interés cuando hay que utilizar esos agregados en la construcción de pavimentos o van a estar sujetos a desgaste.

La tenacidad se la puede definir como la resistencia de una muestra de roca a la falla por impacto.

¹⁵ ADAM M. NEVILLE, "Tecnología del concreto", 4^{ta} edición.

Se define como dureza de un agregado a su resistencia a la erosión abrasión o en general al desgaste. La dureza de las partículas depende de sus constituyentes.

2.5 Propiedades del hormigón ¹⁶

2.5.1 Propiedades del hormigón fresco

El hormigón fresco es un material esencialmente heterogéneo, puesto que en el coexisten tres fases: Sólida (agregados y cemento), líquida (agua) y gaseosa (aire ocluido). A su vez, la fase sólida es heterogénea entre sí, ya que sus granos son de naturaleza y dimensión variable.

Entre las propiedades del hormigón fresco podemos citar: La consistencia, trabajabilidad, homogeneidad y la masa específica o densidad.

2.5.1.1 Consistencia

Es la facilidad que tiene el hormigón fresco para deformarse. Varía en relación a diferentes factores: cantidad de agua de amasado, tamaño máximo, granulometría y forma de los agregados, etc.; el que más influye es la cantidad de agua de amasado.

Existen varios procedimientos para determinar la consistencia, siendo los más empleados el cono de Abrams, la mesa de sacudidas y el consistómetro de Vebe.

El cono de Abrams es un molde troncocónico de 30 cm de altura, que se rellena con el hormigón, objeto de ensayo. La pérdida de altura que experimenta la masa fresca del hormigón una vez desmoldada, expresada en centímetros, da una medida de su consistencia.

Los hormigones se clasifican por su consistencia tal como se muestra en la Tabla N^o2.6:

¹⁶ JIMENEZ MONTOYA Pedro, “Hormigón Armado”, 14^{va} edición.

TABLA N° 2.6

Clasificación del hormigón por su consistencia

CONSISTENCIA	ASIENTO EN CONO DE ABRAMS [cm]
Seca	0 a 2
Plástica	3 a 5
Blanda	6 a 9
Fluida	10 a 15
Líquida	≥ 16

Fuente: JIMENEZ MONTOYA, "Hormigón Armado"

2.5.1.2 Trabajabilidad

La trabajabilidad o docilidad puede considerarse como la aptitud de un hormigón para ser puesto en obra con los medios de compactación que se dispone. Esta trabajabilidad del hormigón está relacionada con su deformabilidad, con su homogeneidad, con la ligazón 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.

La trabajabilidad depende:

- De la cantidad de agua de amasado. Cuanto mayor sea esta, mayor será la trabajabilidad.
- De la granulometría de los áridos, siendo más dóciles los hormigones cuyo contenido de arena es mayor. Por otra parte, a más cantidad de agregado fino corresponde más agua de amasado necesaria y, por tanto, menor resistencia.
- La docilidad es mayor con áridos redondeados que con áridos procedentes de chancadoras.
- La docilidad aumenta con el contenido en cemento y con la finura de este.
- El empleo de un plastificante aumenta la docilidad del hormigón, a igualdad de las restantes características.

En hormigones cavernosos existe un método diferente de realizar la compactación para evitar la segregación de las partículas con mayor peso, consiste en realizar un apisonado

suave, evitando el vibrado porque puede provocar la disgregación del material. Se hormigonará por capas sucesivas, colándose cada una antes que comience el endurecimiento de la anterior.

2.5.1.3 Homogeneidad

Es la cualidad por la cual los diferentes componentes del hormigón aparecen regularmente distribuidos en toda la masa, de manera tal que dos muestras tomadas de distintos lugares de la misma resulten prácticamente iguales. La homogeneidad se consigue con un buen amasado y para mantenerse, requiere un transporte cuidadoso y una colocación adecuada.

La homogeneidad puede perderse por segregación (separación de los gruesos por una parte y los finos por otra) o por decantación (los granos gruesos caen al fondo y el mortero queda en la superficie, cuando la mezcla es muy líquida). Ambos fenómenos aumentan con el contenido de agua, con el tamaño máximo del árido, con las vibraciones o sacudidas durante el transporte y con la puesta en obra en caída libre.

En hormigones cavernosos el tiempo de amasado o mezclado es más elevado que para la realización de un hormigón convencional, este tiempo será de 2 a 3 minutos, o el que sea necesario para obtener una mezcla de color uniforme, con los granos bien recubiertos de mortero.

2.5.1.4 Masa específica

Un dato de gran interés como índice de la uniformidad del hormigón en el transcurso de la obra, es la masa específica del hormigón fresco, sea sin compactar o compactado.

La variación de cualquiera de ambos valores, que repercute en la consistencia, indica una alteración de la granulometría de los áridos, del contenido en cemento o del agua de amasado, por lo que debe dar origen a las correcciones oportunas.

2.5.2 Propiedades del hormigón endurecido ¹⁷

En esta sección se estudiará: el peso específico, la compacidad, la permeabilidad del hormigón.

¹⁷ JIMENEZ MONTOYA Pedro, “Hormigón Armado”, 14^{va} edición.

2.5.2.1 Peso específico

El peso específico del hormigón endurecido depende de varios factores, principalmente de naturaleza de los áridos, de su granulometría y del método de compactación empleado. Será tanto mayor cuanto mayor sea el de los áridos utilizados y mayor cantidad de agregado grueso contenga, y tanto mayor cuanto mejor compactado este.

De todas formas, las variaciones de peso del hormigón son pequeñas, pudiendo tomarse en los cálculos valores entre 2250 y 2450 kg/m³ y puede suponerse igual a 2300 kg/m³.

Los valores indicados corresponden a hormigones normales.

Según el peso específico los hormigones cavernosos, pueden ser agrupados en dos categorías:

- Hormigones cavernosos de agregados ordinarios, cuyo peso específico aparente seco es inferior al de los hormigones comunes debido a que contienen una proporción relativamente importante de huecos, pudiendo variar entre 1600 y 2000 kg/m³.
- Hormigones cavernosos de agregados livianos, cuyo peso específico aparente oscila entre 700 y 1000 kg/m³.

2.5.2.2 Compacidad

La compacidad depende de los mismos factores que la densidad, 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 llene con mortero, 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 que componen el hormigón, en relación con los volúmenes ocupados por el agua y aire.

Una buena compacidad no solo proporciona una mayor resistencia mecánica, sino también una mayor resistencia física y química frente a las acciones agresivas, ya que, al contener una cantidad mínima de huecos o porosidades, las vías de penetración de los agentes exteriores son también mínimas.

Esta definición es dada para un hormigón normal, mientras que para el hormigón cavernoso si se compacta demasiado se reducen el volumen de vacíos que se está tratando de proporcionar a la mezcla y por tanto aumenta el peso de hormigón.

2.5.2.3 Absorción¹⁸

Debido a las dimensiones relativamente importantes de sus vacíos, gran parte del agua absorbida por inmersión escapa posteriormente a su emersión. Por este motivo, el porcentaje de agua absorbido y retenido es muy inferior para los hormigones cavernosos que para los ordinarios.

La capacidad de absorción de agua por capilaridad es del orden del 50 a 75% de la que corresponde a los hormigones densos.

Asimismo, resisten bien los ensayos de congelación.

2.5.3 Propiedades térmicas¹⁹

Depende de los siguientes factores: Su estructura porosa; la textura de sus agregados y la proporción de pasta de cemento en la mezcla.

Conductividad térmica

El coeficiente de conductibilidad térmica adquiere los siguientes valores (expresados en kcal/m.h.°C):

- 0,14 a 0,20 para hormigones de piedra pómez
- 0,20 a 0,30 para hormigones de escorias
- 0,35 para hormigones de cascotes
- 0,50 a 0,55 para hormigones de piedra

Sin embargo, un alto contenido de humedad en el hormigón aumenta muy apreciablemente la conductividad térmica.

Expansión térmica

El coeficiente de expansión térmica del hormigón cavernoso esta alrededor de 0.6 a 0.8 del que presenta el hormigón convencional pero el verdadero valor del coeficiente de expansión térmica depende del tipo de agregado utilizado.

^{18, 19} INSTITUTO DEL CEMENTO PORTLAND ARGENTINA.

FIGURA N°2.2

Variación de la conductividad térmica de los hormigones cavernosos en función de las masas volúmicas aparentes



Fuente: HUGON. M. SERRE, "Técnicas de la construcción"

2.5.4 Retracción

Como consecuencia de la reducida cantidad de agua que se requiere para su elaboración los hormigones cavernosos sufren retracciones reducidas, del orden del 50% de los que corresponden a hormigones ordinarios elaborados con el mismo agregado.

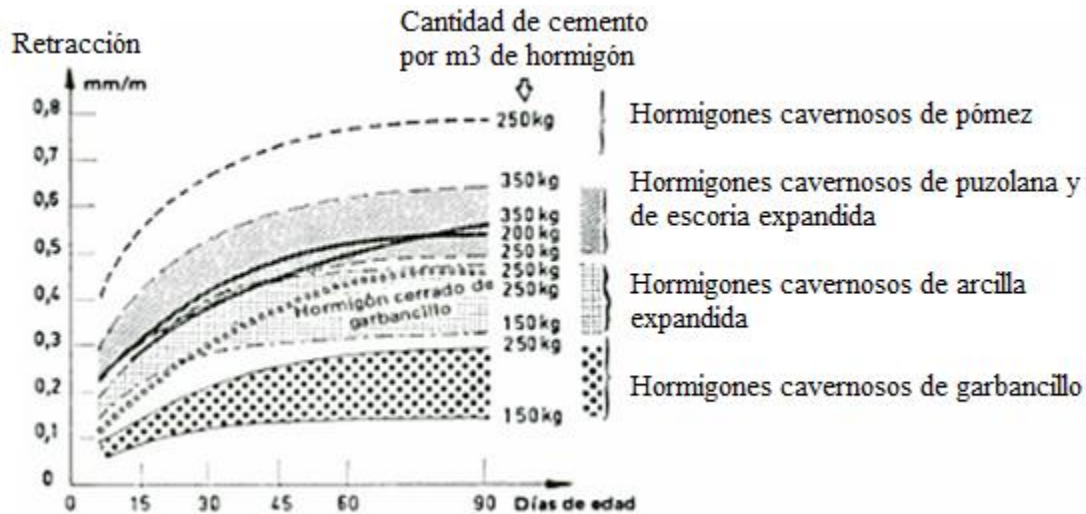
A igual granulometría y tenor de cemento los valores obtenidos a los 90 días fueron:

- Hormigones cavernosos de escorias o piedra pómez: 0,4 a 0,5 mm/m
- Hormigones cavernosos de agregados pesados (piedra): 0,25 a 0,3 mm/m

Una particularidad destacable es que dichas retracciones tienen lugar rápidamente (30 a 50% a los 10 primeros días).

FIGURA N°2.3

Retracción de los hormigones cavernosos (en condiciones normales de conservación:
20 °C, 65% de humedad relativa)



Fuente: HUGON. M. SERRE, "Técnicas de la construcción"

2.6 Características mecánicas del hormigón

2.6.1 Resistencia a compresión ²⁰

La resistencia a la compresión del hormigón cavernoso varía generalmente entre 15 k/cm² y 140 kg/cm², lo que depende principalmente de su densidad, que es regida por el contenido de cemento.

La resistencia es, en general más reducida con escorias y piedra pómez y más elevada con cascotes de ladrillos, piedras trituradas y grava.

Para la mayor parte de las aplicaciones corrientes, sólo se requiere una resistencia de 20 a 25 kg/cm².

2.6.2 Resistencia a tracción por flexión

La resistencia a la tracción por flexión es del orden de 25% ²¹ a 30% ²² de la resistencia a la compresión.

²⁰ INSTITUTO DEL CEMENTO PORTLAND ARGENTINA.

²¹ INSTITUTO DEL CEMENTO PORTLAND ARGENTINA.

²² ADAM M. NEVILLE, "Tecnología del concreto", 4^{ta} edición.

3. CAPÍTULO III

DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Preparación y caracterización de materiales que conforman la mezcla

Para la obtención de las propiedades físicas y mecánicas del hormigón cavernoso como ser la resistencia compresión y el peso específico de dicho hormigón, como primer paso se llevó a cabo la preparación y caracterización de los agregados con el fin de realizar una dosificación adecuada que cumpla con los parámetros descritos en el anterior capítulo.

3.1.1. Preparación de materiales

Los agregados fueron previamente lavados con el fin de eliminar materias orgánicas u otras partículas innecesarias que podrían afectar en la dosificación de la muestra y luego secados para su posterior uso, mientras que el cemento fue almacenado en un lugar seco para evitar que este absorba humedad del ambiente y comience un fraguado superficial.

3.1.2. Caracterización de agregados

3.1.2.1. Granulometría y módulo de finura de agregado grueso

3.1.2.1.1. Equipo

Para la realización de este ensayo de laboratorio se utilizó el siguiente equipo:

- Balanza; sensibilidad 0.1 gr.
- Juego de tamices.
- Horno de temperatura constante (105°C).
- Cepillo metálico para limpiar los tamices.

3.1.2.1.2. Muestra

La muestra debe ser representativa, la cual se obtiene por cuarteo.

El peso de la muestra de agregado grueso necesario para este ensayo deberá estar de acuerdo con el tamaño máximo de las partículas en pulgadas, para nuestro caso se utilizó una muestra de 5000 gramos.

3.1.2.1.3. Procedimiento

Se coloca el juego de tamices desde el tamiz de 2 ½ pulgadas hasta el Nro. 4, y al final la base, se agita todo el juego de mallas horizontalmente con movimientos de rotación y con golpes verticales de ser necesario.

El tiempo de tamizado depende de la cantidad de finos que posea la muestra, pero por lo general debe ser mayor a 15 minutos.

Se retira la tapa y se separa la malla, vaciando la fracción de suelo que haya sido retenida en ella sobre un recipiente previamente pesado, a las partículas que hayan quedado atascadas en la malla, no hay que forzarlas a pasar a través de ella, sino invertir el tamiz y con la ayuda de un cepillo de alambre desprenderlas y agregarlas a las depositadas en el recipiente.

Se pesa cuidadosamente la fracción de la muestra obtenida anteriormente y se repite el proceso de pesado para cada muestra retenida en las mallas y en la base.

Todos los pesos retenidos se anotan en un registro.

3.1.2.1.4. Cálculos

El peso del material retenido sobre cada tamiz será anotado y expresado de la siguiente manera:

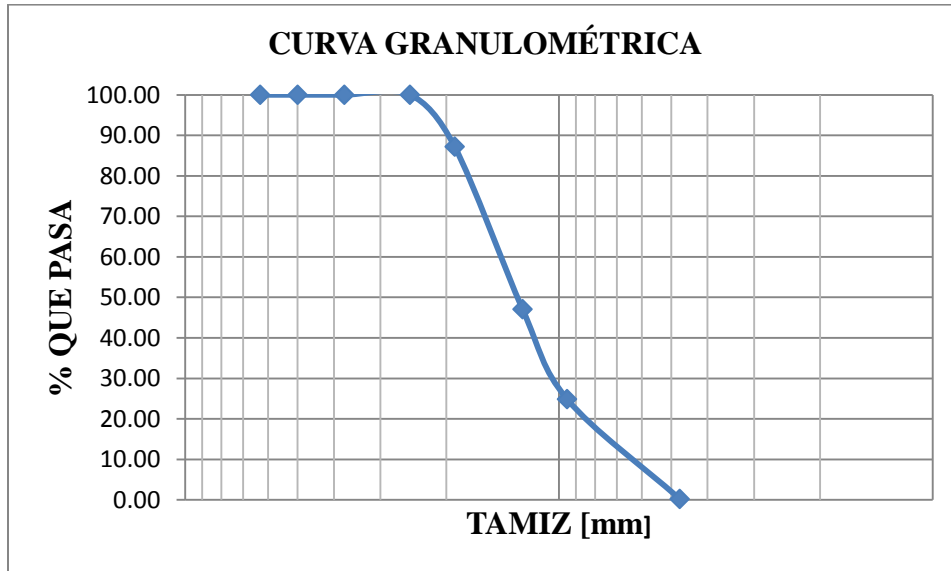
- Por ciento retenido sobre cada tamiz.
- Por ciento total que pasa por cada tamiz.

Para el módulo de finura del agregado grueso se aplica la siguiente fórmula:

$$MF = \frac{\Sigma \%ret(1\frac{1}{2} + \frac{3}{4} + \frac{3}{8} + N^{\circ}4 + 500)}{100}$$

GRÁFICO N°3.1

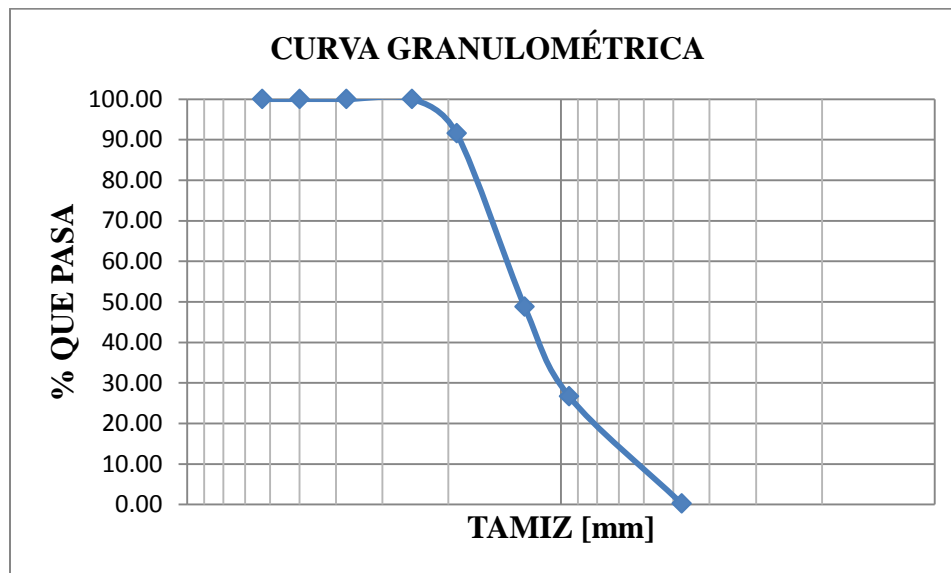
Curva granulométrica agregado grueso (canto rodado)



Fuente: Elaboración propia

GRÁFICO N°3.2

Curva granulométrica agregado grueso (chancado)



Fuente: Elaboración propia

3.1.2.2. Peso específico y absorción de agregado grueso

3.1.2.2.1. Equipo

Para la obtención del peso específico aparente, peso específico a granel y el porcentaje de absorción del agregado grueso se utilizó el siguiente equipo:

- Balanza con capacidad mayor a 5 kg; sensibilidad 0.5 gr.
- Cesto cilíndrico de tela metálica de 20 cm de diámetro y 20 cm de altura.
- Recipiente en el que se pueda sumergir la cesta.
- Aparato para suspender la cesta cuando se sumerge, con el fin de obtener el peso de la muestra sumergida.

3.1.2.2.2. Muestra

La muestra consiste en aproximadamente 5 kg de material separado por el método de cuarteo y de manera que todo el material quede retenido sobre el tamiz de 3/8” para evitar que las partículas de agregado se salgan por las aberturas de la cesta metálica.

3.1.2.2.3. Procedimiento

Se lava el material a fin de remover el polvo o cualquier impureza que cubra la superficie de las partículas, luego se sumerge la muestra con agua por un período de 24 horas.

Se saca la muestra del agua y se secan las partículas con una toalla hasta que la película de agua haya desaparecido de la superficie. Se deberá evitar la evaporación durante esta operación.

Seguidamente se obtiene el peso de la muestra con sus partículas saturadas.

Se vuelve a sumergir la muestra después de ser pesada y se determina el peso de la muestra con sus partículas sumergidas.

Finalmente, se seca la muestra en un horno a temperatura constante (105 °C), luego se deja enfriar y se obtiene un peso de muestra seca.

3.1.2.2.4. Cálculos

- **Peso específico a granel**

$$\text{Peso específico a granel} = \frac{A}{B - C}$$

Dónde:

A=Peso de la muestra secada en el horno [gr].

B=Peso de la muestra saturada con superficie seca [gr].

C=Peso de la muestra saturada dentro del agua [gr].

- **Peso específico en condición saturado y superficie seca**

$$\text{Peso específico saturado con superficie seca} = \frac{B}{B - C}$$

Dónde:

B-C= Es la pérdida de peso de la muestra sumergida y significa por lo tanto el volumen de agua desplazado, o sea el volumen de la muestra.

- **Peso específico aparente**

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{A}{A - C}$$

- **Porcentaje de Absorción**

$$\% \text{ de Absorción} = \frac{B - A}{A} * 100$$

TABLA N°3.1

Resultados ensayo Peso específico agregado grueso

		Canto rodado	Chancado
Peso específico a granel	[gr/cm ³]	2.58	2.59
Peso específico saturado sup. Seca	[gr/cm ³]	2.60	2.63
Peso específico aparente	[gr/cm ³]	2.63	2.70
% de absorción	[%]	0.73	1.59

Fuente: Elaboración propia

3.1.2.3. Peso unitario del agregado grueso

3.1.2.3.1. Equipo

Para determinar el peso unitario del agregado grueso se usó el siguiente material:

- Balanza.
- Varilla de 5/8” de diámetro y 60 cm de largo.
- Juego de recipientes cilíndricos. El tamaño del molde cilíndrico que se debe usar depende del tamaño máximo de partículas.

Para nuestro ensayo se usó un molde cilíndrico de 10000 cm³ porque el tamaño máximo de nuestro agregado está comprendido entre 1/2” y 1 1/2”.

3.1.2.3.2. Muestra

Se usa una muestra representativa del agregado a la humedad ambiente. Por ningún motivo debe secarse esa muestra.

3.1.2.3.3. Procedimiento

Se llena el molde hasta una tercera parte de su capacidad, nivelándose el agregado con las manos. Luego por medio de la varilla se apisona uniformemente esta capa 25 veces. No se debe golpear el fondo del molde.

Se repite el procedimiento anterior dos veces hasta llenar el molde. Las partículas de la superficie se deben enrasar con la varilla teniendo como guía el borde del molde.

Se pesa el molde junto con el agregado.

3.1.2.3.4. Cálculos

El peso neto del agregado o de la mezcla dentro del molde se obtiene restando del peso del molde más la muestra compactada el peso del molde. El peso por unidad de volumen de la muestra se obtiene multiplicando su peso neto por el inverso del volumen del molde.

TABLA N°3.2

Resultados peso unitario agregado grueso

Peso unitario		Canto rodado	Chancado
Suelto	[gr/cm ³]	1.49	1.42
Compactado	[gr/cm ³]	1.58	1.51

Fuente: Elaboración propia

3.1.2.4. Granulometría y módulo de finura de agregado fino

3.1.2.4.1. Equipo

Para la realización de este ensayo de laboratorio se utilizó el siguiente equipo:

- Balanza; sensibilidad 0.1 gr.
- Juego de tamices.
- Horno de temperatura constante (105°C).
- Brocha para limpiar los tamices.

3.1.2.4.2. Muestra

La muestra debe ser representativa, la cual se obtiene por cuarteo.

El peso de la muestra de agregado fino para este ensayo fue de 2000 gramos.

3.1.2.4.3. Procedimiento

Se coloca el juego de tamices desde el tamiz de 3/8'' hasta el Nro. 100 y al final la base, se agita todo el juego de mallas horizontalmente con movimientos de rotación y con golpes verticalmente de ser necesario.

El tiempo de tamizado depende de la cantidad de finos que posea la muestra, pero por lo general debe ser mayor a 15 minutos.

Se retira la tapa y se separa la malla, vaciando la fracción de suelo que haya sido retenida en ella sobre un recipiente previamente pesado, a las partículas que hayan quedado trancadas en la malla, no hay que forzarlas a pasar a través de ella, sino invertir el tamiz y con la ayuda de un brocha desprenderlas y agregarlas a las depositadas en el recipiente.

Se pesa cuidadosamente la fracción de la muestra obtenida anteriormente. Se repite el proceso de pesado para cada muestra retenida en las mallas y en la base.

Todos los pesos retenidos se anotan en un registro.

3.1.2.4.4. Cálculos

El peso del material retenido sobre cada tamiz será anotado y expresado de la siguiente manera:

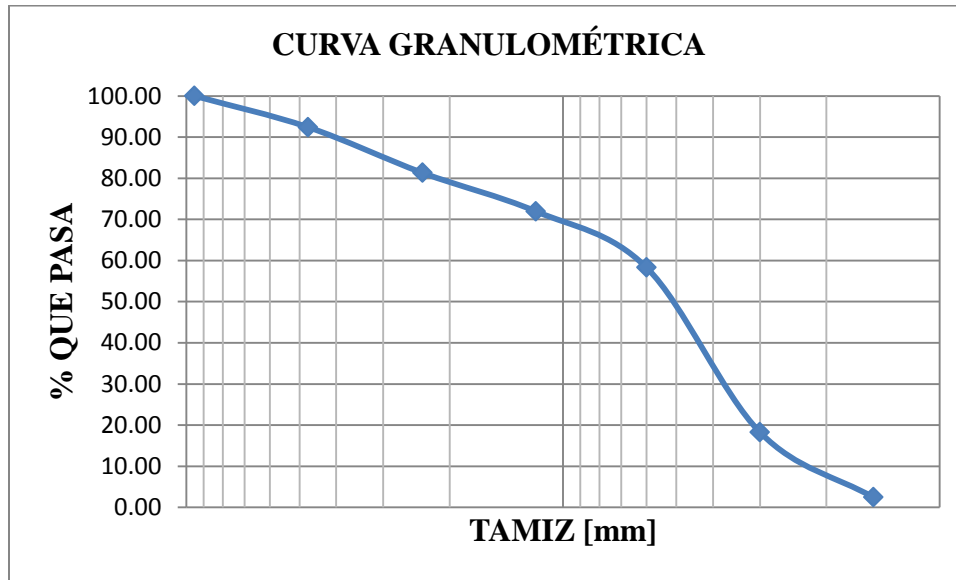
- Por ciento retenido sobre cada tamiz.
- Por ciento total que pasa por cada tamiz.

Para el cálculo del módulo de finura de la arena se aplica lo siguiente:

$$MF = \frac{\Sigma \%ret. acum \left(\frac{3}{8} + N^{\circ}4 + N^{\circ}8 + N^{\circ}16 + N^{\circ}30 + N^{\circ}50 + N^{\circ}100 \right)}{100}$$

GRÁFICO N°3.3

Curva granulométrica agregado fino



Fuente: Elaboración propia

3.1.2.5. Peso específico y absorción de agregado fino

3.1.2.5.1. Equipo

- Balanza con capacidad de 1 kg; sensibilidad de 0.1 g.
- Matraz de 500 ml de capacidad.
- Molde cónico.
- Varilla.

3.1.2.5.2. Muestra

Se selecciona una muestra de 1 kg que puede ser obtenido por cuarteo.

3.1.2.5.3. Procedimiento

Se coloca la muestra dentro de un recipiente lleno de agua y se deja allí por un período de 24 horas.

Se saca la muestra del recipiente y se seca de manera uniforme, con el fin de inspeccionar que tan seca esta la muestra, se la coloca dentro del molde cónico y luego se retira el molde. Si la muestra tiene todavía algo de humedad superficial, conservará la forma cónica del molde y si por el contrario la humedad de la superficie ha sido eliminada, la arena rodará libremente cuando se levante el cono.

Por lo general si la arena rueda libremente la primera vez que se coloca el cono, esto es indicación de que la muestra ha sido secada más de lo necesario y que ha perdido su condición de saturada; por lo consiguiente, se deberá rociar con agua y dejarla reposar por unos 30 minutos antes de volver a colocarla en el cono.

Se colocan 500 gr de la muestra en el matraz y luego se llena este con agua hasta el tope. Con el fin de eliminar burbujas de aire presentes en el matraz, se rueda el matraz sobre sí mismo y luego se coloca en un baño a temperatura constante de 20 °C.

Se vacía el contenido del matraz en un recipiente y se pone a secar en el horno de temperatura constante (105 °C) y se pesará.

3.1.2.5.4. Cálculos

- **Peso específico a granel**

$$\text{Peso específico a granel} = \frac{A}{V - W}$$

Dónde:

A=Peso en el aire de la muestra secada en el horno [gr].

V=Volumen del frasco [ml].

W=Peso [gr] o volumen [ml] del agua agregada al frasco.

- **Peso específico en condición saturado y superficie seca**

$$\text{Peso específico saturado superficie seca} = \frac{500}{V - W}$$

- **Peso específico aparente**

$$\text{Peso específico aparente} = \frac{A}{(V - W) - (500 - A)}$$

- **Porcentaje de Absorción**

$$\% \text{ de Absorción} = \frac{500 - A}{A} * 100$$

TABLA N°3.3

Resultados peso específico agregado fino

		Agregado fino
Peso específico a granel	[gr/cm ³]	2.28
Peso específico saturado sup. seca	[gr/cm ³]	2.31
Peso específico aparente	[gr/cm ³]	2.36
% de absorción	[%]	1.55

Fuente: Elaboración propia

3.1.2.6. Peso unitario del agregado fino

3.1.2.6.1. Equipo

Para determinar el peso unitario del agregado grueso se usó el siguiente material:

- Balanza.
- Varilla de 5/8" de diámetro y unos 60 cm de largo.
- Juego de recipientes cilíndricos. El tamaño del molde cilíndrico que se debe usar depende del tamaño máximo de partículas.

Para nuestro ensayo se usó un molde cilíndrico de 3000 cm³.

3.1.2.6.2. Muestra

Se usa una muestra representativa del agregado a la humedad ambiente. Por ningún motivo debe secarse esa muestra.

3.1.2.6.3. Procedimiento

Se llena el molde hasta una tercera parte de su capacidad, nivelándose el agregado con las manos. Luego por medio de la varilla se apisona uniformemente esta capa 25 veces. No se debe golpear el fondo del molde.

Se repite el procedimiento anterior dos veces hasta llenar el molde. Las partículas de la superficie se deben enrasar con la varilla teniendo como guía el borde del molde.

Se pesa el molde junto con el agregado.

3.1.2.6.4. Cálculos

El peso neto del agregado o de la mezcla dentro del molde se obtiene restando del peso del molde más la muestra compactada el peso del molde. El peso por unidad de volumen de la muestra se obtiene multiplicando su peso neto por el inverso del volumen del molde.

TABLA N°3.4

Resultados peso unitario agregado fino

Peso unitario		Agregado fino
Suelto	[gr/cm ³]	1.57
Compactado	[gr/cm ³]	1.74

Fuente: Elaboración propia

3.2. Metodología y procedimientos para la investigación

Una vez realizada la caracterización de los áridos, el estudio experimental se plantea de la siguiente manera: Partiendo de un hormigón dosificado según la ACI para que alcance una resistencia a compresión de 210 kg/cm² y haciendo que dicha dosificación cumpla con los parámetros principales en los que se basa el hormigón cavernoso, como ser: La relación agua/cemento entre 0.4-0.5 y que la granulometría contenga partículas con tamaño máximo de 30 mm, se realizaron varias dosificaciones en las cuáles el estudio en objeto fue la reducción de la cantidad de agregado fino existente en la mezcla en los siguientes porcentajes: 20%, 40%, 60%, 80%, 90% y 95% medidos en peso, basándonos en la teoría que un hormigón se llama cavernoso cuando contienen en la mezcla hasta 10% de agregado fino.

Se elaboraron cuatro probetas cilíndricas con medidas estandarizadas de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura para cada reducción de agregado fino.

Se practicó el ensayo con dos tipos diferentes de agregado grueso:

- Agregado grueso de canto rodado proveniente del río Tarija en el sitio donde se juntan tres afluentes (Guadalquivir, Santa Ana y Camacho).
- Agregado grueso chanchado proveniente del banco de agregados de la empresa Erika Srl.

3.3. Dosificación de la mezcla según ACI-211

En la dosificación del hormigón o diseño de mezclas se consideran los siguientes aspectos: la relación agua- cemento (a/c), la resistencia requerida, el asentamiento, el tamaño máximo del agregado, el contenido de aire en caso de ser necesario, las condiciones de exposición del concreto y las condiciones de colocación. El método que se utilizó para la dosificación de las mezclas para los ensayos realizados en el trabajo de investigación fue el

recomendado por el comité ACI 211, que se basa en la utilización de tablas, ábacos y fórmulas.

Para el uso de la dosificación por el método ACI 211 primeramente se necesitan las características de los agregados como ser:

- Módulo de finura del agregado fino.
- Peso unitario compactado del agregado grueso.
- Pesos específicos del agregado fino y del agregado grueso.
- Porcentaje de absorción de la arena y de la grava.
- Humedad natural de la arena y de la grava.
- Tamaño máximo del agregado grueso.
- Tamaño máximo nominal del agregado grueso.
- Peso específico del cemento.

Se determina cual será la resistencia de diseño con la que se quiere dosificar, y seguidamente se define la resistencia característica entrando a la Tabla N°3.5:

TABLA N°3.5

Resistencia de Diseño cuando no hay datos que permitan determinar la desviación estándar

Resistencia específica f_{ck} en (kg/cm²)	Resistencia de diseño de la mezcla f_{cm} en (kg/cm²)
Menos de 210 kg/cm ²	$f_{ck} + 70 \text{ kg/cm}^2$
De 210 a 350 kg/cm ²	$f_{ck} + 85 \text{ kg/cm}^2$
Más de 350 kg/cm ²	$f_{ck} + 100 \text{ kg/cm}^2$

Fuente: Método de dosificación de mezclas ACI 211

Luego se elige el asentamiento y la relación agua/cemento (a/c) que tendrá la mezcla siguiendo las Tablas N°3.6 y N°3.7:

TABLA N°3.6

Asentamiento recomendado para diversos tipos de construcción y sistemas de colocación y compactación.

Consistencia	Asentamiento mm.	Ejemplo de Tipo de construcción	Sistema de colocación	Sistema de compactación
Muy seca	0-20	Prefabricados de alta resistencia, revestimiento de pantallas de cimentación	Con vibradores de formaleta; hormigones de proyección neumática (lanzados)	Secciones sujetas a vibración extrema, puede requerirse presión
Seca	20-35	Pavimentos	Pavimentadoras con terminadora vibratoria	Secciones sujetas a vibración intensa
Semi - seca	35-50	Pavimentos, fundaciones en hormigón simple	Colocación con máquinas operadas manualmente	Secciones simplemente reforzadas, con vibración
Media	50-100	Elementos compactados a mano, losas, muros, vigas	Colocación manual	Secciones medianamente reforzadas, sin vibración
Húmeda	100-150	Elementos estructurales esbeltos	Bombeo	Secciones bastante reforzadas, sin vibración
Muy húmeda	150 o más	Elementos muy esbeltos, pilotes fundidos "in situ"	Tubo-embudo Tremie	Secciones altamente reforzadas, sin vibración (Normalmente no adecuados para vibrarse)

Fuente: Método de dosificación de mezclas ACI 211

TABLA N°3.7

Correspondencia entre la resistencia a compresión a los 28 días de edad y la relación Agua-Cemento para cementos Portland Tipo I, en hormigones sin aire incluido.

Resistencia a la compresión Kg/cm ²	Relación agua-cemento en peso		
	Límite superior	Línea media	Límite inferior
140	-	0.72	0.65
175	-	0.65	0.58
210	0.7	0.58	0.53
245	0.64	0.53	0.49
280	0.59	0.48	0.45
315	0.54	0.44	0.42
350	0.49	0.40	0.38

Fuente: Método de dosificación de mezclas ACI 211

Entrando en la Tabla N°3.8 con el tamaño máximo nominal del agregado y el módulo de finura de la arena se obtiene el volumen de agregado grueso.

Si es que no existiera el valor de módulo de finura se procede a interpolar valores.

TABLA N°3.8

Volumen de agregado grueso, seco y compactado con varilla(a), por volumen de hormigón para diferentes módulos de finura de la arena (b).

Tamaño máximo nominal del agregado		Módulo de finura de la arena			
mm.	pulg.	2.40	2.60	2.80	3.00
9.5	3/8"	0.50	0.48	0.46	0.44
12.7	1/2"	0.59	0.57	0.55	0.53
19.0	3/4"	0.66	0.64	0.62	0.60
25.4	1"	0.71	0.69	0.67	0.65
38.1	1 1/2"	0.75	0.73	0.71	0.69
50.8	2"	0.78	0.76	0.74	0.72
76.1	3"	0.82	0.80	0.78	0.76
152.0	6"	0.87	0.85	0.83	0.81

Fuente: Método de dosificación de mezclas ACI 211

Para la cantidad de agua de mezclado se utiliza las Tablas N°3.9 y N°3.10.

TABLA N°3.9

Requerimiento aproximado de agua de mezclado para diferentes asentamientos y tamaños máximos de agregado, con partículas de forma redondeada y textura lisa.

Asentamiento		Tamaño máximo del agregado, en mm [pulg.]							
		9.51	12.70	19.00	25.40	38.10	50.80	64.00	76.10
		3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/2"	2"	2 1/2"	3"
mm	pulg.	Agua de mezclado, en Kg/m ³ de hormigón							
0	0	213	185	171	154	144	136	129	123
25	1	218	192	177	161	150	142	134	128
50	2	222	197	183	167	155	146	138	132
75	3	226	202	187	172	160	150	141	136
100	4	229	205	191	176	164	154	144	139
125	5	231	208	194	179	168	156	146	141
150	6	233	212	195	182	172	159	150	146
175	7	237	216	200	187	176	165	156	148
200	8	244	222	206	195	182	171	162	154

Fuente: Método de dosificación de mezclas ACI 211

TABLA N°3.10.

Requerimiento aproximado de agua de mezclado para diferentes asentamientos y tamaños máximos de agregado, con partículas de forma angular y textura rugosa.

Asentamiento		Tamaño máximo del agregado, en mm [pulg.]							
		9.51	12.70	19.00	25.40	38.10	50.80	64.00	76.10
		3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/2"	2"	2 1/2"	3"
mm	pulg.	Agua de mezclado, en Kg/m ³ de hormigón							
0	0	223	201	186	171	158	147	141	132
25	1	231	208	194	178	164	154	147	138
50	2	236	214	199	183	170	159	151	144
75	3	241	218	203	188	175	164	156	148

100	4	244	221	207	192	179	168	159	151
125	5	247	225	210	196	183	172	162	153
150	6	251	230	214	200	187	176	15	157
175	7	256	235	218	205	192	181	170	163
200	8	260	240	224	210	197	186	176	168

Fuente: Método de dosificación de mezclas ACI 211

Una vez conseguidas las características de diseño y las características de los agregados se procede al diseño de la mezcla.

Se realizan los siguientes cálculos para la alcanzar las proporciones de los pesos secos de los ingredientes.

$$\text{Peso agregado grueso (Pag)} = \frac{\frac{b}{b_0}}{PUC}$$

$$\text{Peso cemento (Pc)} = \frac{A}{a/c}$$

$$\text{Volumen de agregado grueso (Vag)} = \frac{Pag}{\gamma g}$$

$$\text{Volumen de cemento (Vc)} = \frac{Pc}{\gamma c}$$

$$\text{Volumen de arena (Vaf)} = 1000 - Vc - A - Vag$$

$$\text{Peso del agregado fino (Paf)} = Vaf * \gamma f$$

Para la obtención de los pesos húmedos de los agregados se aplican las subsiguientes fórmulas:

$$\text{Peso húmedo de la arena (Pah)} = Paf * (1 + Ha)$$

$$\text{Peso húmedo de la grava (Phg)} = Pag * (1 + Hg)$$

Finalmente se realiza una corrección por agua de la mezcla para lograr las proporciones de la mezcla.

$$\text{Agua corregida a la grava (Acg)} = Pag * (Ag - Hg)$$

$$\text{Agua corregida a la arena (Acf)} = Paf * (Aa - Ha)$$

$$\text{Total agua corregida(Atc)} = Acg + Acf$$

Dónde:

b/bo= Volumen agregado grueso/ volumen unitario de hormigón.

PUC= Peso unitario compactado de la grava.

A= Requerimiento de agua.

a/c= Relación agua/cemento.

γg= Peso específico agregado grueso.

γc= Peso específico cemento.

γf= Peso específico agregado fino.

Ha= Humedad de agregado fino.

Hg= Humedad de agregado grueso.

Aa= Absorción arena.

Ag= Absorción grava.

3.4. Curado de probetas

Para obtener un buen hormigón, una vez vaciado el hormigón a los moldes se debe lo debe curar, dentro de un ambiente apropiado, durante las primeras etapas de endurecimiento.

El curado es el nombre que se le da a los procedimientos utilizados para promover la hidratación del cemento; consiste en un control de temperatura y en el movimiento de humedad desde la superficie hacia el interior del hormigón.

Al cabo de 24 horas se desmoldan las probetas y se colocan en piscinas con agua, cuya temperatura debe permanecer entre 18 y 24 °C, donde se las deja reposar generalmente entre 7 y 28 días.

Para el curado de las probetas se tuvo una limitación en el procedimiento, debido a que no se contaba con la piscina de agua disponible los 28 días en el laboratorio, se curó las probetas 14 días.

3.5. Ensayos de rotura de probetas

Este método de ensayo consiste en aplicar una carga axial de compresión al cilindro moldeado a una razón de carga en el espécimen dentro del rango de 0.15 a 0.35 MPa/seg antes que la falla ocurra. El esfuerzo de compresión de las probetas es calculado dividiendo la carga máxima conseguida durante el ensayo por el área de la sección transversal de la probeta.

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

El ensayo de rotura de probetas a compresión esta basando según la norma ASTM C39.

Se realizó el ensayo a los 28 días de edad de todas las muestras.

4. CAPITULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

4.1. Resultados obtenidos

4.1.1. Resultados del ensayo resistencia a compresión

Una vez realizado el ensayo de Resistencia a compresión se procede a presentar los resultados obtenidos donde se muestra la resistencia promedio para cada muestra con reducción de agregado fino para 2 tipos diferentes de agregado grueso: Canto rodado (R) y Chancado (C).

TABLA N°4.1

Resistencia a compresión de probetas realizadas con agregado grueso: Canto rodado

Probeta N°	Especificación	Edad [días]	Resistencia Proyección 28 días [kg/cm ²]	Promedio Resistencia [kg/cm ²]
1	Probeta #1 100%(R)	28	231.15	221.71
2	Probeta #2 100%(R)	28	210.19	
3	Probeta #3 100%(R)	28	218.97	
4	Probeta #4 100%(R)	28	226.53	
5	Probeta #9 80%(R)	28	205.00	221.42
6	Probeta #10 80%(R)	28	215.80	
7	Probeta #11 80%(R)	28	235.58	
8	Probeta #12 80%(R)	28	229.30	
9	Probeta #17 60%(R)	28	219.53	220.08
10	Probeta #18 60%(R)	28	227.16	
11	Probeta #19 60%(R)	28	220.58	
12	Probeta #20 60%(R)	28	213.03	
13	Probeta #25 40%(R)	28	180.67	198.38
14	Probeta #26 40%(R)	28	186.90	
15	Probeta #27 40%(R)	28	213.09	
16	Probeta #28 40%(R)	28	212.86	
17	Probeta #33 20%(R)	28	108.27	93.75
18	Probeta #34 20%(R)	28	95.18	
19	Probeta #35 20%(R)	28	54.92	
20	Probeta #36 20%(R)	28	116.64	
21	Probeta #41 10%(R)	28	67.61	93.12
22	Probeta #42 10%(R)	28	61.78	
23	Probeta #43 10%(R)	28	137.58	
24	Probeta #44 10%(R)	28	105.50	
25	Probeta #49 5%(R)	28	88.68	92.56
26	Probeta #50 5%(R)	28	120.33	
27	Probeta #51 5%(R)	28	70.75	
28	Probeta #52 5%(R)	28	90.46	

Fuente: Elaboración propia

TABLA N°4.2

Resistencia a compresión de probetas realizadas con agregado grueso: Chancado

Probeta N°	Especificación	Edad [días]	Resistencia Proyección 28 días [kg/cm²]	Promedio Resistencia [kg/cm²]
1	Probeta #5 100%(C)	28	220.46	224.39
2	Probeta #6 100%(C)	28	219.72	
3	Probeta #7 100%(C)	28	226.70	
4	Probeta #8 100%(C)	28	230.68	
5	Probeta #13 80%(C)	28	222.96	223.86
6	Probeta #14 80%(C)	28	222.14	
7	Probeta #15 80%(C)	28	219.55	
8	Probeta #16 80%(C)	28	230.80	
9	Probeta #21 60%(C)	28	195.06	199.17
10	Probeta #22 60%(C)	28	197.56	
11	Probeta #23 60%(C)	28	210.79	
12	Probeta #24 60%(C)	28	193.28	
13	Probeta #29 40%(C)	28	172.88	198.87
14	Probeta #30 40%(C)	28	204.26	
15	Probeta #31 40%(C)	28	198.43	
16	Probeta #32 40%(C)	28	219.89	
17	Probeta #37 20%(C)	28	115.02	113.62
18	Probeta #38 20%(C)	28	123.33	
19	Probeta #39 20%(C)	28	94.83	
20	Probeta #40 20%(C)	28	121.31	
21	Probeta #45 10%(C)	28	104.06	93.38
22	Probeta #46 10%(C)	28	84.91	
23	Probeta #47 10%(C)	28	117.91	
24	Probeta #48 10%(C)	28	66.63	
25	Probeta #53 5%(C)	28	83.49	91.89
26	Probeta #54 5%(C)	28	120.27	
27	Probeta #55 5%(C)	28	77.30	
28	Probeta #56 5%(C)	28	86.48	

Fuente: Elaboración propia

4.1.2. Resultados de peso específico

Se presentan los resultados experimentales obtenidos en ensayos para determinación del peso específico de las muestras.

El peso específico se lo encuentra con la siguiente fórmula:

$$\gamma = \frac{\text{Peso promedio}}{\text{Volumen de probeta}}$$

En las Tablas N°4.3 y N°4.4 la columna llamada “Peso específico [%] en relación a probeta patrón” fue encontrada bajo la siguiente relación:

$$\gamma [\%] = \frac{\gamma_{\text{con reducción de finos}}}{\gamma_{\text{patrón (100\% A. F.)}}} * 100$$

Con el único fin de hallar el peso que reduce el hormigón si es que se quita el agregado fino expresado en porcentaje.

En la siguiente columna se utilizó la subsiguiente fórmula:

$$\text{Reducción [\%]} = 100 - \gamma [\%]$$

TABLA N°4.3

Peso específico de probetas con agregado grueso: Canto rodado

Probeta N°	Especificación	Peso probeta antes de rotura [kg]	Promedio peso [kg]	Peso específico [kg/m³]	γ [%] en relación a probeta patrón	Reducción γ[%]
1	Probeta #1 100%(R)	13.07	13.05	2461.36	100.00	0.00
2	Probeta #2 100%(R)	13.05				
3	Probeta #3 100%(R)	13.10				
4	Probeta #4 100%(R)	12.99				
5	Probeta #9 80%(R)	12.90	12.96	2443.68	99.28	0.72
6	Probeta #10 80%(R)	12.92				
7	Probeta #11 80%(R)	13.12				
8	Probeta #12 80%(R)	12.89				
9	Probeta #17 60%(R)	12.89	12.91	2435.90	98.97	1.03
10	Probeta #18 60%(R)	12.94				
11	Probeta #19 60%(R)	12.95				
12	Probeta #20 60%(R)	12.88				
13	Probeta #25 40%(R)	12.55	12.56	2368.46	96.23	3.77
14	Probeta #26 40%(R)	12.67				
15	Probeta #27 40%(R)	12.55				
16	Probeta #28 40%(R)	12.47				
17	Probeta #33 20%(R)	11.34	11.24	2120.65	86.16	13.84
18	Probeta #34 20%(R)	11.34				
19	Probeta #35 20%(R)	10.94				
20	Probeta #36 20%(R)	11.36				
21	Probeta #41 10%(R)	11.29	11.23	2118.76	86.08	13.92
22	Probeta #42 10%(R)	11.16				
23	Probeta #43 10%(R)	11.19				
24	Probeta #44 10%(R)	11.30				
25	Probeta #49 5%(R)	11.23	11.22	2116.41	85.99	14.01
26	Probeta #50 5%(R)	11.15				
27	Probeta #51 5%(R)	11.29				
28	Probeta #52 5%(R)	11.21				

Fuente: Elaboración propia

TABLA N°4.4

Peso específico de probetas con agregado grueso: Chancado

Probeta N°	Especificación	Peso probeta antes de rotura [kg]	Promedio peso [kg]	Peso específico [kg/m ³]	γ [%] en relación a probeta patrón	Reducción γ[%]
1	Probeta #5 100%(C)	12.89	12.87	2427.17	100.00	0.00
2	Probeta #6 100%(C)	12.90				
3	Probeta #7 100%(C)	12.87				
4	Probeta #8 100%(C)	12.81				
5	Probeta #13 80%(C)	12.87	12.79	2412.55	99.40	0.60
6	Probeta #14 80%(C)	12.86				
7	Probeta #15 80%(C)	12.78				
8	Probeta #16 80%(C)	12.65				
9	Probeta #21 60%(C)	11.99	11.99	2261.65	93.18	6.82
10	Probeta #22 60%(C)	12.04				
11	Probeta #23 60%(C)	12.04				
12	Probeta #24 60%(C)	11.89				
13	Probeta #29 40%(C)	12.09	11.90	2243.73	92.44	7.56
14	Probeta #30 40%(C)	11.82				
15	Probeta #31 40%(C)	11.78				
16	Probeta #32 40%(C)	11.89				
17	Probeta #37 20%(C)	11.50	11.54	2177.24	89.70	10.30
18	Probeta #38 20%(C)	11.62				
19	Probeta #39 20%(C)	11.52				
20	Probeta #40 20%(C)	11.53				
21	Probeta #45 10%(C)	10.78	10.64	2007.47	82.71	17.29
22	Probeta #46 10%(C)	10.37				
23	Probeta #47 10%(C)	10.80				
24	Probeta #48 10%(C)	10.62				
25	Probeta #53 5%(C)	10.62	10.63	2005.12	82.61	17.39
26	Probeta #54 5%(C)	10.66				
27	Probeta #55 5%(C)	10.53				
28	Probeta #56 5%(C)	10.71				

Fuente: Elaboración propia

4.2. Determinación de curvas

Para relacionar las variables estudiadas como ser el peso específico y la resistencia a compresión con el porcentaje de finos que posea la mezcla, se realizaron gráficas con los resultados obtenidos, de igual manera se realizó un ajuste de los datos con funciones de 1^{er} y 2^{do} grado, que fueron las que más se ajustaron a nuestros datos alcanzados en laboratorio.

4.2.1. Porcentaje de finos vs. Peso específico

TABLA N°4.5

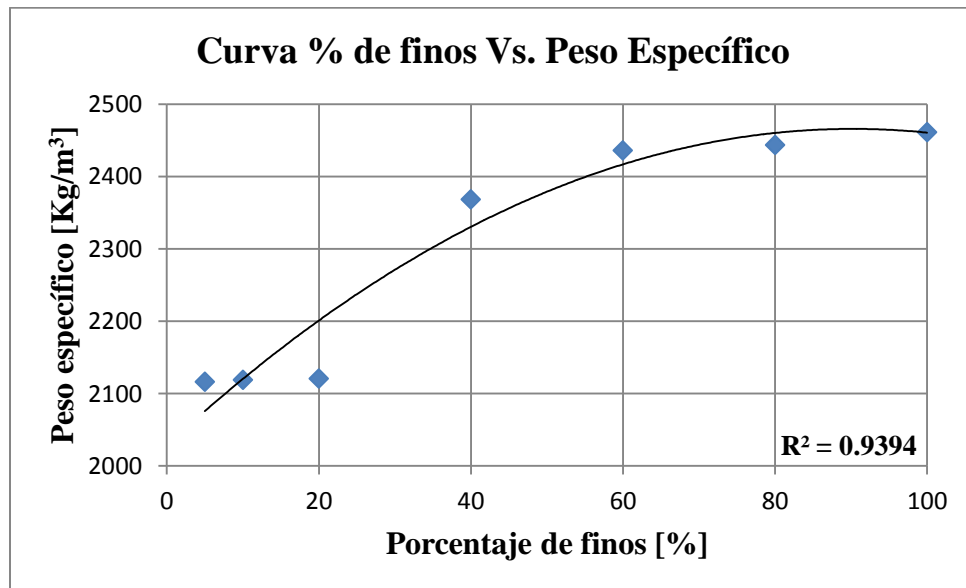
Relación entre el porcentaje de finos existente en la mezcla y su peso específico (canto rodado)

Porcentaje de finos [%]	Peso específico [Kg/m ³]
100	2461.36
80	2443.68
60	2435.90
40	2368.46
20	2120.65
10	2118.76
5	2116.41

Fuente: Elaboración propia

GRÁFICO N°4.1

Influencia del porcentaje de finos en el peso específico de las muestras (canto rodado)



Fuente: Elaboración propia

En el Gráfico N°4.1 se observa que el peso específico en relación al porcentaje de finos que contenga la mezcla varía parabólicamente con una correlación de 0.93.

Se observa que en el rango de 5-20% de existencia de agregado fino el peso específico permanece aproximadamente constante. De igual manera se observa que para un porcentaje de finos entre 20-60%, se tiene un incremento del peso específico.

En el rango de 5-20% se presentan los valores de menor peso específico, esto puede indicar que las muestras presentan mayor porosidad en su estructura, mientras que entre 60-100% de contenido de agregado fino en la mezcla, este puede ocupar los vacíos y exponer mayor peso específico.

En la Tabla N° 4.6 se muestra la relación entre el porcentaje de finos existente en la mezcla y su peso específico con agregado grueso tipo chancado.

TABLA N°4.6

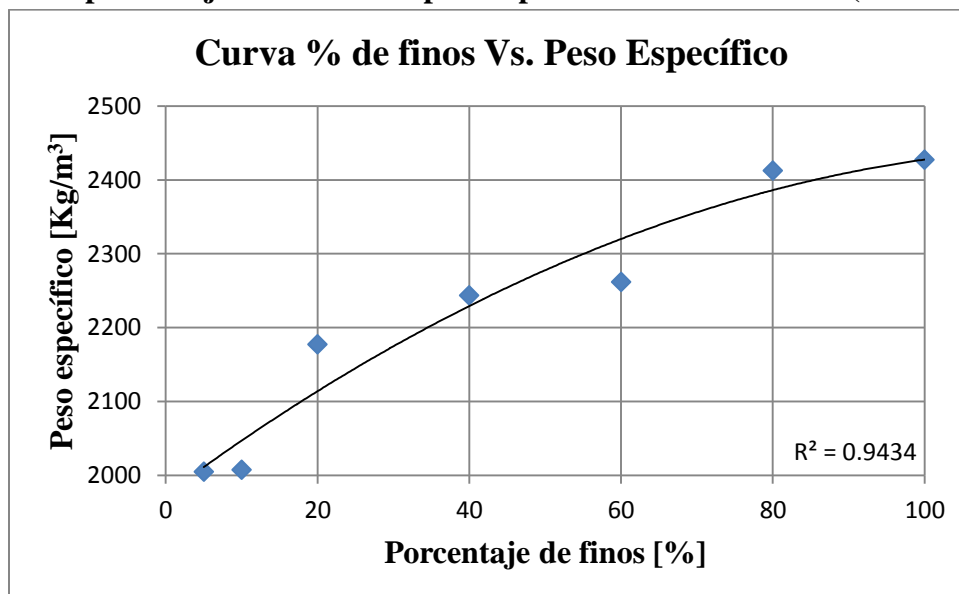
Relación entre el porcentaje de finos existente en la mezcla y su peso específico (chancado)

Porcentaje de finos [%]	Peso específico [Kg/m³]
100	2427.17
80	2412.55
60	2261.65
40	2243.73
20	2177.24
10	2007.47
5	2005.12

Fuente: Elaboración propia

GRÁFICO N°4.2

Influencia del porcentaje de finos en el peso específico de las muestras (chancado)



Fuente: Elaboración propia

Se puede notar que el peso específico de la mezcla incrementa apreciablemente en todo el rango de contenido de porcentaje de finos en la mezcla. En donde se adquiere el menor peso específico cuando el contenido de finos es mínimo y el máximo cuando el porcentaje de finos es al 100%.

4.2.2. Porcentaje de finos vs. Resistencia a compresión

TABLA N°4.7

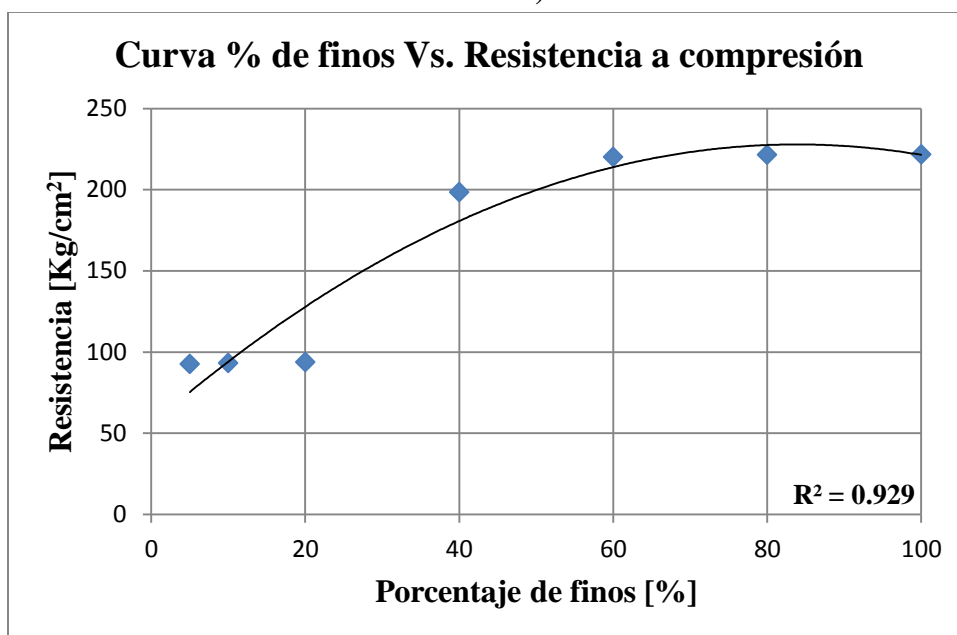
Relación entre el porcentaje de finos existente en la mezcla y su resistencia a compresión (canto rodado)

Porcentaje de finos [%]	Resistencia [Kg/cm ²]
100	221.71
80	221.42
60	220.08
40	198.38
20	93.75
10	93.12
5	92.56

Fuente: Elaboración propia

GRÁFICO N°4.3

Influencia del Porcentaje de agregado fino en la Resistencia a compresión (canto rodado)



Fuente: Elaboración propia

Cuando el contenido de agregado fino en la mezcla es el mínimo en un rango de 5-10% hasta un 20% la resistencia a compresión permanece casi constante, mientras que en el rango de 20-60% la resistencia a compresión aumenta sustancialmente.

Se observa que es una gráfica parabólica, con correlación de 0.93 porque es la función que más se ajusta a la gráfica, pero los valores se comportan prácticamente de manera lineal.

TABLA N°4.8

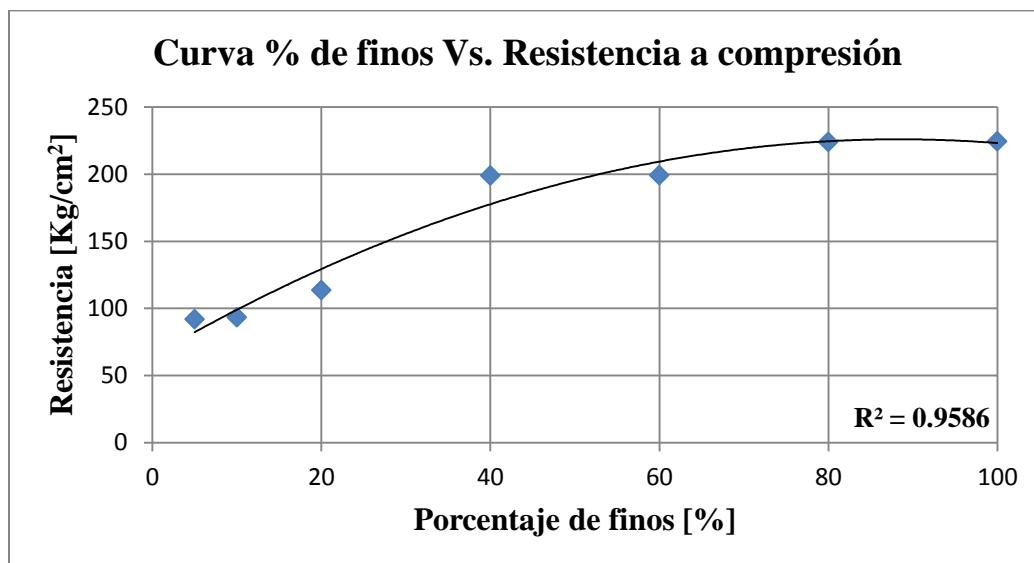
Relación entre el porcentaje de finos existente en la mezcla y su resistencia a compresión (chancado)

Porcentaje de finos [%]	Resistencia [Kg/cm ²]
100	224.39
80	223.86
60	199.17
40	198.87
20	113.62
10	93.38
5	91.89

Fuente: Elaboración propia

GRÁFICO N°4.4

Influencia del Porcentaje de agregado fino en la Resistencia a compresión (chancado)



Fuente: Elaboración propia

4.2.3. Peso específico vs. Resistencia a compresión

A partir de los resultados mostrados anteriormente se muestra la relación que existe entre la resistencia a compresión y el peso específico de las muestras.

TABLA N°4.9

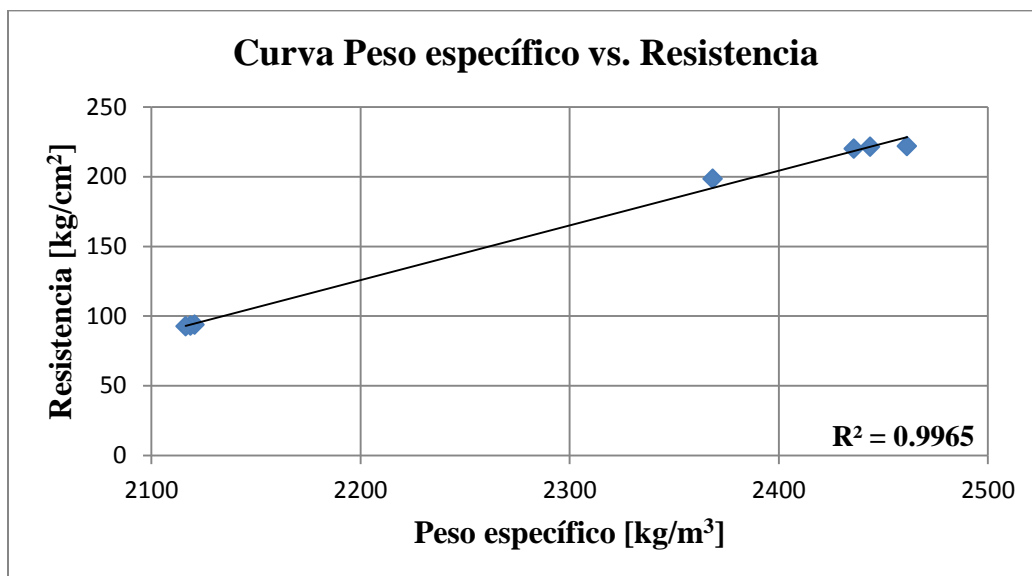
Relación entre peso específico y resistencia a compresión (canto rodado)

Existencia de finos [%]	Peso específico [Kg/m³]	Resistencia [Kg/cm²]
100	2461.36	221.71
80	2443.68	221.42
60	2435.90	220.08
40	2368.46	198.38
20	2120.65	93.75
10	2118.76	93.12
5	2116.41	92.56

Fuente: Elaboración propia

GRÁFICO N°4.5

Curva Peso específico Vs. Resistencia a compresión (canto rodado)



Fuente: Elaboración propia

Se obtiene una relación lineal entre ambas variables, que indica que el peso específico y la resistencia disminuyen gradualmente mientras se reduce el contenido de agregado fino en las muestras.

TABLA N°4.10

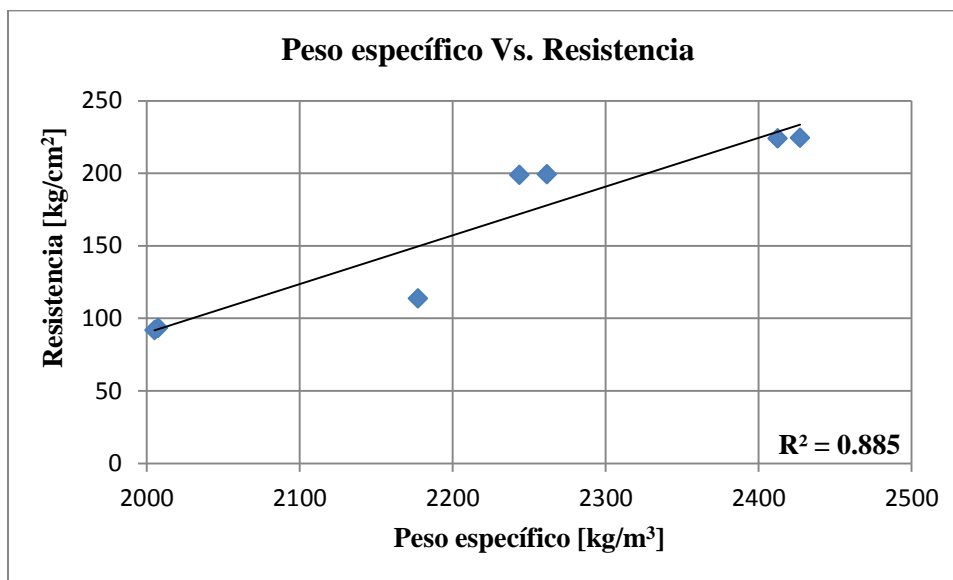
Relación entre peso específico y resistencia a compresión (chancado)

Existencia de finos [%]	Peso específico [Kg/m³]	Resistencia [Kg/cm²]
100	2427.17	224.39
80	2412.55	223.86
60	2261.65	199.17
40	2243.73	198.87
20	2177.24	113.62
10	2007.47	93.38
5	2005.12	91.89

Fuente: Elaboración propia

GRÁFICO N°4.6

Curva Peso específico Vs. Resistencia a compresión (chancado)



Fuente: Elaboración propia

Al igual que en el caso de las probetas ensayadas con agregado grueso tipo canto rodado, se observa una gráfica lineal que relaciona el peso específico de las muestras con la resistencia a compresión cuando se dosifica con agregado grueso proveniente de chancadora donde los datos se encuentran más dispersos, obteniendo una correlación de 0.88.

4.3. Análisis de resultados de variables en estudio

Se puede observar que cuando se reduce el agregado fino a un hormigón dosificado de manera convencional incluyendo los parámetros de un hormigón cavernoso, ya sea en el cumplimiento de ciertas relaciones como ser la relación Agua/Cemento, el tamaño máximo de sus partículas, como en su forma de mezclado y vaciado, la resistencia disminuye en función a la cantidad de agregado fino que posea la mezcla, si esta cantidad se reduce entonces la resistencia en el hormigón de igual manera disminuirá su valor.

Uno de los factores que influyen en el incremento de la resistencia a compresión mientras se aumenta el porcentaje de agregado fino contenido en la mezcla es la compactación, cuando hay más agregado fino que trabaja conjuntamente con la pasta de cemento existe mayor superficie específica produciendo una mayor adherencia y un mejor

ordenamiento de las partículas. Por tanto, a mayor compacidad se produce una mayor resistencia a compresión.

La resistencia del hormigón está influida por el volumen de vacíos dentro de este. Al aumentar la compacidad disminuye la relación de vacíos.

Lo mismo ocurre con el peso específico del hormigón estudiado. Mientras se reduce la cantidad de agregado fino que posea la dosificación de la mezcla dicho peso reducirá en valor. Provocando así que el hormigón sea más liviano.

También podemos observar en la Tabla N°4.1 cuando las probetas son dosificadas con agregado grueso de canto rodado, las resistencias promedios en la mayoría de los porcentajes de agregado fino que posee la mezcla son menores que en la Tabla N°4.2 donde se muestran los valores de resistencias a compresión de probetas realizadas con agregado grueso chancado.

Se puede ver en la Tabla N°4.4 donde se presentan los resultados de peso específico de las probetas realizadas con agregado grueso chancado que son más livianas que las probetas practicadas con agregado grueso de canto rodado (Tabla N°4.3). Podemos decir que la forma del agregado grueso con el que se dosifica tiene gran influencia a la hora de adquirir resultados, de igual manera tiene bastante importancia la caracterización de los agregados.

4.4. Contrastación de hipótesis

En las Tablas N°4.3 y 4.4 se puede notar que existe una reducción en el peso del hormigón cuando se disminuye la cantidad de agregado fino contenido en la mezcla.

Para que un hormigón sea considerado cavernoso debe contener hasta máximo un 10% de contenido de agregado fino en el diseño de la mezcla.

En la Tabla N° 4.3 se puede observar que cuando el hormigón tiene un 10% de agregado fino en la mezcla este reduce en peso un 13.92% con relación a la dosificación patrón, mientras que cuando la mezcla posee un 5% de agregado fino la reducción del peso específico es aún menor, alcanzando un valor de 14.01% comparado con la mezcla patrón,

por lo que se puede deducir que entre el 5-10% de contenido de agregado fino no existe una disminución significativa del peso. Estos resultados presentados son para hormigones con agregado grueso de canto rodado.

En lo que respecta al hormigón cavernoso con tipo de agregado grueso chancado, para una mezcla con contenido de 10% de agregado fino, la reducción del peso específico es de 17.29% con respecto a la patrón, y cuando el contenido de agregado fino en la mezcla es de 5% la disminución de peso específico del hormigón es de 17.39%.

Por otra parte, la resistencia a compresión disminuye considerablemente al disminuir el contenido de agregado fino en el hormigón cavernoso. En la Tabla N^o4.1 se evidencian los valores de resistencia a compresión del hormigón dosificado con agregado grueso canto rodado, para un hormigón con 10% de agregado fino contenido en la mezcla la resistencia promedio es de 93.12 kg/cm² y para un contenido de 5% de agregado fino la resistencia es de 92.56 kg/cm², entrando en el rango establecido en la hipótesis planteada de 15-140 kg/cm².

En la Tabla N^o 4.2 podemos observar las resistencias para un hormigón con 10% de contenido de agregado fino nos presenta un valor de 93.39 kg/cm² y para un hormigón con 5% de agregado fino en la mezcla nos muestra un valor de 91.89 kg/cm².

Entre 5-10% de contenido de agregado fino la diferencia del peso específico ya sea de un hormigón dosificado con agregado grueso canto rodado o chancado es insignificante por lo que resulta mejor un hormigón cavernoso con 10% de contenido de agregado fino ya que reduce bastante el peso específico y la resistencia a compresión es un poco mayor.

4.5. Conclusiones

Una vez finalizado el trabajo de laboratorio y definidas las propiedades físicas y mecánicas del hormigón cavernoso, se puede concluir que:

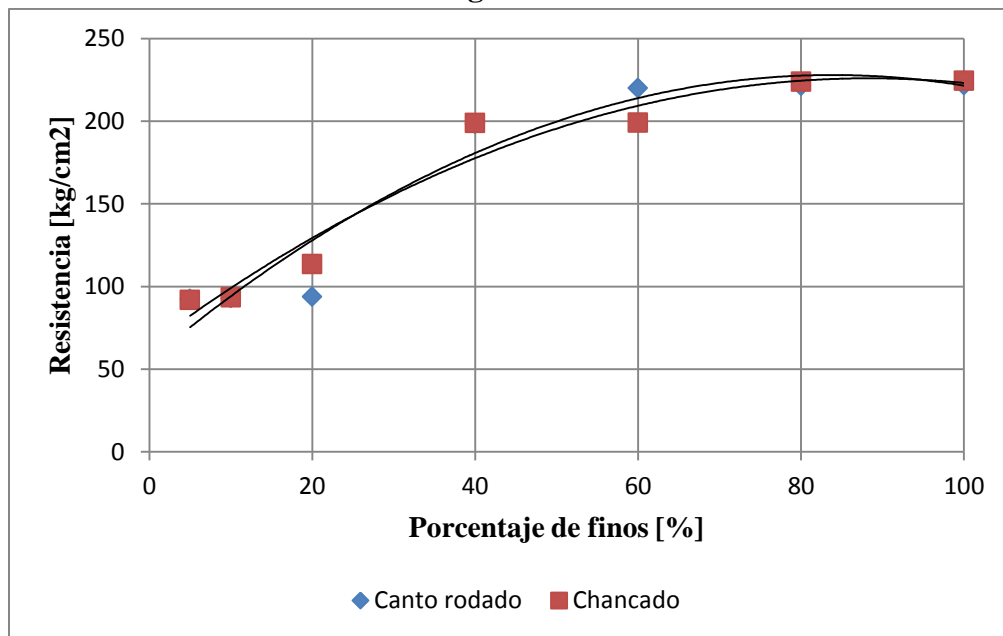
- Desde el punto de vista de la resistencia a compresión de la mezcla, el tipo de agregado (canto rodado/chancado) no muestra influencia significativa en la resistencia a compresión de las probetas en el rango total de porcentaje de finos

analizado. Aparentemente la forma y textura de la superficie de los agregados ejerce gran influencia en la resistencia del hormigón pero se ve más afectada la resistencia a flexión que la resistencia a compresión.

Claramente se puede observar en el Gráfico N°4.7 una similitud en valores de resistencia para las dos diferentes mezclas.

GRÁFICO N°4.7

Relación entre el contenido de agregado fino y la resistencia para 2 tipos de agregado grueso



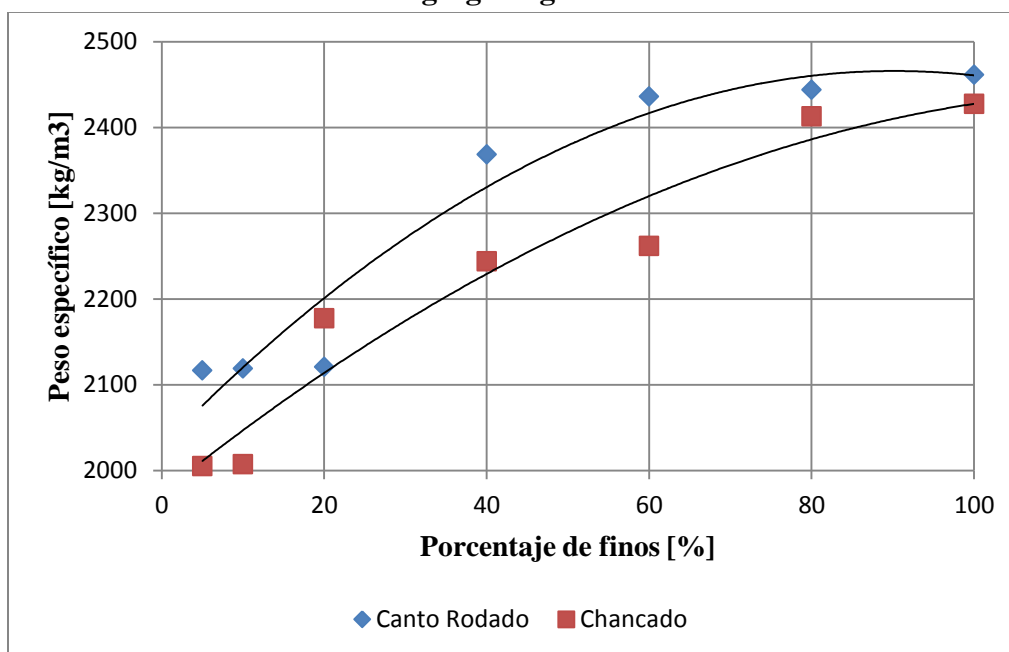
Fuente: Elaboración Propia

- Experimentalmente se pudo observar que para el rango de interés del presente estudio (5-10% de contenido de agregado fino), con agregado grueso chancado se obtienen probetas más livianas que para una mezcla estudiada en el mismo rango pero dosificada con el tipo de agregado grueso canto rodado.

En la Gráfica N°4.8 se muestra una comparación de la influencia de la forma del agregado (canto rodado/ chancado) con respecto al peso específico de las muestras para los diferentes porcentajes de agregado fino contenido en la mezcla.

GRÁFICO N°4.8

Relación entre el contenido de agregado fino y el peso específico para 2 tipos de agregado grueso



Fuente: Elaboración Propia

- De lo citado anteriormente se puede concluir que una mezcla con agregado grueso chancado, será más liviana y de resistencia similar en comparación con una mezcla de agregado rodado. Por tanto, el agregado grueso tipo chancado con formas angulares tiene mejor comportamiento que en el hormigón que un agregado grueso de canto rodado.
- El hormigón con reducción de agregado fino se convierte en “No estructural”, con respecto a la resistencia a la compresión, cuando se le reduce el agregado fino en un 76% ya sea dosificado con los dos tipos de agregado grueso estudiados. Por tanto el hormigón cavernoso tiene una aplicación con fines no estructurales. El uso principal del hormigón cavernoso es en muros que no soportan carga, muros interiores en estructuras porticadas, fabricación de bloques y en contra pisos para losas.

- El costo por m³ de hormigón cavernoso con 5% y 10% de contenido de agregado fino reduce un 6% comparado con la dosificación patrón en estudio.
- Es importante determinar una granulometría apropiada, cuyo tamaño máximo de agregado contemple los rangos de 5-30mm, debido a que tamaños mayores al mencionado son poco aconsejables, porque permite que presente una estructura demasiado porosa, debido al elevado porcentaje de vacíos.
- La forma de mezclado de los componentes de este tipo de hormigones es muy importante, ya que la mezcla puede presentar segregación de materiales ocasionando una mala resistencia, por el exagerado tiempo de mezclado o mala forma de introducción de los componentes a la mezcladora ocasionando que la pasta de cemento se adhiera a las paredes. El tiempo de mezclado luego de introducidos todos los componentes es de 2 a 3 minutos o el necesario para obtener una mezcla de color uniforme.
- Al igual que en el mezclado al momento de vaciado y colocado en las probetas, la compactación con la varilla debe practicarse manera suave ya que la pasta de cemento tenderá a separarse del agregado. Al momento del enrasado no se debe forzar el acomodo de las partículas.
- El hormigón cavernoso, debido a su porosidad, aporta diferentes propiedades, en relación a otros hormigones, como son: Capacidad de drenaje, aislamiento térmico, por lo que podría tener diferentes usos como ser: pavimentos alrededor de árboles y en estacionamientos domésticos de automóviles.

4.6. Recomendaciones

En base a los resultados logrados en los diferentes ensayos se pueden mencionar los siguientes principios de diseño y construcción recomendados:

Utilizar agregados cuyo tamaño máximo de material grueso varíe entre 5-30 mm.

Realizar correctamente todos los ensayos de caracterización en los materiales componentes del hormigón, para así conseguir una buena dosificación.

Se debe tener mucho cuidado al manipular las probetas que se encuentren listas para su rotura, en lo posible evitar los impactos, porque puede provocar un decremento en la resistencia a compresión.

En el momento de la compactación de las probetas se debe cumplir un apisonado bastante suave entre las capas de vaciado, para evitar la segregación de los materiales.

No exceder en el tiempo de mezclado ya que la mezcla puede iniciar su proceso de fraguado y se hace difícil el manipuleo de la mezcla.

Efectuar la dosificación de manera precisa en especial en la cantidad de agua de mezclado ocasionando una mezcla fluida, en la que mortero se podría separar del agregado grueso.

Para continuar con el estudio del comportamiento del hormigón cavernoso se sugiere una investigación que podría realizarse en el futuro:

- Realizar mezclas diferentes relaciones Agua/Cemento hasta encontrar la óptima.