

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Generalidades

El hormigón o concreto convencional, se produce mediante la mezcla de tres componentes esenciales, cemento Pórtland, agua y agregados, a los cuales eventualmente se incorpora un cuarto componente que genéricamente se designa como aditivo. Al mezclar estos componentes y producir lo que se conoce como una revoltura de concreto, se introduce de manera simultánea un quinto componente representado por el aire.

La mezcla íntima de los componentes del concreto produce una masa plástica que puede ser moldeada y compactada con relativa facilidad, pero gradualmente pierde esta característica hasta que al cabo de algunas horas se torna rígida y comienza a adquirir el aspecto, comportamiento y propiedades de un cuerpo sólido, para convertirse finalmente en el material mecánicamente resistente que es el concreto endurecido.

Para seleccionar las proporciones de los materiales integrantes de la unidad cúbica de concreto, debe realizarse un estudio minucioso de las características de los mismos, para luego continuar con la dosificación y hacer pruebas de ajustes necesarios mediante mezclas de prueba en laboratorio y las correcciones necesarias en obra.

La importancia de los agregados radica en que constituyen aproximadamente entre el 60% y 80 % del volumen del concreto y por lo tanto su calidad es de considerable importancia no solamente desde el punto de vista económico sino también desde otros, no menos importantes, como la resistencia,

durabilidad, trabajabilidad y en general del comportamiento estructural del concreto. El volumen absoluto del cemento está comprendido usualmente entre el 7% y 15% del volumen total del concreto, es el componente activo de la mezcla y por tanto influye en todas sus características. El agua de mezclado forma aproximadamente entre el 14% y 21% del volumen total del concreto de donde, la cantidad de agua que se utiliza para el mezclado es mayor que la que se necesita para la hidratación completa.

La selección de las proporciones de los materiales integrantes de la unidad cúbica de concreto, conocida usualmente como diseño de la mezcla, puede ser definida como el proceso de selección de los ingredientes más adecuados y de la combinación más conveniente y económica de los mismos, con la finalidad de obtener un producto que en el estado no endurecido tenga la trabajabilidad y consistencia adecuadas; y que endurecida cumpla con los requisitos establecidos por el diseñador.

El banco de agregados a caracterizar, es del río San Juan Del Oro ubicado a 100 Km. de La Ciudad de Tarija y a 1 km. de la población de El Puente, entre las comunidades las Carreras y Ircalaya, el río San Juan del Oro es un Límite entre los departamentos de Tarija- Chuquisaca

1.2. Antecedentes

El concreto de cemento Pórtland es uno de los más usados y el más versátil de los materiales de construcción. Esta versatilidad permite su utilización en todo tipo de formas estructurales, así como en los climas más variados. En la práctica, las principales limitaciones del concreto están dadas no por el material sino por quien debe utilizarlo.

Ello constituye un permanente desafío para el ingeniero responsable de la selección de las proporciones de los materiales integrantes de la unidad cúbica de concreto.

El uso de materiales cementantes se remonta a tiempos muy antiguos. El concreto más viejo que se conoce data aproximadamente del año 5600 A.C. Las antiguas civilizaciones fueron mejorando las propiedades de estos materiales y utilizado para la construcción de monumentos y edificaciones; a medida del transcurso del tiempo se fue perfeccionando la técnica hasta que en 1824 se fabricó el cemento Pórtland.

El cemento Pórtland es artificial y de calidad muy superior al usado en la época romana, en la última década del siglo XIX y especialmente en lo que va de este siglo, se ha extendido considerablemente el consumo del cemento Pórtland y del Hormigón.

Con la introducción del horno rotatorio para la calcinación de piedra caliza, así como los experimentos realizados por los franceses Vicat y Le Clatelier (a comienzos de 1900), se pudo producir el cemento Pórtland en cantidades comerciales de tal manera que más gente pudo tener acceso a él.

Duff Abrams, en 1918, como conclusión de un programa de investigaciones realizado en el Lewis Institute de la ciudad de Chicago, desarrolla la primera teoría coherente sobre el proporcionamiento de mezcla de concreto al demostrar, para las resistencias a compresión para esa época, la interdependencia entre la resistencia y el volumen de agua por unidad de cemento. Este estudio da nacimiento a la conocida “Ley de la relación agua/cemento” o “Ley de Abrams”.

Estos significativos avances en la tecnología del concreto se han expandido mediante la investigación exhaustiva y el desarrollo de muchas áreas estrechamente relacionadas, incluyendo el uso de aditivos para contrarrestar posibles deficiencias, desarrollar propiedades especiales o lograr una mayor economía.

Hoy encontramos en el concreto uno de los materiales más importantes para construcciones. Es usado en obras viales, obras de arte, edificios y en general en todo tipo de construcciones. Su manufactura se ha refinado requiriendo la atención de ingenieros y técnicos para un adecuado control de su producción, a tal punto que hoy se tienen sofisticadas plantas de dosificación y mezclas automáticas para producir cientos de metros cúbicos por hora.

Aunque hoy en día existen también diversos métodos de diseño de mezclas disponibles, todos ellos son métodos extranjeros que fueron desarrollados por las condiciones del país de origen y por ello, es necesario adaptar tales métodos a las condiciones locales a través de mezclas de prueba en laboratorio y luego hacer los ajustes necesarios en obra.

El método de dosificación utilizado en la presente investigación es: American Concrete Institute ACI 211.1.74, el cual a desarrollado un procedimiento de diseño de mezcla bastante simple, basándose en tablas que se presentarán en el desarrollo del mismo, nos permite obtener los valores de los diferentes materiales que integran la unidad cúbica del hormigón de manera inmediata.

Esta investigación beneficiará a la región: Provincia Méndez del Departamento de Tarija y Provincia Sur Cinti del Departamento de Chuquisaca, con el fin de brindar a la comunidad (Ingenieros, Arquitectos,

Constructores, Académicos, etc.), información para ser utilizada en el diseño de Proyectos y ejecución de Obras Civiles.

1.3. Planteamiento del problema

Se tomarán en cuenta los siguientes aspectos:

1.3.1. Identificación del problema

La importancia del control de calidad, que garantice el correcto uso de los materiales, la buena calidad de la edificación resultante y por consiguiente la economía del propietario o beneficiarios. Lo cual no se tiene un conocimiento de las características de los áridos del río San Juan del Oro Localidad El Puente y un método de dosificación acorde a la realidad del medio, ya que su utilización es de forma empírica.

1.3.2. Formulación del problema

¿Qué proporción de los materiales integrantes de la unidad cúbica de hormigón se debe seleccionar para obtener hormigones resistentes, durables y económicos, utilizando los agregados del río San Juan del Oro de la población de El Puente?

Hipótesis:

Los agregados del río San Juan del Oro localizado en la población de El Puente pueden emplearse para la fabricación de hormigones:

Tipo A con una resistencia de proyecto a compresión de 210 kg/cm^2 , y su aplicación en estructuras de edificación, obras de arte de carreteras e hidráulicas.

Tipo C con una resistencia de proyecto a compresión de 160 kg/cm^2 , y su aplicación en: canales, muros de contención, cordones, aceras, cunetas, cabezales de alcantarillas, etc.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

El Objetivo General de esta investigación está centrada en satisfacer una necesidad regional, el cual es de proporcionar datos necesarios y suficientes provenientes de un estudio en laboratorio de las características físico-mecánicas de los agregados del río San Juan del Oro, se tomara como banco de extracción de los agregados la localidad de el Puente, y establecer su comportamiento en las mezclas de hormigón Tipo A con resistencias de 210 kg/cm^2 y hormigones Tipo C con resistencia de 160 kg/cm^2

1.4.2. Objetivos Específicos

Como objetivos específicos tenemos:

- Aplicar los resultados de la caracterización de los materiales en la dosificación de mezclas de hormigones normales (por método ACI).
- Obtención experimentalmente de las curvas de relación agua/cemento vs. resistencia a compresión del hormigón, utilizando agregados del río San Juan del Oro y Cemento El Puente.

- Verificación de las curvas de relación agua/cemento vs. resistencia a compresión obtenidas (por método ACI), para hormigones Tipo A y Tipo C.
- La determinación de coeficiente de conversión de la resistencia a compresión respecto a probetas del mismo tipo a diferentes edades.
- La determinación de la combinación más económica y práctica de los agregados del río San Juan del Oro, cemento El Puente y agua que producirá una mezcla con el grado de trabajabilidad requerida y desarrollará el endurecimiento adecuado.

1.5. Campo de aplicación

El campo de aplicación del presente estudio abarca todas las actividades de la construcción en la que se use el tipo de hormigón propuesto.

La Localidad de El Puente actualmente viene encarando la ejecución importantes obras civiles tales como: La construcción de caminos, obras de arte, edificaciones de interés social, canchas deportivas, alcantarillados sanitario y pluvial, y edificaciones particulares. Por lo que este trabajo de investigación será un referente, destinado a proporcionar los datos necesarios de un estudio en laboratorio de las características físico-mecánicas de los agregados, y resultados reales obtenidos, mediante la curva relación agua/cemento vs. Resistencia a compresión promedio, el uso de esta curva es fundamental para los directores de Obra. Permite confeccionar, con los materiales disponibles en obra hormigones que cumplan con las propiedades especificadas de acuerdo al tipo o característica de la estructura.

1.6. Justificación

La presente investigación será una fuente de información para empresas constructoras, consultoras, técnicos de la Honorable Alcaldía Municipal y Gobernación del Departamento de Tarija y Chuquisaca que tienen la labor de fiscalización, supervisión y construcción de obras.

Aprovechando sus propiedades y características para lograr los requisitos técnicos especificados de modo que el orden de incidencia en costos de cada material, en lo posible sea inversamente proporcional a su participación como componente de mezcla.

CAPÍTULO 2

CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES COMPONENTES DEL HORMIGÓN

2.1. Caracterización de agregados

La caracterización de los agregados es útil para establecer criterios de selección entre dos o más opciones de suministro, sino también para definir y especificar los tratamientos de beneficio y acondicionamiento a que puedan someterse los agregados que presentan deficiencias, cuando por ser opciones únicas o por otra razón deben utilizarse.

2.2. Extracción y preparado de muestras

2.2.1. Importancia

El muestreo es tan importante como el ensayo mismo, por lo tanto, la persona encargada tomará todas las precauciones para obtener muestras que representen fielmente la naturaleza y condición de los materiales de los cuales provienen.

La labor de obtener muestras realmente representativas de un agregado, es bastante compleja debido a la separación que se produce al manipular o transportar un agregado, por lo tanto, la correcta obtención de las muestras y una posterior preparación óptima, permiten obtener luego, valores realmente representativos de las condiciones originales de dichos agregados.

Este método establece los procedimientos para realizar el muestreo de agregados fino y grueso para los siguientes propósitos:

- Investigación preliminar de la fuente potencial de provisión (suministro).
- Control del producto en la fuente de provisión.
- Control de las operaciones en el sitio de uso.
- Aceptación o rechazo de los materiales.

2.2.2. Extracción de muestras

La investigación preliminar y muestreo de las fuentes y tipos potenciales de agregado ocupan en lugar muy importante en la determinación de la disponibilidad y conveniencia de los agregados que forman parte de la construcción.

Esta investigación determina la forma de encarar los procesos constructivos, desde el punto de vista de economía y determina el control del material necesario para asegurar durabilidad de la estructura resultante, desde el punto de vista del agregado.

Las muestras de los agregados tomadas para realizar los ensayos, se extraerán de forma diferente, según corresponda a:

2.2.2.1. Agregados manufacturados

2.2.2.1.1. Pilas de acopio

Tomar todas las precauciones necesarias, particularmente cuando el muestreo es hecho con el propósito de determinar las propiedades del agregado que pueden ser dependientes de la granulometría de la muestra.

Si las circunstancias lo hacen necesario, para obtener muestras desde un acopio de agregado grueso o un acopio combinado de agregado grueso y fino, debe diseñarse un plan de muestreo para el caso específico en consideración.

Este procedimiento permitirá usar el plan de muestreo que dará mayor confianza en los resultados obtenidos, condición que debe ser aceptada por todas las partes involucradas para cada situación en particular. El plan de muestreo definirá el número de muestras necesarias para representar lotes y sub-lotes de tamaños específicos.

Un método de selección propuesto es el siguiente: Se tomarán tres muestras separadas de partes diferentes de la pila, una en la parte superior, otra junto a la base y la tercera en un punto intermedio. Para evitar que se mezcle el material de la parte superior, puede introducirse por ejemplo, una tabla en el montón, encima del lugar donde se sacará la muestra.

Debe observarse cualquier sector segregado y sólo se puede extraer proporciones de los agregados desde la mayor profundidad posible sin que incluya material de superficie, ni los primeros ni los últimos 30 cm de altura o profundidad del acopio.

Los principios generales para el muestreo desde montones de acopio son aplicables para efectuar el muestreo desde camiones, carros de riel, barcazas u otras unidades de transporte

2.2.2.1.2. Cintas transportadoras

En el sitio de producción se seleccionarán en forma aleatoria las unidades a ser muestreadas. Se obtendrán al menos tres muestras aproximadamente

iguales, seleccionadas al azar desde la cinta seleccionada para el muestreo, luego estas muestras serán combinadas para formar las muestras de campo.

Parar el cinturón transportador mientras los incrementos de muestra están siendo obtenidos, para ello insertar dos plantillas, la forma de las mismas debe coincidir con la forma del cinturón y del flujo de agregado sobre el cinturón, las plantillas deben estar espaciadas de modo que el material contenido entre ellas produzca el incremento de peso requerido.

Cuidadosamente sacar todo material retenido entre las plantillas, depositarlo en un recipiente apropiado, recoger con un cepillo en una batea el polvo de los finos depositado sobre el cinturón y finalmente, adicionar al recipiente.

2.2.2.1.3. Silos, tolvas o depósitos

Se obtienen al menos tres muestras aproximadamente iguales, seleccionadas al azar (desde la unidad a ser muestreada), y combinadas para formar la muestra de campo. Se toma cada porción de la sección transversal total, tal cual están siendo descargados.

Usualmente es necesario tener un dispositivo preparado para cada planta en particular. Este dispositivo consiste de una batea de tamaño suficiente para interceptar la sección entera de la corriente de descarga y retener la cantidad requerida de material sin derramamiento.

Puede ser necesario armar guías, trípodes o rieles para soportar la batea colocada debajo la corriente de descarga. En lo posible, debe mantenerse el depósito continuamente lleno o casi lleno para reducir la segregación (excluir el primer y último 10% de carga).

2.2.2.2. Yacimientos

2.2.2.2.1. Depósitos de arenas y gravas naturales

Con los agregados obtenidos de los lechos de ríos (como sucede en la mayoría de los casos en nuestro medio), deberá diseñarse un plan de muestreo para el caso específico en consideración. Este plan dará mayor confianza en los resultados obtenidos, condición que deberá ser aceptada por todas las partes involucradas para cada caso en particular. (Posiblemente más aceptable, sea la obtención de muestras desde los acopios realizados por los productores).

Cuando los agregados están al descubierto, se abrirán zanjas de cuyo fondo se tomarán las muestras. Para depósitos enterrados, que ya tienen un frente de explotación, se tomarán las muestras de pozos o sondeos practicados detrás y paralelos al frente de explotación. La toma de muestras en bancos potenciales, que no tengan frentes abiertos se realizará por medio de pozos. En ambos casos, el número y profundidad de estos pozos dependerá de las condiciones locales y de la cantidad de material a utilizar.

2.2.3. Transporte de muestras

El transporte de las muestras será realizado en bolsas o recipientes que eviten la pérdida o contaminación del material o que lo dañen. Dichos recipientes tendrán amarrada una adecuada identificación.

NOTA: A fin de evitar alteraciones en la muestra como la pérdida de finos, el muestreo y la preparación siempre se realizarán en condición húmeda.

2.2.4. Preparación de muestras

Se refiere a los métodos de reducción de las muestras grandes de agregado (muestras de campo) hasta cantidades apropiadas para realizar los ensayos, empleando procedimientos que minimicen las variaciones en las características determinadas entre las muestras de ensayo y las muestras mayores.

2.2.4.1. Cuarteo manual

La muestra, se coloca sobre una superficie plana y limpia en la que no exista ninguna pérdida de material o una contaminación accidental de algún material extraño. Debe mezclarse revolviendo tres veces; con la última revoltura echar el material de los bordes hacia el centro formando una pila o cono; cuidadosamente presionar con una pala el vértice juntando el material disperso y dándole una forma circular con espesor uniforme (el diámetro será aproximadamente de 4 a 8 veces el espesor). Cuidar que la composición de cada cuarto de sector sea igual a la de los otros.

Se divide el material en cuatro partes aproximadamente iguales, por cortes diametrales y perpendiculares entre sí, se separan y eliminan dos cuartos opuestos retirando cuidadosamente las partículas finas con cada fracción. Los dos cuartos restantes se vuelven a mezclar, se repite el proceso tantas veces como sea necesario, hasta obtener la cantidad requerida para los ensayos.

Alternativamente cuando el piso no es sólido o no está limpio y seco la muestra de campo puede ser colocada sobre una lona y mezclada con una pala como se describió en el párrafo anterior, o levantando alternadamente cada esquina de la lona y rodando diagonalmente la muestra hasta la

esquina opuesta (repetir por esquina), formar el cono y continuar de la manera ya descrita.

2.2.4.2. Cuarteo mecánico

El cuarteador metálico cuenta con aberturas ranuradas en la parte superior y dispuestas en forma alternada, cuyos canales descienden hacia los lados para descargar el material en ambos lados sobre recipientes colocados para tal efecto.

Se vierte el material de la muestra por la parte superior y éste rodará cayendo por partes iguales en ambas bandejas. Se aparta una de las bandejas, desechando la muestra de la otra; se colocan nuevamente las bandejas de recepción (vacías), vertiendo de nuevo la muestra retenida en la primera bandeja apartada. Se repite el proceso, cuantas veces sea necesario.

2.3. Agregados

Llamados también áridos, son materiales inertes que se combinan con los aglomerantes (cemento, cal, etc.) y el agua formando los concretos y morteros. La importancia de los agregados radica en que constituyen aproximadamente del 65% al 80% del volumen de la unidad cúbica de concreto.

Los agregados pueden ser obtenidos o producidos a partir de rocas ígneas, sedimentarias o metamórficas. La presencia o ausencia de un tipo geológico determinado no es suficiente para definir a un agregado como adecuado o inadecuado. La aceptación de un agregado para ser empleado en la preparación del concreto para una obra de características determinadas,

deberá basarse en la información obtenida a partir de los ensayos de laboratorio.

2.3.1. Agregado fino

Se considera como agregados finos a las arenas o piedras naturales finamente trituradas, de dimensiones reducidas y que pasan el tamiz 9.8mm (3/8").

Las arenas provienen de la desintegración natural de las rocas; y que arrastrados por corrientes aéreas o fluviales se acumulan en lugares determinados.

Las partículas deben ser resistentes, duras, compactas, limpias y libre de partículas perjudiciales de polvo, partículas escamosas o blandas, terrones, pizarras, esquistos, álcalis, sales, materia orgánica, sales u otras sustancias dañinas.

Las variaciones de la gradación de las arenas tienen gran influencia en la resistencia de los hormigones, pues dependiendo de la composición de éstas, las propiedades del hormigón variarán de forma notable. Un exceso de finos disminuye notablemente la calidad del hormigón en todos los aspectos.

La arena es el agregado de mayor responsabilidad en los hormigones.

2.3.2. Agregado Grueso

Se define como agregado grueso al material retenido en el tamiz N° 4 proveniente de la desintegración natural o mecánica de las rocas.

El agregado grueso podrá consistir de grava natural o triturada, piedra partida, o agregados metálicos naturales o artificiales.

La resistencia de la grava viene ligada a su dureza, densidad y módulo de elasticidad.

El agregado debe constituirse de partículas que soporten y resistan las condiciones de la intemperie, y no deben contener materiales que produzcan efectos perjudiciales.

Las partículas del agregado deberán ser limpias, de perfil preferentemente angulares y con tendencia a la forma cúbica, resistentes, compactas, duras, y de textura preferentemente rugosa. Además estas partículas deben ser químicamente estables y libres de escamas, tierra, polvo, limo, incrustaciones artificiales, materia orgánica, sales u otras sustancias dañinas.

Para que el hormigón sea durable se requiere:

- Que el agregado sea resistente a la acción del intemperismo y desgaste.
- Que el agregado no tenga impurezas que afecten a la resistencia y solidez de la pasta de cemento.
- Que no reaccione desfavorable el mineral del agregado con los componentes del cemento.

El lavado del agregado grueso se deberá hacer preferentemente con agua potable o con el agua libre de sales, sólidos en suspensión o materia orgánica.

2.3.3. Clasificación general

Los agregados comúnmente se clasifican según su origen o procedencia, tamaño y densidad o peso unitario.

2.3.3.1. Según su origen

De acuerdo a su origen, los agregados pueden provenir de fuentes naturales o artificiales.

Los agregados naturales, son el producto de la intemperización y arrastre del agua o glaciares y se puede obtener por dos medios: el primero consiste en explorar el material de lecho del río y aprovecharlo con su gradación natural (a este material se le llama canto rodado o arena del río); en el segundo, algunos tamaños son obtenidos mediante trituración y tamizado de rocas naturales más grandes procedentes de canteras o de río, de aquí el nombre de agregados triturados.

Los agregados naturales son los de uso más frecuente a nivel mundial y particularmente en nuestro país por su amplia disponibilidad tanto en calidad como en cantidad, lo que los hace ideales para producir concreto.

Los agregados artificiales, son los obtenidos a partir de productos y procesos industriales y generalmente se usan para algunos propósitos especiales. Tal es el caso de la elaboración de concretos livianos, donde se puede utilizar agregados de arcilla expandida. Ladrillo triturado y escorias de alto horno; también en la producción de concretos pesados donde se puede usar la limadura de hierro. Para la fabricación de concretos de peso normal es posible utilizar como agregado el clínker; últimamente se está aprovechando

el concreto triturado procedentes de demoliciones de donde se obtiene “agregados” relativamente económicos.

El potencial de uso de estos materiales es muy amplio, en la medida que se van investigando y desarrollando otros materiales y sus aplicaciones en concreto, por lo que a nivel mundial hay una marcada tendencia a progresar en este sentido.

2.3.3.2. Según el tamaño de sus partículas

Dependiendo del tamaño de sus partículas, los agregados se pueden clasificar como se muestra en la tabla. 2.1.

La clasificación más usada, y la que se hace más frecuencia para el empleo en hormigones se hace referencia al agregado grueso y agregado fino.

TABLA 2.1 Clasificación de los agregados según su tamaño

Tamaño en mm.	Denominación	Denominación genérica	Observaciones
Mayor que 63.00	Piedra	Agregado grueso	Agregado para hormigones
63.00 a 19.00	Grava		
19.00 a 4.75	Gravilla		
4.75 a 2.00	Arena gruesa	Agregado fino	
2.00 a 0.425	Arena media		
0.425 a 0.075	Arena fina		
0.075 a 0.002	Limo	Fracción muy fina	Fracción no recomendable
Menor a 0.002	Arcilla		

Fuente: Introducción al diseño de mezclas de hormigón Ing. Fernando Cerruto

2.3.3.3. Según su densidad o peso unitario

Tomando en cuenta el peso por unidad de volumen de los agregados se obtiene un concreto con mayor densidad propiedad que en muchas ocasiones es más importante incluso que la resistencia y la durabilidad, tal es el caso de estructuras que requieren de concretos pesados para la protección contra radiaciones. En la tabla 2.2 se representa esta clasificación.

TABLA 2.2 Clasificación de los agregados según su densidad

Clasificación del agregado	Densidad Aproximada kg/m ³		Variedades más Comunes de Agregados	Utilización
	Agregado	Concreto		
Liviano	480 - 1300	1000 – 1350	Pizarras expandidas, esquistos, escoria, arcilla	Concretos livianos estructurales
		500 – 13500	Pómez, perlita, diatomita	Concretos para aislamiento
Normal	1300 - 2000	2000 – 2600	Arena, grava, piedra triturada, clinker, escoria de fundación	Obras de concreto en general
Pesado	2000 - 5600	Mayor a 2600	Barita, limonita, magnetita, limadura de acero, hematita.	Concreto para macizo de anclaje, protección contra radiaciones, etc.

Fuente: "Manual de Tecnología del Concreto" Tomo I. Comisión Federal de Electricidad - México

2.3.4. Funciones de los agregados

En general los agregados desempeñan las siguientes funciones dentro de la masa del concreto:

- Se utilizan como material de relleno para hacer más económica la mezcla puesto que los agregados son menos costosos por unidad de volumen que el cemento.
- En estado plástico la arena y la pasta actúan como lubricantes de las partículas en la mezcla, para posibilitar el amasado, transporte, colocado, compactado y acabado.
- Durante el fraguado, (hidratación) la pasta experimenta una pérdida de humedad que origina una contracción que generalmente produce un agrietamiento. Los agregados al ser introducidos en la mezcla, forman un esqueleto granular, de tal manera que se genera una superficie de adherencia que disminuye los cambios volumétricos y se disminuye los cambios volumétricos y disminuye el volumen susceptible a la contracción.
- Aporta parte de la resistencia propia a la resistencia a compresión del concreto. Esto se logra cuando están aglutinados mediante la pasta de cemento formando un todo compacto.

2.3.5. Propiedad de los agregados

2.3.5.1. Granulometría

La granulometría es la distribución por tamaños de las partículas del agregado. La importancia del análisis granulométrico de los agregados,

radica en que de ella depende la manejabilidad y economía de una mezcla de concreto.

El empleo de agregados con granulometría continua, es conveniente por economía y con el fin de lograr una adecuada manejabilidad; pues, la experiencia ha demostrado que a igualdad de consumos de pasta de cemento, con granulometrías continuas se obtienen mezclas de concreto más manejable.

TABLA 2.3. Serie de tamices de agregados para concretos

Agregado	Designación ASTM	Designación Alternativa
Grueso	3"	76.10 mm
	2"	50.80 mm *
	1½"	38.10 mm
	1"	25.40 mm *
	¾"	19.00 mm
	½"	12.70 mm *
	⅜"	9.51 mm
Fino	Nº 4	4.76 mm
	Nº 8	2.38 mm
	Nº 16	1.19 mm
	Nº 30	595 µ
	Nº 50	297 µ
	Nº 100	149 µ
	Nº 200	74 µ

* Tamices que no cumplen la relación 1 a 2

Fuente: "Tecnología del Hormigón" Vitervo O' reilly - Cuba

La serie de tamices que se emplea para clasificar agregados para concreto se muestran en la tabla 2.3. Se ha establecido de manera que la abertura de cualquier tamiz sea aproximadamente la mitad de la abertura del tamiz inmediatamente superior o sea que cumplan con la relación 1 a 2. Sin embargo algunos tamices no cumplen con esta relación pero se utilizan

frecuentemente para evitar intervalos muy grandes entre tamices consecutivos.

Una buena granulometría es aquella que está constituida por todos los tamaños (granulometría continua) de tal manera que los vacíos dejados por las de mayor tamaño sean ocupados por otras de menor tamaño y así sucesivamente esto permite obtener un mínimo de vacíos los cuales deberán ser llenados por pasta de cemento.

Las granulometrías ideales sólo existen a nivel teórico y difícilmente se pueden reproducir en la práctica por esto casi todas las especificaciones granulométricas contemplan una zona definida por dos límites (superior e inferior) dentro de los cuales cualquier granulometría es aceptable. La norma ASTM C 33-7 1a, ha considerado como la indicada para albergar curvas granulométricas para agregado fino la tabla 2.4 y para el agregado grueso la tabla 2.5.

TABLA 2.4. Límites recomendados para curvas Granulométricas de agregado fino

Tamiz		Porcentaje que pasa	
Designación ASTM	Designación Alternativa	Límite Inferior	Límite Superior
3/8"	9.51 mm	100	100
Nº 4	4.76 mm	95	100
Nº 8	2.38 mm	80	100
Nº 16	1.19 mm	50	85
Nº 30	595 μ	25	60
Nº 50	297 μ	10	30
Nº100	149 μ	2	10

Fuente: "Lecciones de Áridos" José Sequeira/Ignacio Álvarez

Los parámetros que se derivan de un análisis granulométrico son: el módulo de finura tamaño máximo y tamaño máximo nominal.

TABLA 2.5. Límites recomendados para curva granulométrica de agregado grueso

Tam. Máx	Porcentaje que pasa por los tamices								
	2 1/2" (63mm)	2" (51mm)	1 1/2" (37.5mm)	1" (25mm)	3/4" (19mm)	1/2" (12.5mm)	3/8" (9.5mm)	Nº4 (4.75mm)	Nº8 (2.38mm)
2 1/2"	95-100		35 - 70		10 - 30			0 - 5	
2"	100	95 -100		35 - 70		10 - 30		0 - 5	
1 1/2"		100	95 - 100		35 - 70		10 - 30	0 - 5	
1"			100	95 -100		25 - 60		0 - 10	0 - 5
3/4"				100	90 -100		20 - 55	0 - 10	0 - 5
1/2"					100	90 -100	40 -70	0 - 15	0 - 5
3/8"						100	85 - 100	10 - 30	0 - 10

Fuente: "Lecciones de Áridos" José Sequeira/Ignacio Álvarez

2.3.5.1.1. Módulo de finura

El módulo de finura, es un índice aproximado del tamaño medio de los agregados. Cuando este índice es bajo, quiere decir que el agregado es fino, cuando es alto es señal de lo contrario. Este índice, no distingue granulometrías, pero en caso de agregados que estén dentro de los porcentajes especificados en las normas granulométricas, sirve para controlar la uniformidad de los mismos.

De ordinario se considera que una arena presente un módulo de finura adecuado para la fabricación de concreto convencional, si no es menor a 2.30 ni mayor a 3.10. Si el módulo de finura de la arena es inferior a 2.3 la

arena es demasiado fina e inconveniente para esta aplicación, ya que suelen requerir mayores consumos de pasta de cemento y por consiguiente mayor costo. En el extremo opuesto, las arenas con módulo de finura mayor de 3.10 resultan demasiado gruesas y también se les juzga inadecuadas porque tienden a producir mezclas de concreto ásperas, segregables y proclives al sangrado.

El módulo de finura del agregado grueso es menos usado que el de la arena, por lo que no haremos mayores comentarios sobre éste.

El módulo de finura de un agregado, se calcula sumando los porcentajes acumulados retenidos en la serie de mallas estándar: 3", 1 1/2", 3/4", 3/8", N° 4, N° 8, N° 16, N° 30, N° 50 y N° 100, tal como se indica en la parte práctica del presente trabajo.

2.3.5.1.2. Tamaño máximo

El tamaño máximo de las partículas se identifica con la malla de menor abertura en que alcanza a pasar efectivamente el total de las partículas del conjunto, cuando se le criba sucesivamente en mallas cuyas aberturas se incrementan gradualmente. La determinación del tamaño máximo es necesario cuando se analizan granulométricamente muestras de depósito natural a fin de conocer el tamaño máximo disponible en el depósito en estudio y su verificación es una medida de control indispensable durante el suministro del agregado grueso ya clasificado previamente al empleo en la fabricación del concreto para prevenir que se le incorporen partículas mayores de lo permitido que pueden ocasionar dificultades en su elaboración, manejo y colocación.

2.3.5.1.3. Tamaño máximo nominal

El tamaño nominal del agregado se define como el siguiente tamiz que le sigue en abertura (mayor) a aquel cuyo porcentaje retenido acumulado es del 15% o más, en muchos casos el tamaño máximo y el tamaño máximo nominal pueden no coincidir lo cual resulta perfectamente lógico debido a que este último indica el promedio de partículas más grandes en su fracción gruesa mientras que el primer tan solo da una idea de las partículas más grandes que pueda ser tan solo una.

Por esta razón la mayoría de la especificaciones granulométricas se dan en función del tamaño máximo nominal y comúnmente se estipula de tal manera que el agregado cumpla con los siguientes requisitos.

2.3.5.2. Forma y textura superficial

La forma y textura superficial de los agregados son características que normalmente no se consideran representativas de la calidad intrínseca de la roca propiamente dicha, aunque puede haber casos en que guarden alguna relación. Sin embargo se los estudia desde el punto de vista de su comportamiento en el concreto.

En términos generales las piedras naturales sometidas a un proceso de trituración tienen forma que varían desde las aproximadamente cúbicas a las alargadas y aplanadas y de textura rugosa mientras que los agregados de río tienen forma redondeada y textura lisa debido al proceso de arrastre a que han sido sometidas.

En cuanto a la forma de los agregados, se puede decir que lo ideal es la redondeada, desde el punto de vista del grado de acomodamiento, que es mejor que el de las partículas de forma cúbica.

Por otro lado, hay que tener cuidado con las partículas que además de ser planas son alargadas y que comúnmente se conocen con el nombre de “lajudas”. Dichas partículas que generalmente son muy débiles porque poseen una estructura laminar tiende a colocarse en forma horizontal dentro de la masa del concreto y muchas veces impiden la salida del agua evaporable durante el proceso de Fraguado, generando espacios de aire que originan una disminución de la resistencia en el concreto, especialmente a la flexión.

La variación de forma y textura superficial en las partículas de los agregados tienden a producir efectos contrapuestos, como por ejemplo las partículas de formas redondeadas y superficies lisas, como las que se encuentran en depósitos aluviales que han sufrido mucho acarreo, producen buena manejabilidad en las mezclas de concreto, pero no son propicias para lograr una buena adherencia con la pasta de cemento, por lo contrario, las partículas de formas muy angulosas y superficies ásperas, como ocurre con algunos agregados manufacturados, son inconvenientes para la elaboración de mezclas manejables, pero favorables en lo relativo a su adherencia con la pasta de cemento.

José Sequeira - Ignacio Álvarez, en su libro “Lecciones de Áridos”, consideran como planas y alargadas a las partículas cuya longitud exceda en tres veces su espesor. Limitando el contenido de éstas a un máximo de 15%. El procedimiento de laboratorio se explica en el ANEXO 1.

La textura superficial de los granos incide notablemente en la adherencia entre la pasta de cemento y la superficie de los agregados. La trabazón que se presenta entre estos dos elementos generalmente se ve incrementada cuando la textura de las partículas cambia de lisa (y redondeada) a rugosa (y angular), este factor es importante para producir concretos más resistentes.

Las partículas de agregado de textura rugosa y de forma angular o elongada requieren mayor cantidad de pasta y arena para lograr una trabajabilidad dada, ya que se les dificulta el deslizamiento de unas sobre las otras, siendo necesaria suministrarle mayor cantidad de lubricante con lo que se hace costosa la mezcla. Sin embargo, con una buena gradación tanto los agregados triturados (angulares y rugosas), como los de río (redondeados y lisos), dan aproximadamente las mismas resistencias para una misma relación agua/cemento, cuando se utiliza el mismo tipo de roca.

2.3.5.3. Peso específico

El peso específico permite conocer los volúmenes compactos del agregado con el fin de dosificar morteros u hormigones, relacionados con el peso unitario permite conocer la compacidad del agregado (contenido de vacíos).

Generalmente, los agregados tienen poros que pueden ser accesibles o abiertos y en comunicación con el exterior e inaccesibles, cerrados y aislados del exterior. Esto hace que, no se pueda hablar de un solo peso específico del agregado, sino de varios, que dependerán de que se incluya o no estos dos tipos de poros en el volumen que se esté considerando.

La norma ASTM C127-81, define al peso específico de los agregados de la siguiente manera:

Peso específico de un agregado.- Es la relación entre el peso al aire, de sus partículas minerales y el peso al aire de agua destilada, considerando un mismo volumen y una misma temperatura.

- **Peso específico a granel.-** Es la relación entre el peso al aire, de un volumen de sus partículas minerales desecadas que incluye sus poros permeables e impermeables, y el peso al aire, de un igual volumen de agua destilada a la misma temperatura.
- **Peso específico saturado superficialmente seca.-** Es la relación entre el peso al aire, de un volumen de sus partículas minerales saturadas de agua y sin humedad superficial que incluye los poros permeables e impermeables, y el peso al aire, de un igual volumen de agua destilada a la misma temperatura.
- **Peso específico aparente.-** Es la relación entre el peso al aire, de un volumen de sus partículas minerales desecadas que incluye solamente los poros impermeables y el peso al aire, de un igual volumen de agua destilada a la misma temperatura.

El peso específico a granel es usado generalmente para el cálculo del volumen ocupado por el agregado seco en las mezclas de concreto de cemento, cuando están proporcionadas sobre la base de un volumen absoluto, este valor también es usado en el cálculo de los vacíos en el agregado.

El Peso específico saturado superficialmente seca éste es usado cuando el agregado está mojado, es decir, si la humedad contenida en el agregado es mayor o igual a su absorción.

Deben emplearse agregados con pesos específicos comprendidos entre 2.4 g/cm³ y 2.8 g/cm³, que es el intervalo usual en que se hallan las rocas que constituyen los agregados de peso normal.

2.3.5.4. Porosidad

La palabra “poro” define al espacio no ocupado por materia sólida en la partícula de agregado. Se considera a la porosidad como a una de las más importantes propiedades físicas del agregado; dada su influencia sobre las otras propiedades de éste y el papel que desempeña durante los procesos de congelación.

La porosidad de un cuerpo sólido es la relación de su volumen de vacíos entre su volumen total, y se expresa como porcentaje en volumen.

La porosidad es otra de las propiedades físicas de los agregados, muy importante dentro de la masa del concreto porque una partícula porosa es mucho menos dura que una partícula compacta con lo que se afectan considerablemente propiedades como las adherencia, resistencia a la compresión y flexión, y además la durabilidad en todos sus aspectos, así como la resistencia al desgaste o abrasión.

Todas las rocas que constituyen los agregados de peso normal son porosas en mayor o menor grado.

2.3.5.5. Absorción y humedad de la superficie

Es la capacidad de los agregados de llenar con agua los vacíos internos entre las partículas. El fenómeno se produce por capilaridad, no llegándose a llenar absolutamente los poros indicados, pues, siempre queda aire atrapado.

Tiene importancia, pues se refleja en el concreto reduciendo el agua de mezcla, con influencia en las propiedades resistentes y en la trabajabilidad, por lo que es necesario tenerla siempre en cuenta para hacer las correcciones necesarias. La absorción expresada generalmente en porcentaje.

Los agregados pueden tener algún grado de humedad lo cual está directamente relacionado con la porosidad de las partículas. La porosidad depende a su vez del tamaño de los poros, su permeabilidad y la cantidad o volumen total de poros.

Las partículas de agregado pueden pasar por cuatro estados de humedad:

Seco al horno: se logra mediante un secado al horno a 110°C hasta que los agregados tengan un peso constante (generalmente a las 24 horas). Todos los poros están vacíos.

Seco al aire: se logra mediante exposición al aire libre. Toda la humedad es removida de la superficie, pero los poros internos están parcialmente saturados.

Saturado y superficialmente seco (SSS): es un estado límite en el que los agregados tienen todos sus poros llenos de agua, pero no existe película de humedad sobre la superficie de las partículas.

Húmedo: todos los poros de agregado están llenos de agua y adicionalmente existe una película de agua sobre la superficie de las partículas.

De estos cuatro estados, sólo dos, el estado seco y el estado saturado y superficialmente seco, corresponden a contenidos específicos de humedad. El primero, por tener una humedad igual a cero, y el segundo, por tener humedad equivalente a tener todos los poros saturables del agregado llenos de agua. Ambos estados pueden ser usados como estados de referencia para calcular el contenido de humedad.

2.3.5.6. Peso unitario

El cociente de dividir el peso de las partículas entre el volumen total incluyendo los vacíos. Al incluir los espacios entre las partículas, está influenciado por la manera en que se acomodan éstas, lo que convierten un parámetro hasta punto relativo.

El peso unitario es un factor que mide la aptitud del agregado para ser utilizado en la producción del concreto; según las normas, los agregados son considerados aptos si tienen un peso unitario entre 1,20 y 1,750 gr/cm³.

Dependiendo del sistema que se emplee en acomodar el material, se pueden obtener dos valores: el peso unitario suelto y el peso unitario compactado.

El peso unitario suelto, el material se coloca en estado seco, suavemente en un recipiente, hasta el derrame y luego se nivela a ras, sin ejercer presión alguna. El concepto de peso unitario suelto es importante cuando se trata de manejo, transporte y almacenamiento de los agregados debido a que éstos se hacen en estado suelto.

Peso unitario compactado, cuando los granos han sido sometidos a compactación incrementando así el grado de acomodamiento de las partículas de agregado y por lo tanto el valor de la masa unitaria. El concepto

de Peso unitario compactado es importante desde el punto de vista de diseño de mezclas ya que con él se determina el volumen absoluto de los agregados por cuanto éstos van a estar sometidos a una compactación durante el proceso de colocación del concreto.

2.3.5.7. Resistencia a la compresión

Capacidad de asimilar la aplicación de fuerzas de compresión, para lo cual se necesita ensayar testigos cilíndricos o cúbicos de tamaño adecuado al equipo de ensayo, que se perforan o cortan de una muestra lo suficientemente grande.

Normalmente las partículas de agregado tienen una resistencia superior a la pasta endurecida, de tal manera que cuando el agregado falla antes que la pasta, la resistencia del agregado toma importancia.

Las posibles fallas de los granos se deben a que tienen una estructura pobre o por que previamente se han inducido fallas a sus partículas durante el proceso de explotación (generalmente cuando se hace por voladura) o también por un inadecuado proceso de trituración.

2.3.5.8. Resistencia a la abrasión

Se refiere a la resistencia que los agregados gruesos oponen a sufrir desgaste, rotura o desintegración de partículas por efecto de la abrasión, es una característica que suele considerarse como un índice de su calidad en general y en particular de su capacidad para producir concretos durables en condiciones de servicio donde intervienen acciones deteriorantes de carácter abrasivo. Asimismo, se considera un buen indicio de su aptitud para soportar sin daño, las acciones de quebrantamiento que frecuentemente recibe el

agregado grueso en el curso de su manejo previo a la fabricación del concreto.

La prueba con que se califica de ordinario la resistencia de los agregados gruesos a la abrasión, se lleva a cabo en la máquina de Los Ángeles. En esta prueba se cuantifica como pérdida por abrasión, la cantidad de finos que se originan como resultado de someter un conjunto de partículas de grava, a los efectos combinados del impacto y la abrasión producidos por una carga de esferas metálicas dentro de un cilindro giratorio, al cabo de un determinado número de revoluciones.

Las especificaciones ASTM C 131 establecen una pérdida máxima permisible de 45 por ciento en esta prueba.

2.3.5.9. Materiales contaminantes en el agregado

Por lo general, los agregados vienen acompañados de diversos materiales (limo, arcilla, materia orgánica, carbón, lignito, sales inorgánicas y rocas muy porosas y débiles), cuya presencia es inconveniente por los efectos adversos que producen en el concreto tales como, mayor requerimiento de agua, cambios volumétricos, resistencia y durabilidad del concreto; por lo que hace necesario cuantificarlos.

Cuando las condiciones de servicio de la estructura son particularmente severas en cuanto a los efectos de la abrasión, es pertinente realizar pruebas directas en el concreto requerido, cuya finalidad no es precisamente obtener una medida cuantitativa de su durabilidad potencial, si no más bien de hacer evaluaciones comparativas entre diferentes concretos propuestos, los valores máximos permisibles de materia contaminante en los agregados, se presentan en la tabla 2.6.

TABLA 2.6. Limitación de finos indeseables en agregados

Aplicación	Finos que pasan la malla de 75 micras % Máx. ASTM C-33	
	Agregado fino	Agregado grueso
En agregados para concreto en general		
Finos de cualquier tipo	5.00	1.00
Finos fragmentos de roca, libre de arcilla	7.00	1.50
En agregados para concreto expuesto a la abrasión		
Finos de cualquier tipo	3.00	1.00
Finos fragmentos de roca, libre de arcilla	5.00	1.50

Fuente: "Manual de Tecnología del Concreto" Tomo I. Comisión Federal de Electricidad - México

2.4. El concreto

El concreto es un material heterogéneo el cual está compuesto principalmente de la combinación de: agregados, cemento portland, agua, aire (naturalmente atrapado o introducido a propósito) y algunas veces aditivos. A la mezcla de cemento Pórtland, agua aire y aditivos (cuando se utilizan) se lo conoce como pasta de cemento y constituye la llamada matriz; asimismo, a la mezcla de pasta de cemento y arena se denomina mortero; finalmente, a la mezcla del mortero y agregado grueso se llama concreto.

El agregado es la fase discontinua del concreto dado que sus diversas partículas no se encuentran unidas o en contacto unas con otras, si no que se encuentran separadas por espesores diferentes de pasta endurecida.

Las mezcla íntima de los componentes del concreto produce una masa plástica que puede ser moldeada y compactada con relativa facilidad; pero gradualmente pierde esta característica hasta que al cabo de algunas horas

se torna rígida y comienza a adquirir el aspecto, comportamiento y propiedades de un cuerpo sólido, para convertirse finalmente en el material mecánicamente resistente que es el concreto endurecido.

Las propiedades del concreto están determinadas fundamentalmente por las características físicas y químicas de sus materiales componentes, pudiendo ser mejores compendiadas si se analiza del concreto.

El comportamiento mecánico del concreto y su durabilidad en servicio dependen de tres aspectos básicos:

- 1) Las características composición y propiedades de la pasta de cemento o matriz cementante, endurecida.
- 2) La calidad propia de los agregados, en el sentido más amplio.
- 3) La afinidad de la matriz cementante con los agregados y su capacidad para trabajar en conjunto.

En el primer aspecto debe contemplarse la selección de un cementante apropiado, el empleo de una relación agua/cemento conveniente y el uso eventual de un aditivo necesario, con todo lo cual debe resultar potencialmente asegurada la calidad de la matriz cementante.

En cuanto a la calidad de los agregados, es importante adecuarla a las funciones que debe desempeñar la estructura, a fin de que no representen el punto débil en el comportamiento y en su capacidad para resistir adecuadamente y por largo tiempo los efectos consecuentes de las condiciones de exposición y servicio a que esté sometido.

Finalmente, la compatibilidad y el buen trabajo de conjunto de la matriz cementante con los agregados, depende de diversos factores tales como las características físicas y químicas del cemento la composición mineralógica y petrográfica de las rocas que constituyen los agregados, y la forma, tamaño máximo y textura superficial de éstos.

De la esmerada atención a estos tres aspectos básicos, depende sustancialmente la capacidad potencial del concreto, como material de construcción, para responder adecuadamente a las acciones resultantes de las condiciones en que debe prestar servicio.

2.4.1. Ventajas del concreto

El concreto presenta una serie de ventajas sobre otros materiales de construcción, como ser:

- Los materiales que se emplean en su elaboración están disponibles en cualquier parte del globo terráqueo y son fáciles de conseguir.
- Endurece y adquiere resistencias, e incluso aumenta su resistencia con la edad.
- Puede dársele cualquier forma (elementos estructurales, masivos, estructurales, elementos arquitectónicos, etc.).
- Es resistente al fuego, por lo menos hasta 400 °C.
- Se moldea a temperatura normal ambiente, no necesita un acondicionamiento térmico especial (salvo el cuidado de temperaturas máximas extremas).

- Es resistente a diversas condiciones ambientales y tiene una gran durabilidad (al desgaste por rozamiento como en los pavimentos, cambios de temperatura, etc.).
- En estado plástico, puede dársele cualquier acabado superficial.
- Por su plasticidad inicial permite obtener variadas superficies de acabado exterior.
- Permite fabricar piezas continuas y de gran tamaño.

2.4.2. Propiedades del concreto

De acuerdo a la estructura, el hormigón deberá dosificarse para que satisfaga las condiciones de resistencia como función de las tensiones admisibles que se adapten tanto a la compresión o flexión, o ambas, según los requisitos de cálculo, y la durabilidad para resistir la acción de los agentes exteriores. Otra condición, que sin ser tan fundamental como las anteriores es la economía. Además existe otra impuesta por la necesidad de trabajabilidad del hormigón durante su colocado.

Las condiciones son particulares de cada obra o parte de una obra, pero generalmente corresponden a las siguientes mencionadas en la tabla 2.7.

Si se usan materiales aceptables, las propiedades del hormigón endurecido como la resistencia a los cambios del congelamiento, impermeabilidad, resistencia al desgaste y las resistencia mecánicas, dependen de la selección de una pasta adecuada, es decir, una relación agua cemento suficientemente baja y una cantidad adecuada de aire incluido. Estas propiedades y por tanto

la calidad del hormigón deseada, se puede obtener completamente sólo con un buen colocado y acabado, así como del curado adecuado.

TABLA 2.7. Condiciones de resistencia del concreto

Tipo de condición	Características relacionadas	Parámetros condicionales
Condiciones de diseño	Resistencia	Tipo de cemento Relación agua/cemento
Condiciones de uso en obra	Docilidad, fluidez, consistencia Características del elemento	Cantidad de agua Composición de agregados Tamaño máximo
Condiciones de durabilidad	Condiciones ambientales Ataques agresivos	Tipo de cemento Uso de aditivos Cantidad mínima de cemento

Fuente: Introducción al diseño de mezclas de hormigón Ing. Fernando Cerruto

2.4.2.1. Concreto en estado fresco

Dado que la pasta de cemento es el componente activo del hormigón, estas mismas características le son transmitidas a éste, por lo que presenta también una etapa inicial, en que, su estado es plástico.

El concreto fresco es una masa plástica que puede ser manejada, transportada colocado y consolidada, por medios adecuados sin demasiados esfuerzos, y sin que se produzca segregación o exudación. Esta masa gradualmente pierde esta característica hasta que al cabo de algunas horas se torna rígida y comienza su proceso de endurecimiento.

En esta etapa el hormigón acepta desplazamientos y deformaciones con pequeños aportes de energía externa, para lo cual debe vencer

principalmente dos reacciones internas del hormigón. Una derivada del frotamiento de las partículas granulares entre sí, cuya medida se denomina fluidez del hormigón. La otra proveniente de la cohesión de la masa, producida por la atracción entre las partículas, cuya medida se denomina consistencia del hormigón.

El conjunto de ambas características constituye la docilidad o trabajabilidad del hormigón, la cual está relacionada con la facilidad de colocación (incluyendo las propiedades de acabado satisfactorio).

2.4.2.1.1. La consistencia

Es la menor o mayor facilidad que tiene el hormigón fresco para deformarse varía con multitud de factores: cantidad de agua de amasado, tamaño máximo, granulometría y forma de los áridos, etc. El factor que más influye es la cantidad de agua de amasado, por lo cual para nuestro estudio esta será la mínima necesaria para recubrir cada elemento de agregado con una fina película de lechada de cemento.

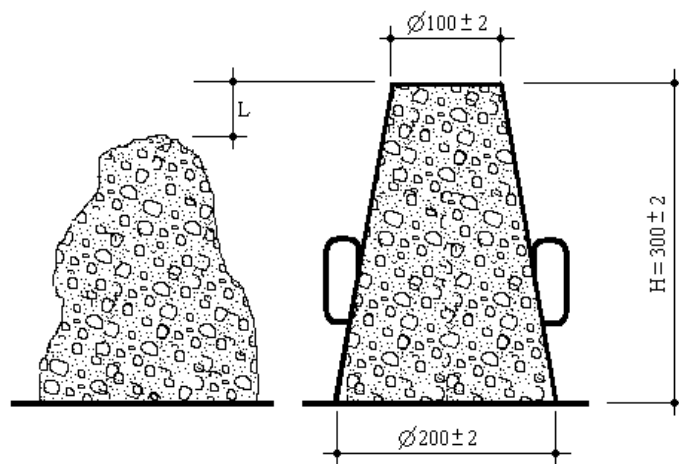
Existen varios métodos para determinar la consistencia, siendo los más empleados el cono de Abrams, la mesa de sacudidas, y el consistómetro VeBe.

El consistómetro VeBe es una variante del cono de Abrams que se emplean para hormigones muy secos (que darían asentamiento nulo). La consistencia se mide por el número de segundos necesarios, para que el tronco de cono formado por el hormigón con el molde de Abrams experimente, sometido a vibración en mesa, un asentamiento determinado.

La mesa de sacudidas sirve para someter a una masa de hormigón fresco, de forma determinada, a una serie de sacudidas normalizadas, midiéndose el escurrimiento experimentado, es un método más preciso que el cono de Abrams y, por tanto, preferible cuando se trata de instalaciones fijas.

El cono de Abrams es un molde troncocónico de 30 cm. (fig. 2.1) de altura que se rellena con el hormigón a ensayar, la pérdida de altura que experimenta la masa fresca del hormigón una vez desmoldada, expresada en centímetros da una medida de su consistencia.

FIGURA 2.1. Prueba de Asentamiento con el Cono de Abrams



Aunque la consistencia de una masa depende de los factores antes mencionados, su sensibilidad es muy grande frente a las variaciones de agua en la misma, de forma que se puede considerar que en hormigones de una composición dada, la consistencia es función del agua de amasado o bien, estando ésta establecida, de la humedad de los agregados, de aquí que las medidas de la consistencia sirvan, entre otros fines, para controlar las variaciones de agua en la masa y den una idea de la falta de uniformidad que se pueden tener en las resistencia

2.4.2.1.2. La Trabajabilidad o Docilidad

Se considera como aquella propiedad del hormigón mediante la cual se determina su capacidad para ser colocado y consolidado apropiadamente y para ser terminado sin segregación dañina alguna.

Esta acepción comprende conceptos tales como moldeabilidad, cohesión y compactación, Dicha propiedad se altera por la composición de los agregados, la forma de las partículas y las proporciones del agregado, la cantidad de cemento, la presencia del aire incluido, los aditivos y la consistencia de la mezcla.

Los procedimientos señalados permiten que estos factores se tomen en consideración para lograr una facilidad de colocación satisfactoria de bajo costo.

La docilidad depende, entre otros factores, de los siguientes:

- De la cantidad de agua de amasado; cuanto mayor sea ésta, mayor será la docilidad.
- De la granulometría de los áridos, siendo más dóciles los hormigones cuyo contenido en arena es mayor, Pero por otra parte, a mayor cantidad de árido fino corresponde mayor agua de amasado necesaria y, por tanto, menor resistencia. Por ello las relaciones que indicamos no pueden extrapolarse más allá de ciertos límites.
- La docilidad es mayor con áridos redondeados que con áridos procedentes de machaqueo.

- La docilidad aumenta con el contenido de cemento y con la finura de éste.
- El empleo de un plastificante aumenta la docilidad del hormigón, a igualdad de las restantes características.

La trabajabilidad depende también, de la forma y tamaño del molde y de los medios de compactación disponibles; así, un hormigón de consistencia plástica puede ser ideal para su utilización como hormigón en masa en un pavimento, mientras que puede ser totalmente inadecuado para su empleo en una viga en sección en T fuertemente armada; en el primer caso el hormigón tendrá una buena docilidad y el segundo mala.

2.4.2.1.3. La segregación

La segregación de una mezcla de concreto se define como la separación de sus constituyentes por falta de cohesividad, de manera que su distribución deja de ser uniforme.

Las principales causas de la segregación en el concreto son la diferencia en tamaño de las partículas, la densidad de los constituyentes de la mezcla y la mala gradación de los agregados. La segregación se puede presentar de dos formas, la primera ocurre cuando se usan mezclas pobres y demasiado secas, de tal manera que las partículas gruesas tienden a separarse, bien sea porque se desplazan a lo largo de una pendiente o porque se asientan más que las partículas finas; el segundo tipo ocurre particularmente en mezclas húmedas, y se manifiesta por la separación de una parte de la pasta de los agregados.

2.4.2.1.4. Exudación o Sangrado

La exudación se considera como una forma de segregación en la que una parte del agua de mezcla tiende a elevarse a la superficie de una mezcla de concreto recién colocada.

La exudación de la mezcla trae consecuencias nocivas. Por un lado, la parte superior de una porción de concreto se vuelve demasiado húmeda lo que conlleva a estructuras porosas, débiles y poco durables. Por otra parte, si la evaporación del agua en la superficie del concreto es más rápida que la velocidad de la exudación se producen grietas plásticas de contracción. Otro problema que ocasiona la exudación es el agua que puede quedar atrapada debajo de las partículas gruesa de agregado o del acero de refuerzo, lo que genera zonas de baja adherencia y por lo tanto una eventual disminución en la resistencia, adicionalmente el agua deja tras de sí conductos capilares que incrementan la permeabilidad de la masa de concreto.

El fenómeno de la exudación se puede controlar con la utilización de un cemento con mayor finura de molido o con uno que contenga un alto contenido de álcalis, con el incremento de arenas finas, o con la utilización de inclusotes de aire.

2.4.2.2. Concreto endurecido

El concreto en estado endurecido toma aspecto y características de un cuerpo sólido, las cuales son aprovechadas para el uso de todo tipo de construcción. Estas características son: la resistencia a los esfuerzos mecánicos, durabilidad, impermeabilidad, densidad, acabado y estabilidad volumétrica.

2.4.2.2.1. Resistencia a la Compresión

La resistencia es una característica importante del hormigón; sin embargo, otras propiedades, tales como la durabilidad, la permeabilidad y la resistencia al desgaste son a menudo iguales o más importantes que ella. Estas características pueden estar relacionadas en general con la resistencia, pero se ven afectadas también por factores que no se encuentran asociados de manera significativa con dicha resistencia.

Para un conjunto dado de materiales y de condiciones, la resistencia del hormigón se determina por la cantidad neta de agua utilizada por cantidad unitaria de cemento. El contenido neto de agua excluye el agua absorbida por los agregados.

La resistencia a compresión simple es la característica mecánica más importante de un hormigón. Su determinación se efectúa mediante el ensayo de probetas. Ahora bien, los valores de ensayos que proporcionan las distintas probetas son más o menos dispersos, en forma variable de una obra a otra, según el cuidado y rigor con que se confeccione el hormigón; y esta circunstancia debe tenerse en cuenta al tratar de definir un cierto hormigón por su resistencia.

2.4.2.2.2. Resistencia a la Tracción

El hormigón es un material que presenta una resistencia a tracción baja, del orden de la décima parte de su resistencia a compresión. Esta debilidad de la resistencia a tracción es causa frecuente de la figuración del mismo.

La determinación de la resistencia a tracción del hormigón tiene importancia en determinados casos, especialmente cuando se requiere su

comportamiento frente a la fisuración. La fisuración del hormigón se produce como consecuencia del agotamiento de éste frente a la tracción cuando está sometida a esfuerzos de flexo tracción o de cortante debidos a sollicitaciones mecánicas, o cuando lo está a los esfuerzos ocasionados por la retracción hidráulica o térmica. Por otra parte, en elementos de hormigón armado con barras de alto límite elástico las deformaciones pueden ser elevadas y por consiguiente las tracciones en el hormigón, produciéndose fisuras en éste que pueden favorecer la corrosión del acero. Igualmente, en el diseño de hormigones en los que la característica fundamental es la impermeabilidad como ocurre en piscinas, depósitos, canales e incluso protecciones contra radiaciones, es conveniente conocer la resistencia a tracción del hormigón.

La determinación de la resistencia a tracción pura de un hormigón es muy difícil de llevar a efecto debido a las tensiones secundarias que se suelen introducir al realizar ensayos.

Los factores que inciden en la resistencia del concreto son: el tipo y cantidad de cemento utilizado, la relación agua/cemento, las características de los agregados, el tamaño máximo de los agregados, la cantidad y calidad del agua, el tiempo y condiciones de fraguado, el curado y la edad del concreto.

2.4.2.2.3. Durabilidad

La durabilidad es la propiedad del concreto de soportar aquellas exposiciones que pueden privarlo de su capacidad de servicio tales como ciclos de congelamiento y deshielo, sustancias químicas, ambientes marinos, abrasión, ciclos de humedecimiento y secado, ciclos de calentamiento y enfriamiento y otras tales como expansiones producidas por agregados que reaccionan químicamente con el cemento suelos y aguas agresivas, etc. La

resistencia a algunas de ellas puede fomentarse con el uso de aditivos inclusotes de aire, cementos Pórtland con puzolana y otros ingredientes especiales. La utilización agua/cemento bajas constituye un aspecto importante para conservar la vida útil del concreto puesto que reduce la penetración de líquidos agresivos.

2.4.2.2.4. Densidad

La densidad o peso volumétrico del concreto constituye también una característica importante, siendo algunas veces indispensables para la estabilidad de la estructura. Tal es el caso de las presas de gravedad macizos de anclaje, pesas para hundir tuberías, contrapesos en puentes elevadizos, estructuras para aislamiento de sonido, radiación, etc.

La densidad real de un hormigón depende fundamentalmente de la que tengan los agregados, de su gradación y del volumen de éstos que entre en su composición. De acuerdo con lo anterior, los hormigones de mayor densidad son los que se obtienen con agregados muy densos y con la composición de agregados más óptima (granulometrías muy bien estudiadas) de forma que den lugar a la máxima compacidad.

2.4.2.2.5. Compacidad

La estabilidad dimensional del hormigón puede considerarse bajo los aspectos de retracción y dilatación (entumecimiento) , provocados por variaciones en su agua interna bien libre o de gel; fluencia, consecuencia del cansancio que experimenta un hormigón constante cargado y que por tanto sufre deformación que puede tener una gran repercusión mecánica en algunos elementos estructurales, especialmente en los pretensazos; las variaciones dimensionales, consecuencia de los cambios de temperatura, etc.

El hormigón es estado endurecido toma el aspecto y características de una roca “artificial”, las cuales con aprovechadas para su uso en la construcción.

2.4.2.2.6. Acabado

Gracias a la moldeabilidad de la mezcla en estado fresco el concreto puede tomar diferentes texturas y formas dadas por los moldes, encofrados o herramientas especiales para obtener el llamado “concreto a la vista” “concreto arquitectónico” o acabado.

La angulosidad y granulometría del agregado, el volumen de exudación, y las proporciones de la mezcla del concreto son factores que pueden influir en el acabado.

En aquellos casos en que se presentan problema en el acabado, las propiedades del material y las proporciones de la mezcla deben ser revisadas a fin de determinar que es aquello que se puede hacer para mejorar la situación.

2.4.3. Clasificación del concreto

El concreto se puede clasificar desde varios puntos de vista siendo los más comunes por su resistencia, densidad o peso unitario, consistencia y refuerzo.

2.4.3.1. Según su resistencia

Desde el punto de vista de la resistencia a la compresión a los 28 días el concreto se puede clasificar en:

- **Concreto normal:** aquel con una resistencia entre 140 kg./cm² y 350 kg/cm².
- **Concreto de alta resistencia:** aquel con una resistencia entre 350 kg/cm² y 1000 kg/cm².
- **Concreto de ultra alta resistencia:** aquel cuya resistencia sea superior a 1000 kg/cm².

2.4.3.2. Según su peso unitario

- **Concreto liviano o ligero:** pueden ser concretos aislantes o estructurales. Su peso unitario varia entre 300 kg/m³ y 2000 kg/m³.
- **Concreto normal o corriente:** su peso unitario 2000 kg/m³ y 2600 kg/m³. agregados compactos provenientes de la desintegración de rocas ígneas.
- **Concreto pesado:** su peso unitario varia entre 2600 kg/m³ y 4500 kg/m³. agregados chancados.
- **Concreto muy pesados:** su peso unitario es mayor a 4500 kg/m³. Agregados pesados, magnetita, barita. Chatarra.

2.4.3.3. Según su consistencia

La consistencia es una medida indirecta de la trabajabilidad de una mezcla de concreto y se mide por medio del ensayo de asentamiento. De acuerdo con esto el concreto se puede clasificar por su trabajabilidad tal como lo muestra la tabla 2.8.

TABLA 2.8. Clasificación del concreto según su consistencia

Consistencia	Asent. cm.	Estructura	Compactado
Muy seca	0 a 2	Vigas o pilotes de alta Resistencia	Fuerte compactación o vibrado
Seca	2 a 3.5	Pavimentos vibrados, rodillados, elementos prefabricados Extrusados	Con máquina extrusadora. rodillos vibradores.
Semi-seca	3.5 a 5	Losas medianamente reforzadas	Puede moldearse satisfactoriamente por compactación o vibrado.
Media	5 a 10	Fundaciones de hormigón simple pilares, columnas, vigas.	Concreto plástico, fácilmente moldeable aunque requiera alguna compactación para colocarlo en las estructuras.
Húmeda	10 a 15	Secciones extremadamente reforzadas de difícil acceso. Revestimiento de túneles.	Concreto fácilmente colocable
Fluida	15 a 20	Secciones no estructurales, de difícil acceso.	Concreto que puede ser vertido en el lugar.

Fuente: Introducción al diseño de mezclas de hormigón Ing. Fernando Cerruto

2.4.3.4. Según el refuerzo

- **Concreto simple:** sin refuerzo de armadura.
- **Concreto armado:** con refuerzo de armadura.

2.4.4. Componentes del Concreto.

2.4.4.1. Agregados para el concreto

Es un material granular compuesto de partículas de origen pétreo de diferentes tamaños, duras y estables, cuyo objeto básico es constituir un esqueleto granular para el hormigón. Generalmente se integra mediante dos

o más fracciones, cada una de las cuales contiene una gama diferente de tamaños de partículas.

Los agregados ocupan entre el 60 % y el 80 % del volumen total del concreto. Están constituidos por la parte fina (arena) y la parte gruesa (grava o piedra triturada). El agregado fino o arena, abarca nominalmente partículas entre 75 μ (tamiz N° 200 según ASTM C33) y 4.75 mm. (Tamiz N° 4 según ASTM C33) hasta la dimensión de los fragmentos más grandes que contiene, cuya magnitud define el tamaño máximo del agregado en cada caso.

Propiedades como: una buena distribución de tamaños de partículas, forma y textura superficial apropiada; granos poco granosos, resistentes y duros, que no contengan sustancias químicas que reaccionen con la pasta de cemento, libres de limo, arcilla, materia orgánica, partículas débiles, etc., son indispensables para que puedan ser utilizados en el concreto.

El concreto de uso común se produce mediante la mezcla de tres componentes esenciales, cemento, agua y agregados, a los cuales necesariamente se incorpora aire (naturalmente atrapado o introducido a propósito) y eventualmente se incorpora otro componente que generalmente se designa como aditivo.

2.4.4.2. Cemento Portland

El cemento Portland es un producto comercial de fácil adquisición el cual mezclado con agua, ya sea solo o en combinación con arena, piedra u otros materiales similares, tiene la propiedad de reaccionar lentamente con el agua hasta formar una masa endurecida. Esencialmente es un clinker finamente molido, producido por la cocción a elevadas temperaturas de mezclas que contiene cal, sílice, alúmina y óxido de hierro en proporciones determinadas.

De los componentes del concreto el cemento hidráulico es el más costoso por unidad de peso. Sin embargo, comparado con otros materiales manufacturados, es poco costoso si se toma en cuenta la alta tecnología y el elevado grado de control que requiere su elaboración.

El cemento constituye entre el 7 y el 15 % del volumen total del concreto; es el componente activo de la mezcla y por tanto influye en todas sus características.

2.4.4.2.1. Composición química del cemento

Las materias primas usadas en la fabricación del cemento Pórtland (cal, sílice, alúmina y óxido de hierro) interaccionan en el horno hasta alcanzar un estado de equilibrio químico para formar una serie de productos más complejos llamados "compuestos de bogue". Estos productos se mencionan en la tabla 2.9.

TABLA 2.9 Compuestos del Cemento Portland "Compuesto de Bogue"

Compuesto	Fórmula Química	Abreviatura Usada
Silicato tricálcico o alita	3 Ca O Si O_2	$\text{C}_3 \text{ S}$
Silicato dicálcico o belita	2 Ca O Si_2	$\text{C}_2 \text{ S}$
Aluminato tricálcico	$2 \text{ Ca O Al}_2 \text{ O}_3$	$\text{C}_3 \text{ A}$
Ferro Aluminato tetracálcico	$4 \text{ Ca O Al}_2 \text{ O}_3 \text{ Fe}_2 \text{ O}_3$	$\text{C}_4 \text{ A F}$

Fuente: "Manual de Tecnología del Concreto" Tomo I. Comisión Federal de Electricidad - México

Los constituyente C_3S y C_2S forman del 70 al 80 % del cemento Pórtland son los más estables y los que más contribuyen a la resistencia del cemento.

El C_3S se hidrata más rápidamente que el C_2S y por lo tanto contribuyen al tiempo de fraguado y a la resistencia inicial. Su acción hidratadora está comprendida entre 24 horas y los 7 días, provocando el endurecimiento normal de la pasta del cemento y su elevada resistencia el séptimo día.

La contribución de la resistencia del C_2S toma lugar muy lentamente. Su acción endurecedora está comprendida entre los 7 y 28 días y puede continuar por encima de un año.

El C_3A se hidrata rápidamente y genera mucho calor solamente contribuye a la resistencia las primeras 24 horas y es el menos estable de los componentes del cemento. Además le proporciona al concreto propiedades indeseables, tales como cambios volumétricos y baja resistencia a los sulfatos.

El C_4AF cumple la función de catalizador y aporta poca resistencia al concreto.

2.4.4.2.2. Propiedades del cemento portland

La mayor parte de las especificaciones limitan la composición química y algunas propiedades físicas del cemento. El conocimiento del significado de algunas de estas propiedades es provechoso para interpretar los resultados de las pruebas del cemento.

2.4.4.2.2.1. Finura

Se la obtiene en la etapa de la molienda. Está íntimamente ligada al valor hidráulico del cemento, afectada la velocidad de las reacciones químicas que tienen lugar durante el fraguado y primer endurecimiento. Al aumentar la

finura aumenta la rapidez a la que se hidrata el cemento, acelerando la adquisición de resistencia. Los efectos del aumento de finura en la resistencia se manifiestan principalmente durante los primeros siete días.

2.4.4.2.2. Consistencia normal

El cemento, al amasarse con agua, forma una pasta suave y plástica que luego se rigidiza y endurece adquiriendo aspecto pétreo, debido a las reacciones químicas que verifican. Dependiendo de la cantidad de agua que se agregue, la pasta alcanza una determinada fluidez. Esto indica que habrá una determinada fluidez para una cierta cantidad de agua, considerada como la consistencia normal. La consistencia normal no es un parámetro directo que indique la calidad del cemento, como lo son la de estabilidad al volumen y los tiempos de fraguado.

2.4.4.2.3. Tiempo de fraguado

Cuando el cemento se mezcla con el agua, formando de esta manera la pasta mantiene una plasticidad casi constante durante un tiempo, luego del cual la pasta cambia del estado fluido al estado rígido, que se conoce como fraguado.

El tiempo de fraguado que si la pasta está o no sufriendo reacciones de hidratación normal, se considera en dos etapas elegidas en forma arbitraria: fraguado inicial y fraguado final. El fraguado inicial se mide por el lapso entre el amasado y la pérdida parcial de plasticidad de la pasta encontrándose el cemento parcialmente hidratado. El fraguado final se caracteriza porque la pasta deja de ser deformable ante cargas relativamente pequeñas con el cemento aun más hidratado. A partir de este momento comienza el endurecimiento de la pasta, proceso que se considera indefinido, aunque para efectos de construcción se estime a los 28 días. El fraguado va

acompañado de un aumento de temperatura caracterizándose el inicial por un cambio rápido y el final porque se presenta el máximo valor.

El tiempo de fraguado es importante porque da una idea del tiempo disponible para el mezclado, transporte, colocación, vibrado y afinado de concreto y morteros, la edad a la cual puede soportar cargas, así como la de permitir tránsito sobre ellas y la ejecución del tratamiento de curado.

2.4.4.2.2.4. Peso específico

El peso específico o densidad del cemento es la relación entre la masa de una cantidad dada y el volumen absoluto que ocupa en esa masa. En el cemento Pórtland puro, su valor varía entre 3.00 y 3.15 gr/cm³. El valor del peso específico del cemento en realidad no indica la cantidad de éste y su valor es usado principalmente para el diseño de mezclas.

2.4.4.2.2.5. Hidratación y calor de hidratación

Cuando un gramo de cemento cuyo diámetro promedio es de 50 μ , entra en contacto con el agua, no lo hace totalmente sino que forma una película superficial que pese a su aumento con el proceso de hidratación queda en el interior una parte sin reaccionar formando un núcleo inerte.

La velocidad de hidratación disminuye continuamente y es de próximamente 3.5 μ , en 28 días esto significa que las partículas relativamente gruesas pueden durar varios años en hidratarse o no hidratarse nunca, generando de esta manera un rendimiento pequeño del cemento.

Cuando el agua y el cemento reacciona, se genera calor de hidratación durante los procesos de fraguado y endurecimiento haciéndose importante

en estructuras de considerable masa, debido a que si no se disipan rápidamente puede ocurrir un incremento en la temperatura del concreto, produciendo una rápida revaporización del agua y cambios volumétricos que llevan a la contracción del material y su eventual agrietamiento. Las secciones estructurales delgadas disipan el calor de hidratación difundiendo al ambiente, intercambio que se hace más difícil a medida que se engruesa la sección.

2.4.4.2.2.6. Estabilidad de volumen o sanidad

Esta propiedad se refiere a la habilidad de una pasta endurecida a conservar su volumen después del fraguado ya que podría sufrir contracciones o aumentos de volumen, generando así esfuerzos perjudiciales a la masa del concreto endurecido.

El aumento de temperatura producido durante el proceso de fraguado hace que una parte del agua se evapora y origine una contracción en la pasta con eventual agrietamiento. La contracción lineal puede ser de aproximadamente 0.015 % en volumen y generalmente se presentan en los primeros dos o tres meses.

2.4.4.2.2.7. Resistencia mecánica

Esta es la propiedad más importante del cemento endurecido en cuando a requisitos estructurales y por esto está indicada en todas las especificaciones.

Aunque las resistencias deberían ser mediadas en pruebas sobre la pasta de cemento puro no se hace por la dificultad que tiene ser moldeada dando origen a una gran variación en los resultados.

De acuerdo con lo anterior en la mayoría de los países del mundo, se mide la resistencia por medio de morteros hechos con materiales específicos y en condiciones muy controladas. Las pruebas de resistencia que existen son las de compresión tensión y flexión, siendo la primera la más importante puesto que las otras tienen un valor muy pequeño relativo al de compresión.

La resistencia a la compresión se mide sobre cubos de mortero Standard de 5 cm. de lado curados de una manera prescrita y usado arena normalizada. Es claro que la resistencia del cemento no puede ser usada para predecir la resistencia del concreto con alto grado de aproximación debido a las muchas variables involucradas en las mezclas de concreto y los procedimientos de construcción.

2.4.4.2.3. Tipos de cementos

Debido a la notable evolución de la industria del cemento, se cuenta con diversos tipos. Generalmente los cementos se clasifican de acuerdo a la normalización del país de origen (en nuestro país se usa la norma Boliviana NB-011).

2.4.4.2.3.1 Según la Norma Boliviana NB-011

La norma boliviana NB-011 agrupa a los cementos en dos grupos: cementos Pórtland y cementos puzolánicos.

Con la denominación de cementos portland se tiene tres tipos:

- 1) Cementos Portland, tipo I
- 2) Cementos Portland con Puzolana, Tipo IP
- 3) Cementos Portland con filler Calizo, Tipo IF.

2.4.4.2.3.2. Según las Normas ASTM

Las normas ASTM (American Society for Testing and Materials) de los Estados Unidos clasifica 5 tipos de cementos Portland enumerados del I al V. En la tabla 2.10 se aprecian los diferentes tipos de cemento, sus características, los límites usuales para cada uno de los componentes la resistencia a la compresión a las edades 1 y 28 días y por último algunos tipos de estructuras donde se puede usar ese tipo de cemento.

TABLA 2.10 Tipos de cementos Portland según Normas ASTM.

Tipo	Características	Composición Química				Resistencia Relativa %		Ejemplos de uso
		C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	1 día	28 días	
I	Uso general	40 a 55	25 a 30	3 a 15	5 a 10	100	100	Para obras de concreto en general donde no se requieren propiedades especiales de otros tipos de cemento.
II	Resistencia moderada a los sulfatos y bajo calor	40 a 50	25 a 35	8	10 a 15	75	90	Estructura de drenaje donde las concentraciones de sulfatos en aguas subterráneas son un poco más altas de lo normal. En estructuras de masa considerable.
III	Altas resistencias iniciales	50 a 63	15 a 20	3 a 15	8 a 12	190	190	En estructuras donde se requiere quitar los encofrados tan pronto como sea posible o cuando la estructura debe ponerse al servicio rápidamente.
IV	Muy bajo calor de hidratación	25 a 35	40 a 50	7	10 a 15	55	75	Para estructuras de concreto masivo, como grandes presas, donde el aumento de temperatura es un factor crítico resultado de un alto calor generado durante el endurecimiento.
V	Alta resistencia a los sulfatos	32 a 42	38 a 48	5	10	65	85	Para estructuras en suelos o en contacto con aguas subterráneas con un alto contenido de sulfato.

Fuente: "Manual de Tecnología del Concreto" Tomo I. Comisión Federal de Electricidad - México.

2.4.4.2.4 Especificaciones del Cemento y Recomendaciones para el Suministro y Almacenamiento

Para la elaboración de los distintos tipos de hormigones se debe usar sólo de cemento que cumplan las exigencias de la NORMA BOLIVIANA referentes al cemento Pórtland (N.B 2.1 – 001 hasta N.B. 2.1-014) las NORMAS AMERICANAS ASTM C-150 para cementos de tipo I, II y V .además se deben tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- a) El cemento debe ser capaz de proporcionar al hormigón las cualidades exigidas tanto en estado fresco como endurecido.
- b) En ningún caso se deben utilizar cementos desconocidos o que no lleven el sello de calidad otorgado por el organismo competente.
- c) El cemento utilizado en obra debe ser del mismo tipo y marca que el cemento empleado para la selección de las proporciones de la mezcla en laboratorio.
- d) Se recomienda que si la manipulación del cemento se va a realizar por medios mecánicos su temperatura no exceda de 70°C y si se va a realizar a mano no exceda del mayor de los dos límites siguientes: a) cuarenta grados centígrados, y b) temperatura ambiente más cinco grados centígrados.
- e) Cuando la temperatura del cemento excede de 70° C deberá comprobarse con anterioridad a su empleo, que éste no presenta tendencia a experimentar falso fraguado; de otro modo su empleo no está permitido, hasta que se produzca el enfriamiento.

- f) Cuando el suministro se realiza en sacos, el cemento se recibirá en obras en los mismos envases cerrados en que fue expedido de fábrica y se almacenará en sitio ventilado y protegido, tanto de la intemperie como de la humedad del suelo y de las paredes. Si el suministro se lo realiza a granel, el almacenamiento se llevara a cabo en silos o recipientes que lo aíslen de la humedad.

- g) Si el periodo de almacenamiento ha sido superior a un mes se comprobará que las características del cemento continúan siendo adecuadas. Para ello se realizarán los oportunos y previos ensayos de fraguado y resistencias mecánicas a tres y siete días, sobre una muestra representativa del cemento almacenando sin excluir los terrones que hayan podido formarse.

- h) De cualquier modo, salvo en los casos en que el nuevo periodo de fraguado resulte incompatible con las condiciones particulares de obra, la sanción definitiva acerca de la idoneidad del cemento en el momento de su utilización vendrá dada por los resultados que se obtengan al determinar la resistencia mecánica del hormigón a 28 días.

2.4.4.3. Agua para la mezcla de concreto

El agua es el elemento por el cual el cemento desarrolla sus propiedades aglutinantes ya que en presencia de ella experimenta reacciones químicas dándole las características de fraguar y endurecer.

El agua se usa en la elaboración del concreto para propósitos diferentes: como agua de mezclado, como agua de curado y como agua de lavado de los agregados.

2.4.4.3.1. Agua de mezclado

El agua de mezclado es aquélla que se la agrega al cemento para formar la pasta. Tiene como funciones hidratar el cemento y proporcionar una fluidez a la mezcla tal que, con una lubricación adecuada de los agregados, se obtenga la manejabilidad del concreto deseada cuando éste se encuentre en estado fresco. El agua de mezclado forma aproximadamente el 15 % del volumen total del concreto de donde, 5 % sirve para hidratar el cemento y el 10 % restante lubrica al concreto y luego se evapora durante el proceso de fraguado.

A medida que el cemento se hidrata, la mezcla plástica va pasando al estado rígido durante el proceso de fraguado. En este proceso, la temperatura del concreto se eleva como consecuencia de las reacciones químicas que se efectúan entre el cemento y parte del agua, incrementando así la evaporación del resto de ésta. De acuerdo con esto, el agua de mezclado se puede considerar bajo 2 formas: agua de hidratación o no evaporable y agua evaporable.

La fluidez de la pasta depende de la calidad de agua de mezclado. Si se aumenta esta cantidad sin modificar el contenido de cemento, la parte de agua de hidratación del cemento permanece constante, incrementándose así la parte de agua evaporable; cierta porción de ésta queda atrapada en el interior del concreto y al producirse evaporación se forma una serie de conductos capilares que se llena de aire, generando un concreto endurecido poroso, menos resistente y más permeable. Por esto, la dosificación del agua de mezclado se debe hacer un control muy estricto.

En general, se puede decir que cualquier agua natural sea apta para el consumo humano y no tenga ni sabor u olor fuertes pueden ser usados para la elaboración de concretos, sin que éste se implique que el agua necesariamente sea potable. Las impurezas que pueden haber disueltas en el agua o presentes en forma de suspensiones, tales como azúcar , ácidos, sales ,materia vegetal, aceites, sulfatos, etc., pueden interferir con la hidratación del cemento retrasando así el tiempo de fraguado y reduciendo la resistencia del concreto. Como estos efectos varían de manera acentuada con la marca y tipo de cemento usado así como la riqueza de la mezcla (cantidad de cemento), es conveniente conocer las cantidades de impurezas presentes en el agua.

2.4.4.3.2. Agua de curado

Se la emplea del fraguado del hormigón y permite continuar con el proceso de fraguado en combinación con temperaturas adecuadas.

Las aguas adecuadas para el amasado lo son también para el curado. El peligro de las sustancias nocivas para el amasado no lo es tanto para el curado debido principalmente a que el agua de curado está en contacto con el hormigón durante un tiempo relativamente corto. Esta agua, en curados de poca duración, puede contener más materia orgánica e inorgánica que las de amasado, especialmente si no importa que el hormigón adquiera manchas superficiales, lo que suele ocurrir con frecuencia si existen sales de hierro y el agua discurre lentamente sobre las superficies y se va evaporando. No obstante, en curados prolongados y especialmente cuando se realizan por inmersión en agua, los mismos porcentajes de sustancias nocivas pueden ser más perjudiciales que las contenidas en el agua de amasado.

Si el control de las impurezas del agua destinadas al amasado es importante igualmente lo es para las aguas destinadas al curado del hormigón.

2.4.4.3.3. Agua de lavado de los agregados

No interviene en forma directa en la mezcla ni en el proceso de fraguado, pero es importante en el preparado inicial de los agregados.

Las aguas empleadas en el lavado de agregado no deben contener excesiva cantidad de sustancias en suspensión o disueltas que produzcan películas dañinas o poco adherentes sobre las superficies de los agregados. Igualmente debe ocurrir con el agua empleada en la limpieza de hormigoneras y equipos de hormigonado.

2.4.4.3.4. Calidad del agua

Cuando se presente duda acerca del agua para la producción de concreto se deben efectuar pruebas para verificar tanto el tiempo de fraguado como la resistencia.

Según la norma boliviana del hormigón armado el agua tanto para el amasado como para el curado del hormigón debe ser limpia y deberán rechazarse las que no cumplan una o varias de las siguientes condiciones:

Exponente de hidrógeno pH ≥ 5

(Determinando según NB./UNE 7234).

Sustancias disueltas < 15000 mg/lit

(Determinadas según N.B./UNE 7130).

Sulfatos, expresados en $S O_4^-$ < 1000 mg/lit

(Determinadas según N.B/ UNE 7131).

Ion cloro Cl^- < 6000 mg/lit

(Determinadas según N.B/ UNE 7178).

Hidratos de carbono0

(Determinadas según N.B./ UNE 7132).

Sustancias orgánicas solubles en éter..... < 15000 mg/lit

(Determinadas según N.B./ UNE 7235).

La toma de muestra para estos ensayos, se hará según N.B. / UNE 7236.

La temperatura del agua para la preparación del hormigón será superior a los 5°C.

2.5. Dosificación para mezclas de concreto

La selección de las proporciones de los materiales integrantes de la mezcla de concreto, conocida como diseño de la mezcla, puede ser definida como: El proceso de selección de los ingredientes más adecuados y de la combinación más conveniente y económica de los mismos, con la finalidad de obtener un producto que en el estado no endurecido tenga trabajabilidad y consistencia adecuadas, y que endurecido cumpla con los requisitos establecidos por el diseñador o los indicados en los planos y/o las especificaciones de obra. También se debe tomar en cuenta las condiciones de colocación, la calidad de los componentes del concreto y la experiencia del personal profesional y técnico.

La selección de las proporciones del concreto incluye un balance entre una economía razonable y los requerimientos para lograr la colocación, resistencia, durabilidad, peso unitario y apariencia adecuadas. Las

características requeridas están determinadas por el uso al que estará destinado el concreto y por las condiciones esperadas en el momento de la colocación.

2.5.1. Métodos de dosificación

Existen varios métodos y reglas para dosificar teóricamente mezclas de concreto, pero no son más que orientativos, pues se basan en pruebas de laboratorio y de campo en concretos elaborados con materiales propios del lugar donde el método ha sido desarrollado. Por ello, salvo en obras de poca importancia, las proporciones definitivas de los componentes del concreto deben ser constatadas y corregidas mediante mezclas (la prueba en laboratorio, introduciendo después en obra las correcciones que resulten necesarias o convenientes).

Entre los diversos métodos de dosificación, los más conocidos son los siguientes:

- El método del ACI (USA American Concrete Institute).
- El método de O'Reilly (Cuba).
- El método de Jiménez- Montoya (España).

Aunque hoy en día existen diversos métodos de dosificación disponibles, y ellos dan aproximadamente las mismas proporciones relativas de materiales, probablemente el método más común y utilizado en Norte América y muchos países, entre los cuales se incluye Bolivia, es la "Práctica Recomendable Para Dosificar Concreto Normal y Concreto Pesado ACI -211".

2.5.2. Métodos de dosificación utilizados en Bolivia

La dosificación de mezclas de concreto en nuestro país se la puede dividir en dos grupos de acuerdo a la magnitud de la obra.

- a) Para obras de poca importancia, se utilizan reglas empíricas y dosificaciones prefijadas especificando las proporciones de los componentes en volumen. Por ejemplo, una práctica común consiste en especificar las proporciones de la siguiente manera: A:B:C , donde A es el número de partes (en volumen) de cemento, B es el número de partes (en volumen) de arena y C es el número de partes (en volumen) de grava, independientemente de las características de los agregados. El agua es añadida de modo que se tenga la trabajabilidad deseada, generalmente variable de una mezcla a otra.
- b) Para obras de mayor importancia, se utilizan métodos de procedencia extranjera, los cuales fueron creados para agregados y cementos distintos a los utilizados en nuestro país, y por estas razones tales proporciones deben ser verificadas y corregidas en mezclas de prueba en laboratorio y en campo. El método más difundido en nuestro país es el método ACI.

2.6. Método ACI 211.1.74 de la American Concrete Institute

Para la determinación de las cantidades de materiales componentes de la mezcla de concreto de propiedades deseadas, se han desarrollado procedimientos semi-analíticos de naturaleza empírica, debido a su dependencia de datos tabulados obtenidos de un gran número de mezclas de prueba.

Estos procedimientos permiten calcular con cierta exactitud las cantidades de los ingredientes de la mezcla para una variedad de condiciones. Uno de estos procedimientos de uso muy amplio es el de la ACI 211.1 el cual se refiere a la práctica recomendada para dosificar concreto normal. Pesado y en masa.

En la medida de lo posible, la selección de las proporciones del concreto debe estar basada en la información obtenida de las pruebas o en experiencia con los materiales que van a usarse. La información mencionada es la siguiente:

- Análisis granulométrico de los agregados finos y gruesos.
- Peso unitario del agregado grueso.
- Peso específico y absorción de los agregados.
- Requerimiento de agua de mezclado del concreto, de acuerdo a la experiencia obtenida con los agregados disponibles.
- Relaciones entre la resistencia y la relación agua/cemento para las combinaciones disponibles de cemento y agregado.

Las estimaciones de las tablas 2.11 y 2.12, respectivamente, pueden usarse cuando no se cuente con información disponible de los dos últimos puntos.

La estimación de los pesos requeridos para las mezclas de concreto comprende una secuencia de pasos lógicos y directos que, en efecto concuerda con las características de los materiales disponibles para obtener

una mezcla apropiada para la obra. Frecuentemente el problema de la adaptabilidad no se deja al individuo que selecciona las proporciones.

Las especificaciones de la obra pueden contener todos o algunos de los siguientes puntos:

- Relación agua/cemento máxima.
- Contenido mínimo de cemento.
- Contenido de aire.
- Asentamiento.
- Tamaño máximo del agregado.
- Resistencia.
- Otros requerimientos que se relacionen con temas tales como la resistencia de sobre diseño, aditivos y tipos especiales de cemento o agregado.

Independientemente de que las características del concreto se señalen en las especificaciones o se dejen al individuo que seleccione las proporciones, el establecimiento de los pesos de la mezcla por metro cúbico de concreto puede obtenerse mediante la siguiente secuencia:

- 1) Elección de asentamiento.
- 2) Elección del tamaño máximo del agregado.
- 3) Estimación del agua de mezclado y contenido de aire.
- 4) Selección de la relación agua/cemento.
- 5) Calculo del contenido de cemento.
- 6) Estimación del contenido de agregado grueso.
- 7) Estimación del contenido de agregado fino.
- 8) Corrección por absorción y humedad de los agregados.
- 9) Ajustes en la mezcla de prueba.

2.6.1. Paso 1. Elección de asentamiento

Si el asentamiento no está especificado, se puede elegir un valor apropiado para la obra de acuerdo a la tabla 2.11. Deben usarse mezclas de consistencia muy rígida que puedan colocarse eficientemente.

TABLA 2.11. Asentamiento recomendados para diversos tipos de Construcción sistemas de colocación y compactación.

Consistencia	Asentamiento cm.	Ejemplo de tipo de construcción	Sistema de colocación	Sistema de compactación
Muy seca	0-2.0	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	2.0-3.5	Pavimentos	Pavimentadoras con terminadora vibratoria	Secciones sujetas a vibración intensa
Semi - seca	3.5-5.0	Pavimentos, fundaciones en hormigón simple	Colocación con máquinas operadas manualmente	Secciones simplemente reforzadas, con vibración
Media	5.0-10.0	Elementos compactados a mano, losas, muros, vigas	Colocación manual	Secciones medianamente reforzadas, sin vibración
Húmeda	10.0-15.0	Elementos estructurales esbeltos	Bombeo	Secciones bastante reforzadas, sin vibración
Muy húmeda	15.0 o más	Elementos muy esbeltos, pilotes fundidos "in situ"	Tubo-embudo Tremie	Secciones altamente reforzadas, sin vibración (Normalmente no adecuados para vibrarse)

Fuente: "Práctica Recomendable para Dosificar Concreto Normal y Concreto Pesado" ACI 211.1.

2.6.2. Paso 2. Elección del tamaño máximo del agregado

Los agregados bien graduados de tamaño máximo tienen menos vacíos que los de tamaños menores. De aquí que los concretos con agregados de mayor tamaño requieran menos mortero por unidad de volumen de concreto. Generalmente, el tamaño máximo del agregado debe ser el mayor que se encuentre disponible económicamente y el que resulte compatible con las dimensiones de la estructura. Bajo ninguna circunstancia el tamaño máximo debe exceder de una quinta parte de la menor dimensión entre los lados de las cimbras, de una tercera parte del peralte de las losas, ni de tres cuartas partes del espaciamiento libre entre varillas individuales de refuerzo, haces de varilla o cables pretensados. En algunas ocasiones estas limitaciones se descartan si la trabajabilidad y los métodos de compactación son tales que el concreto puede ser colocado sin que se formen cavidades o vacíos.

2.6.3. Paso 3. Estimación del agua de mezclado y contenido de aire

La cantidad de agua por unidad de volumen de concreto requerida para producir un asentamiento dado depende de tamaño máximo, de la forma de la partícula y de la granulometría de los agregados, así como de la cantidad de aire incluido. La cantidad de cemento no la afecta en mayor grado. En la tabla 2.12. Se proporcionan estimaciones con respecto a la cantidad de agua de mezclado requerida para concretos elaborados con varios tamaños máximos de agregado para concretos sin aire incluido.

Dependiendo de la forma y la textura del agregado, los requerimientos de agua de mezclado pueden estar un tanto por encima o por debajo de los valores de la tabla 2.12, pero son suficientemente precisos para una primera estimación. Tales diferencias en los requerimientos de agua no se reflejan

necesariamente en la resistencia, ya que existen otros factores compensatorios que pueden estar incluidos.

TABLA 2.12 Requerimiento aproximado de agua de mezclado y contenido de agua para diferentes asentamientos y tamaño máximos de agregados.

Asent. (cm)	Tamaño máximo nominales del agregado, en (mm.)							
	10.00 (mm.)	12.50 (mm.)	19.00 (mm.)	25.00 (mm.)	38.00 (mm.)	50.00 (mm.)	75.00 (mm.)	150.00 (mm.)
	Agua de mezclado, en kg/m ³ de concreto. Concreto sin aire incluido							
3.0 a 5.0	205	200	185	180	160	155	145	125
8.0 a 10.0	225	215	195	195	175	170	160	140
15.0 a 18.0	240	230	210	205	185	180	170	-
% aproximado								
de aire atrapado	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2

Fuente: "Práctica Recomendable para Dosificar Concreto Normal y Concreto Pesado" ACI 211.1.

Por ejemplo, con un agregado grueso redondo y uno angular, ambos graduados similarmente y de buena calidad, puede producirse concreto de aproximadamente igual resistencia a la compresión utilizando la misma cantidad de cemento, a pesar de las diferencias en la relación agua/cemento resultante de los distintos requerimientos de agua de mezclado. La forma de la partícula en sí no constituye un indicio de que un agregado esté por encima o por debajo del promedio en su capacidad de producción de resistencia.

2.6.4. Paso 4. Selección de la relación agua/cemento

Los requerimientos de la relación agua/cemento se determinan no sólo por los requerimientos de resistencia sino también por factores tales como la durabilidad y las propiedades de acabado. Ya que los diferentes agregados y cementos generalmente producen resistencias distintas con la misma

relación agua/cemento, es altamente recomendable desarrollar la correspondencia entre la resistencia y la relación (agua/cemento) para los materiales a usarse. En ausencia de tal información, pueden tomarse los valores aproximados y relativamente conservadores de cemento Portland Tipo I que se indican en la tabla 2.13. Con materiales típicos, las relaciones agua/cemento tabuladas deben producir las resistencias mostradas, que están basadas en pruebas a los 28 días de muestras curadas bajo condiciones standard de laboratorio. La resistencia promedio seleccionada debe, desde luego, exceder a la resistencia especificada por un margen suficiente, para mantener el número de pruebas de resistencias bajas dentro de los límites especificados.

TABLA 2.13 Relación agua/cemento y resistencia a la compresión del concreto

Resistencia a la compresión a los 28 días (kg/cm²) *	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
450	0.38	-
400	0.43	-
350	0.48	0.40
300	0.55	0.46
250	0.62	0.53
200	0.70	0.61
150	0.80	0.71

*Los valores indican las resistencias promedio estimadas para concreto conteniendo un % de aire no mayor que el indicado en la tabla 2.13. con cilindros de 15 x 30 cm., curados en húmedo por 28 días a 23°C (+-) 1.7°C, tamaño máximo de agregados de 20 a 30 mm.

Fuente: "Práctica Recomendable para Dosificar Concreto Normal y Concreto Pesado" ACI 211.1.

2.6.5. Paso 5. Cálculo del contenido de cemento

La cantidad de cemento por unidad de volumen de concreto se obtiene de las determinaciones efectuadas en los (pasos 3 y 4). El cemento requerido es igual al contenido estimado de agua de mezclado (paso 3), dividido entre la

relación agua/cemento (paso 4). Si, no obstante, la especificación incluye por separado un límite mínimo de cemento además de los requerimientos de resistencia y durabilidad, la mezcla debe basarse en aquel criterio que conduzca a la mayor cantidad de cemento.

2.6.6. Paso 6. Estimación del contenido de agregado grueso

Los agregados esencialmente similares en granulometría y en tamaño máximo producirán un concreto de trabajabilidad satisfactoria cuando se emplee un volumen determinado de agregado grueso y seco, compactado con varilla, por volumen unitario de concreto. En la tabla 2.14. se proporcionan los valores adecuados para este volumen de agregado. Se puede observar que, para obtener una trabajabilidad similar, el volumen de agregado grueso para un volumen unitario de concreto sólo depende de su tamaño máximo, y del módulo de finura del agregado fino.

Las diferencias en la cantidad de mortero necesaria para obtener la trabajabilidad con agregados distintos, debidas a la forma y granulometría de las partículas, quedan automáticamente compensadas con las diferencias en el contenido de vacíos en el agregado seco y compactado con varilla.

El volumen del agregado grueso, seco y compactado con varilla, por metro cúbico de concreto, se muestra en la tabla 2.14. Este volumen se convierte al peso seco del agregado grueso requerido por metro cúbico de concreto multiplicándolo por el peso volumétrico de agregado grueso, seco y compactado con varilla.

TABLA 2.14 Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto

Volumen de agregado grueso, seco y compactado con varilla, por volumen unitario de concreto para diferentes módulos de de finura de la arena (m³)					
Tamaño máximo nominal del agregado		Módulo de finura de la arena			
mm.	pulg.	2.40	2.60	2.80	3.00
10.0	3/8"	0.50	0.48	0.46	0.44
12.5	1/2"	0.59	0.57	0.55	0.53
20.0	3/4"	0.66	0.64	0.62	0.60
25.0	1"	0.71	0.69	0.67	0.65
38.0	1 1/2"	0.75	0.73	0.71	0.69
50.0	2"	0.78	0.76	0.74	0.72
70.0	3"	0.82	0.80	0.78	0.76
150.0	6"	0.87	0.85	0.83	0.81

Los volúmenes están basados en agregados secos y compactos con varilla, como se describe en la A.S.T.M. C-29. Estos volúmenes se han seleccionado de relaciones empíricas para producir un hormigón con un grado de manejabilidad apropiado para la construcción reforzada usual. Para obtener un hormigón con menos trabajabilidad como el que se utiliza en la construcción de pavimentos de hormigón, estos valores se pueden aumentar en un 10%. Para hormigón con más trabajabilidad como el que algunas veces se requiere cuando la colocación se efectúa por bombeo, estos valores se pueden reducir hasta en un 10%.

El módulo de finura de la arena es igual a la suma de las relaciones (acumulativas) retenidas en tamices de malla con aberturas de 0.149, 0.297, 0.595, 1.19, 2.38 y 4.76 mm.

Fuente: "Práctica Recomendable para Dosificar Concreto Normal y Concreto Pesado" ACI 211.1.

2.6.7. Paso 7. Estimación del contenido de agregado fino

Al concluir el paso 6, se habrán calculado todos los ingredientes del concreto, a excepción del agregado fino. Su cantidad se determina por medio de las diferencias. Se puede emplear cualquiera de estos dos procedimientos: el método "por peso" o el método de "volumen absoluto".

2.6.7.1 Método de peso

Si el peso del volumen unitario de concreto se presupone o puede estimarse por experiencia, el peso requerido de agregado fino es simplemente la

diferencia entre el peso de concreto fresco y el peso total de los otros ingredientes. Por lo general, en base a experiencias anteriores con los materiales, se conoce el peso unitario del concreto con una precisión razonable. Si no se cuenta con esta información, se puede usar la tabla 2.15. para hacer una primera estimación.

TABLA 2.15 Primera estimación del peso del concreto fresco.

Tamaño máximo del agregado (mm.)	Primera estima del peso del concreto fresco (kg/m ³)	
	Concreto sin aire incluido (kg/m ³)	Concreto con aire incluido (kg/m ³)
10.0	2285	2190
12.5	2315	2235
20.0	2355	2280
25.0	2375	2315
38.0	2420	2355
50.0	2445	2375
80.0	2465	2400
150.0	2505	2435

Valores han sido calculados con la ecuación 2. 1. para concretos medianamente ricos (330 Kg. de cemento por m³) y revenimiento medio, con un agregado cuyo peso específico es 2.7. Los requerimientos de agua están basados en los valores de revenimiento 8 a 10 cm., de la Tabla 2.12. Si se desea se puede precisar más la estimación del peso, como se indica a continuación, siempre que se posea la información necesaria: por cada 5 Kg. de diferencia en el agua de mezclado de la Tabla 2.12, para valores de 8 a 10cm de revenimiento, se corregirá el peso por m³ en 8Kg en la dirección opuesta; por cada 20 Kg. de diferencia en el contenido de cemento de 330 Kg. se corregirá el peso por m³ en 3 Kg. en la misma dirección; por cada 0.1 de desviación de 2.7 en el peso específico del agregado, se corregirá en 70 Kg. el peso del concreto en la misma dirección.

Fuente: " Práctica Recomendable para Dosificar Concreto Normal y Concreto Pesado" ACI 211.1.

Si se desea obtener un cálculo teóricamente exacto del peso del concreto fresco por metro cúbico, se puede utilizar la siguiente fórmula:

$$U_m = 10 * G_a * (100 - A) + C_m * (1 - G_a / G_c) - W_m * (G_a - 1) \quad (2.1)$$

Donde:

U_m = peso volumétrico del concreto fresco, kg/m^3

G_a = promedio obtenido de los pesos específicos de los agregados fino y grueso

G_c = peso específico del cemento

A = contenido de aire, por ciento.

W_m = requerimiento de agua de mezclado, kg/m^3

C_m = requerimiento de cemento, kg/m^3

2.6.7.2. Método por volumen

Un procedimiento más exacto para calcular la cantidad requerida de agregado fino se basa en el uso de los volúmenes de los ingredientes. En este caso, el volumen total de los ingredientes conocidos (agua, aire, cemento y agregado grueso) se resta del volumen unitario de concreto para obtener el volumen requerido de agregado fino. El volumen que cualquier ingrediente ocupa en el concreto es igual a su peso dividido entre el peso específico de ese material (siendo este último el producto del peso unitario del agua y la densidad del material).

2.6.8. Paso 8. Corrección por absorción y contenido de humedad de los agregados

Debe considerarse la humedad de los agregados para pesarlos correctamente. Por lo general, los agregados están húmedos y a su peso seco habrá que aumentarle el porcentaje de agua que contenga, tanto la absorbida como la superficial. El agua de mezclado que se agrega a la mezcla debe reducirse en una cantidad igual a la de la humedad libre que contiene el agregado, esto es, humedad total menos absorción.

2.6.9. Paso 9. Ajustes en la mezcla de prueba

Se deben verificar las proporciones calculadas de la mezcla por medio de mezclas de prueba preparadas y probadas de acuerdo a la Norma ASTM C 192, "Fabricación y curado de muestras de concreto en laboratorio" o con mezclas de campo de tamaño completo. Sólo debe usarse el agua suficiente para producir el revenimiento requerido sin considerar la cantidad supuesta en las proporciones de prueba. Se debe verificar el peso unitario y el rendimiento del concreto (ASTM C 138) así como el contenido de aire (ASTM C 138, C 173, C 231). También debe observarse cuidadosamente que el concreto posea la trabajabilidad y las propiedades de acabado adecuadas y esté libre de segregación. Se deberán hacer los ajustes pertinentes con las proporciones de mezclas subsecuentes siguiendo el procedimiento indicado a continuación.

- Se estima de nuevo la cantidad de agua de mezclado necesaria por metro cúbico de concreto, dividiendo el contenido neto de agua de mezclado de la mezcla de prueba entre el rendimiento de la mezcla de prueba en metros cúbicos. Si el asentamiento no fue el correcto, se aumenta o disminuye la cantidad re estimada de agua en 2 kg. por cada centímetro de aumento o disminución del asentamiento requerido.
- Si no se obtuvo el contenido deseado de aire (para concreto con aire incluido), se estima nuevamente el contenido de aditivo requerido para el contenido de aire adecuado, y se reduce o aumenta el contenido de agua de mezclado, en 3 kg./m³ por cada 1 % de contenido de aire que deja aumentarse o reducirse de la mezcla de prueba previa.
- Si la base para la dosificación es el peso estimado por metro cúbico de concreto fresco, la reestimación de ese peso se obtiene reduciéndole o

aumentándole el porcentaje determinado por anticipado de aumento o disminución del contenido de aire de la mezcla, ajustado con respecto a la primera mezcla de prueba.

- Se calculan los nuevos pesos de la mezcla partiendo del paso 4, modificando el volumen de agregado grueso, si es necesario, para obtener una trabajabilidad adecuada.

2.7. Método O'reilly

El Dr. Vitervo O'Reilly, observó en los trabajos y estudios de varios investigadores, algunos inconvenientes, contradicciones y disparidad de opiniones como las siguientes:

- Desde el punto de vista de la composición óptima de los agregados no se presta toda la atención a la influencia de la forma de las partículas y se parte sólo de su composición granulométrica.
- Para la elaboración de hormigones utilizados en la producción de elementos prefabricados en Cuba (relación agua/cemento menor a 0.40) no es válida la relación de Bolomey.
- Una serie de métodos, apoyados en experiencias obtenidas por muchos años y en una cantidad considerable de ensayos, carecen, no obstante, de los datos precisos sobre las condiciones locales (bajo las cuales se desarrollan los trabajos) y no permiten establecer una generalización de la aplicación de sus cálculos.

- La mayoría de las ecuaciones para el cálculo de la resistencia del hormigón, empleadas actualmente, no tienen en cuenta la influencia de la consistencia de la mezcla del hormigón.
- Si son analizadas las características de los materiales de los diferentes países, utilizados en la producción del hormigón, la mayor diferencia de los requerimientos tecnológicos lo manifiesta el agregado en cuanto a lo desfavorable de su forma. Hasta la fecha no muchos autores se han dedicado al estudio de esta problemática. A las opiniones de Feret y Kaplan, que atribuyen a la forma de la grava una singular importancia, se oponen los criterios de Walkers, Prudely, Gordon, Berezin y Galaktinov, quienes no le confieren ninguna influencia o sólo en una medida insignificante.
- Los procedimientos tecnológicos, los ensayos de laboratorio y los requerimientos de calidad de los materiales básicos, se basaban (en Cuba), en su mayoría, en las normas norteamericanas, las cuales se están sustituyendo paulatinamente por las normas cubanas, que parten, en muchos casos, de la información y experiencia extranjeras. Sin embargo, este procedimiento, sin estar verificado de forma directa en las condiciones locales, conduce con frecuencia, al empleo poco económico de los materiales básicos, especialmente del cemento.

Los pasos a seguir para dosificar mezclas de concreto mediante este método son los siguientes:

- 1) Determinar, experimentalmente, la relación óptima de la mezcla de arena y grava.
- 2) Determinar la característica "A" de los agregados".
- 3) Determinar la cantidad de cemento.

2.7.1. Determinar, experimentalmente, la relación óptima de la mezcla de arena y grava

El factor de forma de los agregados gruesos es decisivo y más fuerte que el factor de la granulometría por lo que no es posible determinar la relación óptima de los agregados gruesos finos por los métodos basados en la granulometría ideal.

El método más preciso es el experimental, que se basa en la determinación del porcentaje de vacíos de la mezcla de los agregados finos y gruesos. El porcentaje de vacíos y la superficie específica mínima de la mezcla de agregados, señalarán la composición óptima, la cual requerirá una cantidad mínima de cemento.

Como primer paso, debe determinarse el peso unitario compactado de la mezcla de los agregados, para ello, se deberán ensayar las combinaciones de los agregados con las proporciones en peso.

En este método, no es requisito indispensable que los agregados cumplan con las definiciones dadas por norma, se ensayan tal como viene desde el banco de provisión (normalmente en forma directa desde los ríos de donde se extraen); es decir, que tanto la grava como la arena no estén separados por el tamiz N° 4 ni que cumplan con las curvas granulométricas. En este entendido, los agregados pueden tener dentro de su composición una mezcla natural de partículas gruesas y partículas finas, aspecto que en otros métodos de dosificación es inaceptable, puesto que las cantidades de material viene indicadas en tablas (Tabla 2.16).

TABLA 2.16 Proporciones de mezcla de los agregados

Proporción %		Proporción en peso kg.	
Arena	Grava	Arena	Grava
35	65	14	26
40	60	16	24
45	55	18	22
50	50	20	20
55	45	22	18
60	40	24	16
65	35	26	14

Nota: Se recomienda realizar como mínimo tres réplicas o series de proporciones variando o ampliando el porcentaje de la primera proporción y/o el número de las proporciones indicadas.
Fuente: Introducción al diseño de mezclas de hormigón Ing. Fernando Cerruto

Los ensayos se realizarán por el mismo procedimiento que se emplea para determinar el peso unitario compactado de la arena y el agregado grueso. Sólo hay que tener en cuenta que es necesario trabajar con los materiales secos, representativos y bien mezclados.

Cuando se presenta un agregado con combinación natural de arena y gravilla o grava, los pesos específicos de cada fracción se determinan por separado y luego se determina el peso específico ponderado de ese material compuesto.

Luego se determinan matemáticamente, el peso específico seco y el porcentaje de vacíos de la mezcla de los agregados, por medio de las ecuaciones:

$$Pe_{\%A\%G} = \frac{Pe_A * \%A + Pe_G * \%G}{100} \quad (2.2)$$

$$\%V_{\%A\%G} = \frac{Pe_{\%A\%G} - PU_{C\%A\%G}}{PU_a} * 100 \quad (2.3)$$

Donde:

$Pe_{\%A\%G}$ = peso específico seco de la mezcla de agregados

Pe_A = peso específico seco del agregado fino

Pe_G = peso específico seco del agregado grueso

$\%A$ = porcentaje del agregado fino en la mezcla

$\%G$ = porcentaje del agregado grueso en la mezcla

$\%V_{\%A\%G}$ = porcentaje de vacíos

$PU_{C\%A\%G}$ = peso unitario compactado de la mezcla de agregados, kg/m^3

PU_a = densidad del agua, generalmente $1000 kg/m^3$

Luego de determinar el porcentaje de vacíos para todas las combinaciones de agregados grueso y fino, se elige la combinación que tenga el porcentaje menor, como la óptima para la composición del hormigón.

2.7.2. Determinación de la característica “A” de los agregados

2.7.2.1. Método práctico

Para el cálculo por el método práctico, en primer lugar se determina la cantidad de agua necesaria elaborando una mezcla de hormigón con la trabajabilidad que se necesita. El diseño se realiza de la siguiente forma:

- Se fija la proporción entre los agregados grueso y fino sobre la base de la composición óptima.
- Se determina la cantidad de cemento sobre la base de las experiencias de manera que esté relacionada, aproximadamente, con la resistencia requerida del hormigón

- Se fija la cantidad de agua como elemento de referencia, también según la experiencia.
- Con estos datos se calcula la cantidad necesaria de los materiales para elaborar seis probetas cilíndricas.
- Para determinar exactamente la cantidad de agua se pone en la mezcladora una cantidad de agua menor que la prefijada y se determina el asentamiento de la mezcla, si se obtiene, como es esperar, un asentamiento menor al requerido, se hace una nueva mezcla con una cantidad mayor de agua y se mide nuevamente el asentamiento. Así se repite el ensayo, auxiliados con el cono de Abrams, hasta que por aproximación se determina la cantidad de agua necesaria. Esta cantidad de agua debe ser corregido de acuerdo con la humedad superficial de la arena.
- Con esta misma mezcla se elaboran seis probetas cilíndricas y se determina la resistencia a la compresión a los 7 y 28 días. Como estos datos sirven para determinar el coeficiente o característica "A" del agregado grueso se debe repetir el ensayo no menos de tres veces para asegurar la exactitud de los resultados. En este caso, hay que tener en cuenta la precisión exigida en los trabajos de laboratorio por que una vez determinada la característica "A" , se pueden diseñar todos los tipos de mezclas de hormigón que se utilicen con ella.

En base al asentamiento y a la relación agua/cemento utilizados en los ensayos anteriores, se calculan los siguientes valores:

$$M_1 = 4.6259 - 0.0604 * A_s \quad (2.4)$$

$$M_2 = e^{0.0283*As-1.3125} \quad (2.5)$$

$$V = 0.434264 * \ln w \quad (2.6)$$

Donde:

w = relación agua/cemento.

As = asentamiento en cm. medido en el cono de Armas.

M₁ y M₂ = valores dependientes de la consistencia del concreto.

V = valor dependiente de la relación agua/cemento.

Utilizando los resultados de los ensayos realizados, a saber, la resistencia a la compresión promedio a los 28 días obtenida sobre la base de 9 probetas (tres ensayos) y la resistencia a la compresión a los 28 días del cemento empleado, la característica "A" de los agregados se determina mediante la ecuación (2.7)

$$A = \frac{R_h}{R_c * (M_1 * V + M_2)} \quad (2.7)$$

Donde:

R_c = resistencia a la compresión del cemento utilizado a los 28 días (MP).

R_h = resistencia promedio a la compresión de las probetas de concreto a los 28 días.

2.7.2.2. Método físico-matemático

En la realización de los ensayos para determinar la influencia de la característica de forma de los agregados sobre la resistencia del concreto, se puede determinar que para los agregados chancados gruesos y de forma

irregular, el factor de la forma es decisivo y es más fuerte que el factor de la granulometría, por lo que no es posible utilizar los métodos clásicos, hasta ahora empleados, ya que se basan en la determinación de las relaciones recomendables de las fracciones de los agregados (es decir curva granulométrica).

Los agregados gruesos de forma irregular requieren una cantidad de arena mayor que la que se obtiene por el método basado en la granulometría óptima y, por lo tanto, una mayor cantidad de agua.

El método físico-matemático, para la obtención de la característica de forma de los agregados, es el siguiente:

- Se seleccionan 20 partículas del agregado a investigar, las cuales deben tener cantidades proporcionales a las fracciones que las componen.
- Se fotografían las 20 partículas en dos posiciones, según dos ejes ortogonales sobre un papel negro que, al ser iluminado, define correctamente los contornos de cada grano.
- La película será de 35 mm, utilizándose un lente normal. Los 20 granos del agregado se colocarán sobre un papel negro de 18 cm. x 27 cm. Al tomarse la foto, el formato de la película abarcará toda el área de papel negro.
- Las fotos se amplían en papel mate, con un formato de 16 cm. x 24 cm. La ampliadora se coloca a una altura tal que la película abarca todo el papel de grabado.

- Con una plantilla de círculos de plástico transparente, donde los círculos aumentan su diámetro de milímetro en milímetro, desde 1 hasta 35, se determinan los diámetros y radios correspondientes a cada grano, utilizando un portaminas de creyón de 0.5 mm. En el caso de los granos con una dimensión mayor a 35 mm, se emplea regla y compás para hallar los datos necesarios.
- La determinación del área de un grano equivalente a una circunferencia se realiza al superponer la plantilla sobre el grano y se tiene en cuenta que el área del grano que queda fuera de la circunferencia, por no estar cubierta, se compense con el área de la circunferencia que no esté cubierta por el grano.
- Los círculos de redondez de las aristas de cada grano serán lo más grandes posible y así se evitarán las superposiciones de las circunferencias de las aristas del contorno, ya que los radios de redondez no pueden ser mayores que el de la circunferencia inscrita.
- Los valores de Φ (factor de esfericidad) y P (coeficiente de redondez) pueden ser determinados por el promedio de los valores obtenidos por tres fotos de cada posición, elaborados por una misma persona, utilizando las ecuaciones (2.8) y (2.9).

Donde:

$$\Phi = \frac{d}{D} \quad (2.8)$$

$$P = \frac{1 + \frac{\sum r}{R}}{1 + n} \quad (2.9)$$

Φ = factor de esfericidad propuesto por Wadell.

d = diámetro del círculo de igual superficie que la que tiene la sección del grano investigado.

D = diámetro del círculo circunscrito con la máxima longitud.

P = coeficiente de redondez propuesto por Wadell y ajustado por Schaffner.

r = radio de redondez de las aristas en el plano de la sección de los granos.

R = radio mayor del círculo inscripto en la sección transversal del grano.

n = cantidad de aristas en la sección del grano, en los cuales $r < R$.

- Finalmente, se determina la característica "A" utilizando la ecuación (2.10)

$$A = \frac{P + \Phi + 4}{10} \quad (2.10)$$

2.7.2. Determinación de la cantidad de cemento

Con la característica "A" calculada se puede calcular una mezcla para cualquier resistencia, para ello utilizamos la ecuación (2.11).

$$V = \frac{\frac{R_u}{R_c * A} - M_2}{M_1} \quad (2.11)$$

Donde:

V = valor dependiente de la relación agua/cemento.

R_u = resistencia del hormigón a la compresión que se quiere obtener, en MP.

R_c = resistencia del cemento que se está utilizando, a la compresión, en MP.

M_1 y M_2 = valores dependientes de la consistencia del hormigón.

A = característica de los agregados utilizados.

M_1 y M_2 se calculan de las ecuaciones (2.4) y (2.5), tomando en cuenta que esta pareja de valores corresponde a un solo valor de asentamiento A_s medido en centímetros en el cono de Abrams.

Determinado el valor de V , la relación agua/cemento (w) se calcula mediante la ecuación (2.12).

$$w = e^{\frac{V}{-0.434294}} \quad (2.12)$$

Luego, la cantidad de cemento se determina por la relación (2.13).

$$c = \frac{a}{w} \quad (2.13)$$

Donde

c = cantidad de cemento en kilogramos.

a = cantidad de agua en litros.

w = relación agua/cemento calculada.

2.8. Diseño de mezclas

El proporcionamiento de mezclas de concreto o “dosificación de mezclas”, es un proceso que consiste en la selección de los ingredientes disponibles (cemento, agregados, agua y aditivos) y la determinación de las cantidades relativas para producir, tan económicamente como sea posible, concreto con el grado requerido de manejabilidad., que al endurecer a la velocidad apropiada adquiera las propiedades de resistencia, durabilidad, peso unitario, estabilidad de volumen y apariencia adecuadas.

Estas proporciones dependen de las propiedades y características de los ingredientes usados, de las propiedades particulares del concreto especificado, y de las condiciones particulares bajo las cuales el concreto será producido y colocado.

2.9. Medida de los materiales

En forma inicial, debe de realizarse el transporte y almacenamiento de todos los materiales componentes de la mezcla (agua, cemento, agregados, adiciones y aditivos). El transporte, recepción y almacenaje de los materiales, deben recibir una cuidadosa atención, para evitar alteraciones de sus propiedades por almacenamiento o manejo ineficiente.

Para producir un concreto de calidad uniforme, los ingredientes deben medirse con exactitud en cada revoltura. Es aconsejable que la dosificación se la haga por peso y no por volumen, debido a la complicación que se experimenta al medir por volumen los materiales sólidos (especialmente la arena húmeda).

Utilizando el sistema de medir por peso para dosificar las revolturas se obtiene mayor precisión, sencillez y flexibilidad. La flexibilidad es necesaria debido a que los cambios de humedad en los agregados requieren frecuentes ajustes en las cantidades de agua y de agregados en las revolturas. El agua puede medirse con precisión ya sea por volumen o peso.

En la medición de los materiales deben tenerse las siguientes precauciones:

- Los equipos para medir deben encontrarse limpios y calibrados correctamente.

- Las cantidades de cemento siempre se deben medir en peso, por sacos o por mitas de sacos.
- Siempre convendrá medir los agregados en peso por la mayor exactitud que se consigue. La medida en volumen es menos exacta y puede originar diferencias entre amasadas.
- Las balanzas deberán ser calibradas periódicamente. Las tolerancias máximas aceptables en la medida de agregados son de $\pm 2\%$ y para el cemento $\pm 1\%$, respecto de la cantidad a pesar.
- De no existir opción, los agregados pueden medirse en volumen mediante carretillas dosificadoras. También pueden emplearse cajones dimensionados (metálicos o de madera).
- Cuando los agregados se encuentran húmedos, deberán hacerse las correcciones que correspondan.
- Debe tener un máximo cuidado al medir el agua de amasado, ya que su variación provoca alteraciones en la trabajabilidad y dispersión de resistencias debido a cambios de la relación agua/cemento. Además el exceso de agua, da lugar a una serie de problemas técnicos y a un aumento de los costos.
- Es frecuente que en nuestro medio, la provisión de arena (corriente) contenga un gran contenido de gruesos, en algunos casos gravilla de hasta $\frac{3}{4}$ " y en otros, incluso grava de tamaño máximo nominal igual o superior al del agregado grueso a ser usado. Por lo tanto, cuando se realicen los procesos de mezclado, deberá tenerse en cuenta una corrección en las cantidades de agregados gruesos y finos dosificados.

2.10. Mezcla de prueba

El diseño de mezcla de concreto, en el sentido estricto de la palabra, no es posible, debido a que los materiales son esencialmente variables y muchas de sus propiedades no pueden ser tasadas con exactitud en forma cuantitativa. Por tal motivo, es necesario hacer mezclas de prueba para revisar y ajustar las proporciones de los materiales.

Como puede verse entonces, los procedimientos de diseño de mezclas, se basan en el método de “ensayo y error”, que en este converge rápidamente con el sistema de “ajuste y reajuste” de las proporciones en las mezclas de prueba.

Cualquier método de dosificación constituye una primera aproximación a las proporciones que deben constatarse mediante las mezclas de prueba efectuadas en el laboratorio o en el campo y ajustarse, en la medida que sea necesario, para producir las características deseadas para el concreto.

Las correcciones en las mezclas de prueba planteadas por el método de dosificación ACI , se realizó con las proporciones, asentamiento y consistencia requeridos para obtener las resistencia deseadas, se preparó cuatro relaciones agua/cemento, con el fin de obtener un rango de resistencias dentro del cual, se encuentra la resistencias deseadas.

CAPÍTULO 3

CARATERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS DEL RÍO SAN JUAN DEL ORO (LOCALIDAD EL PUENTE) Y MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN

3.1. Zona de muestreo

La investigación de campo para la selección de los materiales de concreto, antes de la explotación de los mismos, está principalmente limitada al reconocimiento para la ubicación, clasificación, muestreo y preparación de los agregados. Por lo tanto se debe tomar en cuenta los siguientes aspectos.

3.1.1. Ubicación

Los agregados utilizados en la presente investigación proceden del río San Juan del Oro, se encuentra en la población de El Puente Provincia Méndez del Departamento de Tarija.

Para el estudio de la fuente de abastecimiento “Banco de Materiales”, se estableció una franja de 2.0 Kilómetros de longitud y un ancho promedio de 45 metros, desde la zona de colindancia con la comunidad de Bramadar hasta los inicios de la comunidad de Ircalaya.

La ubicación de la franja de estudio con coordenadas de la plaza Principal 24 de septiembre de la población de El Puente, cuya ubicación geográfica es: 21°14'1.6" Latitud Sud y 65°12'23" Longitud Oeste con una altura de 2335 metros,

La franja de río tiene las siguientes coordenadas:

Punto inicial extremo de la franja aguas arriba con coordenadas de 21°13'54" de Latitud Sud y 65°12'41" de Longitud Oeste con una altura de 2327 metros sobre el nivel.

Punto central de la franja con coordenadas, se encuentra a 21°13'40" de Latitud Sud y 65°12'30" de Longitud Oeste con una altura de 2324 metros sobre el nivel del mar.

Punto final extremo de la franja aguas abajo, se encuentra a 21°13'30" de Latitud Sur y 65°12'17" de Longitud Oeste con una altura de 2321 metros sobre el nivel del mar.



Fotografía aérea Google Earth 2015

3.1.2. Clasificación de los materiales que componen el banco

- Por el origen de las rocas: son rocas sedimentarias, producto del desgaste o disgregación de rocas preexistentes, las partículas resultantes han sido transportadas por el agua hasta el lugar del banco de materiales donde se efectúa la acumulación de estos sedimentos. Al no existir condiciones favorables, estos sedimentos se encuentran sin consolidar.
- Por el modo de fragmentación: son agregados naturales, originados por la acción erosiva de las aguas pluviales, combinada con la acción hidráulica y mecánica producida por el acarreo de los fragmentos a lo largo del curso de las corrientes de agua superficiales.
- Por el tamaño de las partículas: el banco de materiales está constituido por cantos rodados (piedras), gravas, arenas y partículas finas (limos y arcillas).

3.2. Muestreo y preparación de los agregados

El muestreo de los agregados se realizó, de acuerdo al procedimiento de la Norma ASTM D75.

El muestreo de los agregados es equivalente en importancia a los ensayos que se realizarán sobre ellos. Por esta razón las muestras se escogieron de modo que representen a los agregados disponibles en la fuente de abastecimiento.

Las muestras de los agregados tomadas para realizar los ensayos, se extrajeron según corresponde a Yacimientos “depósitos de grava y arena naturales canto rodado”. La fuente de abastecimiento fue trabajado como banco de

frente abierto con respectivo sondeo de pozos de longitud 2000 m. Se dividió en 4 zonas de muestreo, cada zona de 500 metros, en cada zona de muestreo se tomó las muestras directamente de varios pozos en numero 5 por zona, se excavaron pequeños pozos de sondeo de 1.0 metro de ancho, por 1.0 metro de largo y por 1.0 metro de alto, que se encuentren a alguna distancia por detrás y paralelos al frente del pozo central previamente definido.

Con las muestras extraídas de cada pozo se realizo el separado con el tamiz nº4 el agregado grueso y fino, seguidamente ya teniendo todas las muestra separadas se mezclaron todas las muestras de los 5 pozos por zonas, mediante cuarteo manual, se realizaron las pruebas necesarias en campo para obtener las cinco mezclas compuestas y representativas de cada zona y se fueron repitiendo esta metodología en las 4 zonas identificadas a lo largo de la franja de estudio para obtener las 20 muestras para realizar la caracterización de los agregados de esta zona.

Cada muestra de agregado grueso que se extrajo en peso de aproximadamente de 100 kilogramos, y el agregado fino de 75 kilogramos en peso en bolsas de polietileno.

En una primera inspección visual se pudo apreciar un porcentaje considerable de agregado fino frente al Agregado grueso, no se aprecio cantidades considerables de Arcilla y/o limo en el agregado grueso y agregado fino por lo cual no se realizo el lavado del material en banco.

En laboratorio se redujo las muestras de campo de los agregados hasta cantidades apropiadas para realizar los ensayos, empleando procedimientos que minimicen las variaciones en las características determinadas entre las

muestras de ensayo y las muestras de campo, tomando en cuenta el lavado y cuarteo mecánico de los mismos.

3.3. Ensayos Standard de laboratorio

El desarrollo del presente trabajo de investigación se enmarca en el fiel cumplimiento de las normas de la A.S.T.M. (American Society for Testing and Materials) parte 14 (Manual de ensayos para agregados y concreto). Donde el procedimiento seguido para cada uno de los ensayos se describe en forma completa y suficientemente clara en los parte complementaria del estudio ANEXO 1; por lo tanto, en el presente capítulo se presenta únicamente como referencia la codificación de las especificaciones y normas de ensayo tanto para los componentes del concreto, como así también las especificaciones y normas de ensayos para el concreto. Evitando de esta manera la ampulosidad del trabajo ya que existe bibliografía de fácil acceso para los interesados. También se hace mención a la codificación utilizada por la NORMA BOLIVIANA N.B.

3.3.1. Cemento

El cemento utilizado cumple las normas y especificaciones de la AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALES ASTM C 183 y de la NORMA BOLIVIANA NB 011 - 95 revisada y actualizada por el Comité Técnico de Normalización CTN 12 - 1 "Cemento".

Como el cemento es un material cuya producción y control de calidad se encuadra en las normas del país de origen, a continuación se menciona la codificación y título de las especificaciones y normas de ensayo correspondientes a la NORMA BOLIVIANA (NB).

- NB 011 Definiciones, clasificación y especificaciones.
- NR 059 Extracción y preparación de muestras.
- NB 060 Disposiciones generales para análisis químico
- NB 061 Análisis químico.
- NB 062 Método de determinación de la consistencia normal.
- NB 063 Método para determinar el tiempo de fraguado.
- NB 064 Método para determinar la densidad.
- NB 470 Método para determinar la resistencia a la compresión
- NB 471 Ensayo en autoclave para determinar la estabilidad de volumen.
- NB 472 Método para determinar la superficie específica por el permeabilímetro (Blaine).
- NB 473 Método para determinar la fluidez.
- NB 642 Ensayo de puzolanicidad.
- NB 643 Ensayo para determinar la estabilidad de volumen por el método de Le Chatelier.
- NB 644 Método alternativo para la determinación de las resistencias.

Para el desarrollo del presente trabajo se utilizó cemento Portland IP-30 según Norma Boliviana y de Tipo I según ASTM “El Puente”, el cual ha sido almacenado en una cantidad suficiente para el desarrollo de todo el trabajo de investigación. Los ensayos de calidad de cemento se desarrollan en el laboratorio de la Fábrica de Cemento El Puente, por personal técnico de esta fábrica

3.3.2. Agua

El análisis físico-químico del agua potable de la comunidad El Puente y del río San Juan del Oro, ha sido realizado por técnicos de Centro de Análisis Investigación y Desarrollo (CEANID) dependiente de la U.A.J.M.S. (Tarija)

cumpliendo las especificaciones y normas impuestas por la NORMA BOLIVIANA.

- NB / UNE 7236 Toma de muestras.
- NB / UNE 7234 Determinación del exponente de hidrógeno pH.
- NB / UNE 7130 Determinación de las sustancias disueltas.
- NB / UNE 7131 Determinación de sulfatos expresados en SO_4^-
- NB / UNE 7118 Determinación de la cantidad de Ion cloro Cl^-
- NB / UNE 7132 Determinación de la cantidad de hidratos de carbono.
- NB/ UNE 72365 Determinación de la cantidad de sustancias orgánicas solubles en éter.

3.3.3. Agregados

Los ensayos de laboratorio en los agregados, se desarrollaron cumpliendo las especificaciones y normas de la ASTM parte 14.

- ASTM D 75-82 Muestreo de agregados.
- ASTM C 702-80 Reducción de muestras a tamaño de ensayo.
- ASTM C 33-82 Especificaciones de agregado para concreto.
- ASTM C 136-82 Análisis granulométrico para agregados fino y grueso.
- ASTM C 127-81 Peso específico y absorción del agregado grueso.
- ASTM C 128- 79 Peso específico y absorción del agregado fino.
- ASTM C 29-78 Peso unitario y porcentaje de vacíos para agregados grueso y fino.
- ASTM C 131-81 Resistencia a la abrasión (Método de la máquina de Los Ángeles).

Todos estos ensayos a excepción del desgaste de los ángeles y coeficiente de Forma fueron desarrollados en el Laboratorio de Hormigones la Empresa EOLO SRL. (Tarija).

Los ensayos desgaste de los ángeles y coeficiente de Forma, se desarrollaron en el laboratorio de suelos y hormigones constructora ERIKA (Tarija).

3.3.4. Concreto

Los ensayos de laboratorio en el concreto tanto en estado fresco como endurecido, se desarrollaron cumpliendo las especificaciones y normas de la ASTM parte 14.

- ASTM C 470-81 Especificaciones para moldes cilíndricos.
- ASTM C 1 72-82 Muestreo de concreto fresco.
- ASTM C 143-78 Slurp para concreto de cemento Portland.
- ASTM C 138-8 1 Peso unitario y contenido de vacíos para concreto.
- ASTM C 192-8 1 Fabricación y curado de probetas de hormigón en laboratorio.
- ASTM C 617-76 Capinado en probetas cilíndricas de concreto.
- ASTM C 39-81 Ensayo a compresión de probetas cilíndricas.
- ASTM 670-81 Preparación de informes de precisión en ensayos para materiales de construcción

Todos estos ensayos fueron desarrollados en el Laboratorio de Hormigones la Empresa EOLO SRL. (Tarija).

3.4. Análisis estadístico de datos experimentales

La norma ASTM, en lo que respecta a la precisión de los ensayos normalizados establece como índices de precisión valores límites tolerables

para la desviación standard; asimismo, establece rangos aceptables en función del número de datos correspondientes a cada ensayo. Estos índices de precisión y su aplicación se muestran en el anexo 12.

Sin embargo, algunos ensayos efectuados en la investigación, no están normalizados por la ASTM como es el caso del Coeficiente Volumétrico o de Forma y por tanto no existen índices de precisión, por tal motivo, y para dar mayor amplitud al análisis de los datos experimentales, se realizó el análisis estadístico de los mismos.

Con el fin de garantizar la confiabilidad de los ensayos de laboratorio, éstos se realizaron en un número suficiente de ensayos, que permitieron luego, realizar el correspondiente análisis crítico y con rigor científico, para determinar si están dentro del error experimental permitido.

El análisis estadístico de los datos experimentales de la caracterización de los agregados se sustenta en las siguientes definiciones:

3.4.1. Error Experimental Promedio

Este cálculo permite determinar si un dato experimental está dentro del error experimental permitido, que universalmente se acepta sea menor al 5%. Pero, dentro las mediciones experimentales hay que diferenciar entre **error casual** y **error sistemático**.

Los errores sistemáticos comunes que se cometen en experimentos de laboratorio están ligados más al grado de pericia del experimentador introduciendo una suerte de descalibración constante del sistema, por lo que cada vez que se mida algo se obtendrá un dato reflejando esa

descalibración. Los errores casuales son más arbitrarios y están ligados a ciertas circunstancias y objetos.

Existen muchos métodos para calcular el error experimental, pero se aconseja utilizar el llamado Cálculo de Error de Gauss.

3.4.1.1. Cálculo del Error de Gauss

Es un método sencillo de entender y aplicar y que permite extraer el valor medio y el error promedio de una serie de mediciones experimentales. El cálculo del Error de Gauss, sirve para calcular la magnitud de los errores casuales que se tienen en los datos.

Este método, se fundamenta en las siguientes definiciones matemáticas:

Muestra: La muestra de una población es el conjunto reducido de valores que puede tomar una variable.

Media aritmética: La media aritmética de un conjunto de “n” valores x_1, x_2, \dots, x_n se define por:

$$x = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (3.1)$$

Donde:

x = Media aritmética

σ = Desviación estándar

La desviación estándar de un conjunto de valores se define como la raíz cuadrada del promedio de los desvíos con respecto a su media.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (3.2)$$

Para > 30 datos

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (3.3)$$

Para < 30 datos

Desviación poblacional es el error promedio de la media aritmética, este valor muestra la cantidad promedio de error que tiene los valores leídos.

$$m = \sqrt{\frac{\sigma}{n}} \quad (3.4)$$

3.4.2. Manejo de la desviación de los datos experimentales

En el curso de los experimentos de rutina de una serie de pruebas, habrá datos confiables y otros no confiables. La confiabilidad de un dato es un concepto cuantitativo y definitivamente deberá realizarse un análisis crítico cuantitativo de cada dato obtenido para determinar esa confiabilidad. Si el dato, debidamente reproducido, encaja bien dentro lo que se considera “esperado” a la luz de la teoría revisada, entonces es un dato confiable.

Cuando en una serie de medidas, aparece uno o varios valores que aparentemente son anómalos y que lógicamente deberán descartarse. Esto es sumamente peligroso, ya que antes de tomar tal decisión drástica es necesario verificar si dichos valores, por extraños que parezcan provienen o no de los datos colectivos que se analizan. Para evaluar esta situación se aplica el Criterio de Grubbs.

3.4.2.1. Criterio de Grubbs

El Criterio de Grubbs se aplica calculando en primer lugar la media (\bar{x}) y la desviación standard (σ). Seguidamente se calcula la diferencia (D) entre la media y el valor dudoso x_s .

$$D = (x_s - \bar{x}) \quad (3.5)$$

y se divide este valor por σ para encontrar el valor L:

$$L = \frac{D}{\sigma} \quad (3.6)$$

El valor de L se compara con los de la tabla 3.1. que está en función del número de lecturas experimentales y calculada para un nivel de probabilidad de 95%, o sea que sólo podría ocurrir en un caso sobre 20 que el valor supuesto erróneo fuera aceptado como bueno siendo anómalo, o viceversa. Si L es menor al valor tabulado debe considerarse el dato analizado como válido. De lo contrario, el valor sospechoso puede considerarse como anómalo y excluirlo, recalculando la media y la desviación standard.

TABLA 3.1 Valor límite para $(x_s - \bar{x})/\sigma$ Criterio de Grubbs

Número de lecturas	Valor límite	Número de lecturas	Valor límite
3	1.15	10	2.29
4	1.48	12	2.41
5	1.71	14	2.51
6	1.89	16	2.59
7	2.02	18	2.65
8	2.13	20	2.71
9	2.21	25	2.82

Fuente: "Manual de Tesis de Grado y Tecnología", Saúl J. Escalera

3.4.3. Distribución de probabilidades

3.4.3.1. t de Student

En los trabajos de investigación en laboratorio es muy frecuente que la desviación standard de la población original no sea conocida, y la mejor

aproximación que pueda tenerse para su valor es la desviación standard de la muestra. En este caso, el procedimiento para establecer el intervalo de confianza para la media de la población original, una vez fijado el nivel de confianza para la media de la población original, una vez fijado el nivel de confianza en que se desea trabajar, está regido por la distribución denominada de Student en las ciencias estadísticas, por lo que el problema ha de resolverse manejando la tabla 3.2. La fórmula que proporciona el intervalo de confianza es:

$$x \pm t^* \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Donde:

x = media de la muestra.

n = tamaño de dicha muestra

t = factor correspondiente al nivel de confianza adoptado, calculado para n-l.

σ = desviación standard de la muestra.

TABLA 3.2. Valores de t para un nivel de confianza del 95 %

Números de datos	Valor de " t "	Números de datos	Valor de " t "
1	12.71	13	2.16
2	4.30	14	2.14
3	3.18	15	2.13
4	2.78	16	2.12
5	2.57	17	2.11
6	2.45	18	2.10
7	2.36	19	2.09
8	2.31	20	2.09
9	2.26	21	2.08
10	2.23	22	2.07
11	2.20	23	2.07
12	2.18	24	2.06

Fuente: Probabilidad y Estadística", Murray R Spiegel

3.5. Resultados de la Investigación en los Componentes del Concreto

3.5.1. Cemento

Los datos de las propiedades químicas y físicas del cemento portland El Puente, han sido obtenidas del informe de calidad otorgado por la Fábrica de Cemento El Puente y corresponden al informe de calidad de la partida a la que perteneció el cemento utilizado en la investigación.

En las tablas 3.3.a y 3.3.b, se muestran las propiedades químicas y físicas del cemento Portland tipo I El Puente; asimismo, se indican las especificaciones según la Norma Boliviana, la Norma de la ASTM y el Pliego Español.

TABLA 3.3.a. Propiedades químicas cemento portland El Puente y Especificaciones

Cemento Portland El Puente			Especificaciones según Norma		
Propiedad	Unidad	Cemento Portland El Puente	Norma Boliviana IP - 30	Norma ASTM	Pliego Español
Pérdida al fuego	%	4.2	< 7.0	< 3.0	
Si O ₂	%	30.67			
Al ₂ O ₃	%	4.92			
Fe ₂ O ₃	%	2.87			
Ca O	%	50.78			
Mg O	%	2.44	< 6.0	< 5.0	< 5.0
S O ₃	%	2.18	< 4.0	< 2.5	< 4
Residuo insoluble	%		< 3.0	< 0.75	< 3
Cal libre	%	1.36		< 2.5	< 3

Fuente: Sociedad Boliviana de Cemento S.A.

TABLA 3.3.b. Propiedades físicas cemento Portland El Puente y Especificaciones

Cemento Portland El Puente			Especificaciones según Norma		
Propiedad	Unidad	Cemento Portland El Puente	Norma Boliviana IP - 30	Norma ASTM	Pliego Español
Blaine	cm ² /g	4409	> 2600	> 2800	
Residuo malla 200 M	% Ret	2.25			< 15.0
Residuo malla 325 M	% Ret	14.17			
Fraguado inicial	Min.	02:19	> 60``	> 45``	> 45``
Fraguado final	Hrs.	04:21	< 12:00	< 10:00	< 10:00
Expansión Lee Chatelier	mm.	0	< 8		
Relación A/C	ml/g	0.558			
Fluidez	%	107			
Resist. Comp. 3 días	MPa	18.2	> 8.0	> 19.0	> 17.5
Resist. Comp. 7 días	MPa	23.6	> 17.0	> 19.0	> 25.0
Resist. Comp. 28 días	MPa	32.0	> 30.0	> 27.0	> 35.0
Peso específico	g/cm ³	3.03			

Fuente: Sociedad Boliviana de Cemento S.A.

3.5.2. Agua

La agua potable de la población de El Puente cumple los requisitos de potabilidad, la cual cumple con los requisitos impuestos por la NORMA BOLIVIANA Tabla 3.4.a. por cumplir los requisitos de potabilización y la distancia desde el Puente Hasta la ciudad de Tarija, la cual se generaría un presupuesto y no se podría haber cumplido, por lo cual se tuvo que optar la investigación con el agua potable de la ciudad de Tarija en los laboratorios anteriormente descritos y por la cantidad de agua que se requiere para realizar los diferentes ensayos se tubo que realizar con el agua potable de la ciudad de Tarija, la cual cumple con los requisitos impuestos por la NORMA BOLIVIANA.

TABLA 3.4.a. Parámetros físico-químicos del agua Comunidad de El Puente y especificaciones según Norma Boliviana

Parámetros	Unidad	Agua Comunidad de El Puente	Especificaciones según N.B.
Cloruros	mg/l	5.8	≤ 6000
Hidratos de carbono	mg/l	Ausencia	0
Exponente de hidrógeno pH		6.72	≥ 5
Sustancias orgánicas disueltas	mg/l	5.1	≤ 15000
Sustancias disueltas	mg/l	82	≤ 15000
Sulfatos	mg/l	21.95	≤ 1000

Fuente: Informe de ensayo de aguas " Centro de Análisis, Investigación y desarrollo ANEXO-14

TABLA 3.4.b. Parámetros físico-químicos del agua Rio San Juan del Oro El Puente y especificaciones según Norma Boliviana

Parámetros	Unidad	Agua Comunidad de El Puente	Especificaciones según N.B.
Cloruros	mg/l	6500	≤ 6000
Hidratos de carbono	mg/l	Ausencia	0
Exponente de hidrógeno pH		7.12	≥ 5
Sustancias orgánicas disueltas	mg/l	20.14	≤ 15000
Sustancias disueltas	mg/l	182.00	≤ 15000
Sulfatos	mg/l	221.02	≤ 1000

Fuente: Informe de ensayo de aguas " Centro de Análisis, Investigación y desarrollo ANEXO-14

Según los análisis del Agua del Rio San Juan del Oro Tabla 3.4.b, no cumple las Especificaciones de la Norma Boliviana, por lo tanto se rechaza para la utilización del amasado y curado del hormigón.

Pero sin embargo el agua del río San Juan del Oro, se puede utilizar como agua para el lavado de agregados, por que el agua de lavado no influye directamente sobre la calidad del hormigón.

El agua utilizada en este trabajo de investigación, tanto en la preparación de especímenes, en el amasado y en su respectivo curado, fue agua potable, procedente de la red de agua potable de la ciudad de Tarija, cuyas características se presentan en la tabla 3.4.c, las mismas que corresponden a la información proporcionada por el departamento técnico de COSAALT.

TABLA 3.4.c. Análisis físico-químico del agua potable en la Ciudad de Tarija

Parámetro de análisis	Resultados	Unidades
Aspecto	Limpia cristalina	
Olor	Inodoro	
PH	6.08	
Sólido total	33	mg/l
Calcio	1	mg/l
Cloruro	7.9	mg/l
Magnesio	2.8	mg/l
Impureza total	3.8	mg/l
Alcalinidad total	13.2	mg/l
Índice de Langelier	-1.95	No corrosiva

Fuente: Departamento Técnico de COSAALT

3.5.3. Agregado fino

La caracterización del agregado fino se ha realizado en base a 20 ensayos, 5 por muestra a partir de las 4 zonas analizadas, la mayoría de los ensayos han sido realizados cumpliendo las normas y especificaciones de la ASTM.

En las tablas 3.5 al 3.8 se muestran los datos de laboratorio correspondientes a los ensayos efectuados en el agregado fino.

TABLA 3.5. Análisis Granulométrico Agregado Fino

Ensayo Nº	% Retenido Acumulado en Tamiz								M.F.
	3/8"	Nº4	Nº8	Nº16	Nº30	Nº50	Nº100	Base	
1	0	0	15,53	30,61	48,30	73,54	91,23	100,00	2,59
2	0	0	16,02	31,02	48,34	72,76	91,49	100,00	2,60
3	0	0	15,33	30,96	48,32	72,58	91,34	100,00	2,59
4	0	0	15,19	32,05	47,88	73,20	90,51	100,00	2,59
5	0	0	15,83	33,60	50,38	74,75	90,56	100,00	2,65
6	0	0	16,31	31,95	49,28	73,59	91,36	100,00	2,62
7	0	0	16,63	32,84	50,74	75,65	92,28	100,00	2,68
8	0	0	15,21	30,60	48,07	73,47	92,20	100,00	2,60
9	0	0	15,81	31,01	48,14	72,53	91,9	100,00	2,59
10	0	0	15,31	30,70	48,94	73,51	91,75	100,00	2,60
11	0	0	16,29	31,33	48,65	73,45	90,76	100,00	2,60
12	0	0	15,09	31,63	48,98	73,35	91,11	100,00	2,60
13	0	0	17,33	31,89	49,22	74,04	90,84	100,00	2,63
14	0	0	16,11	30,71	49,45	74,90	92,95	100,00	2,64
15	0	0	15,10	30,94	49,66	75,05	92,08	100,00	2,63
16	0	0	15,87	31,20	48,53	73,69	91,12	100,00	2,60
17	0	0	14,84	29,48	48,07	73,35	91,10	100,00	2,57
18	0	0	14,59	30,16	47,79	74,53	91,88	100,00	2,59
19	0	0	15,58	30,17	47,50	73,87	91,51	100,00	2,59
20	0	0	16,54	31,86	48,65	74,24	91,85	100,00	2,63
Promedio	0	0	15,73	31,24	48,74	73,80	91,49	100,00	2,61
Desv.	0	0	0,68	0,95	0,85	0,84	0,63	0,00	0,026
Desv. P.	0	0	0,196	0,276	0,245	0,241	0,181	0,000	0,008
Error	0	0	1,249	0,882	0,503	0,327	0,198	0,000	0,293

Con los datos promedio de la tabla 3.5 se obtiene y se realiza la grafica granulométrica promedio del agrega fino de la zona en estudio rio San Juan del oro Localidad El Puente, la cual esta dentro de los limites admisible de las curvas limite superior y inferior de acuerdo a las Especificaciones ASTM.

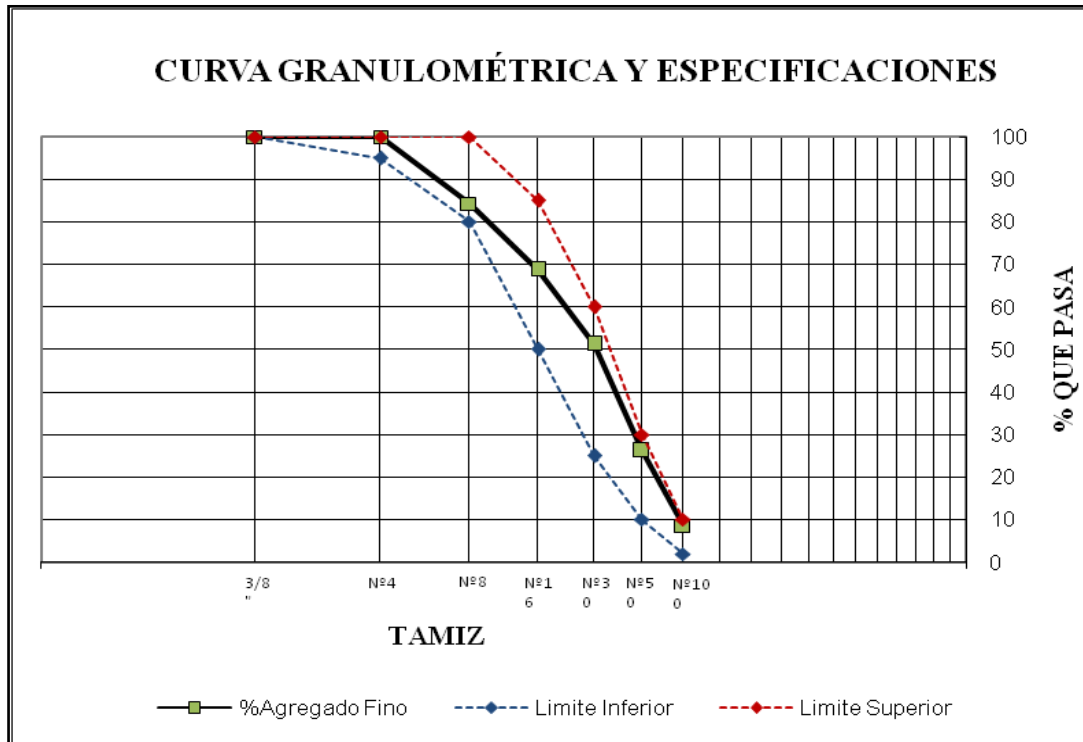


FIGURA 3.1. Curva granulométrica promedio del agregado fino y Especificaciones ASTM

TABLA 3.6. Peso Específico y Absorción Agregado Fino

Ensayo Nº	Peso Específico (gr/cm ³)			Absorción (%)
	A Granel	S.S.S.	Aparente	
1	2,63640	2,67380	2,73890	1,41988
2	2,63812	2,67666	2,74388	1,46104
3	2,63481	2,66951	2,72954	1,31712
4	2,65679	2,69397	2,75937	1,39931
5	2,64380	2,68240	2,75000	1,76104
6	2,61730	2,65393	2,71680	1,39931
7	2,62633	2,66525	2,73267	1,48163
8	2,63934	2,67953	2,74986	1,52284
9	2,63970	2,67670	2,74100	1,39931
10	2,62108	2,66099	2,73004	1,52284
11	2,63904	2,67380	2,73407	1,31712
12	2,64148	2,67953	2,74596	1,44045
13	2,63580	2,67380	2,73990	1,44045
14	2,61869	2,65534	2,71830	1,39931
15	2,64026	2,67666	2,74000	1,37875
16	2,64133	2,67666	2,73807	1,33766
17	2,63410	2,67090	2,73490	1,39931
18	2,65465	2,68962	2,75084	1,31712
19	2,64309	2,67953	2,74305	1,37875
20	2,63850	2,67380	2,73503	1,33766
Promedio	2,637031	2,674119	2,738609	1,421545
Desv.	0,010162	0,009894	0,010449	0,101200

TABLA 3.7. Peso Unitario Suelto y Compactado Agregado Fino

Ensayo Nº	Peso Unitario (gr/cm ³)	
	Estado Suelto	Estado Compactado
1	1,571	1,724
2	1,564	1,727
3	1,553	1,735
4	1,563	1,717
5	1,581	1,715
6	1,576	1,719
7	1,566	1,720
8	1,589	1,721
9	1,576	1,729
10	1,588	1,720
11	1,586	1,724
12	1,574	1,726
13	1,573	1,722
14	1,574	1,713
15	1,578	1,717
16	1,573	1,719
17	1,569	1,714
18	1,568	1,710
19	1,575	1,709
20	1,574	1,713
Promedio	1,574	1,720
Desv.	0,009	0,007

TABLA 3.8. Material que Pasa el Tamiz N° 200 Agregado Fino

Ensayo N°	Material que Pasa el Tamiz N° 200 (%)
1	1,72
2	1,70
3	1,80
4	1,63
5	1,65
6	1,72
7	1,82
8	1,73
9	1,75
10	1,77
11	1,98
12	1,62
13	1,65
14	1,90
15	1,93
16	1,97
17	1,75
18	1,70
19	1,65
20	1,73
Promedio	1,758
Desv.	0,111

3.5.4. Agregado grueso

La caracterización del agregado fino se ha realizado en base a 20 ensayos, 5 por muestra a partir de las 4 zonas analizadas, la mayoría de los ensayos han sido realizados cumpliendo las normas y especificaciones de la ASTM.

En las tablas 3.9 al 3.14 se presentan los datos de laboratorio correspondientes a los ensayos efectuados en el agregado grueso. También se muestran los promedios y las desviaciones standard. En la figura 3.2 se representa el análisis granulométrico promedio y las especificaciones ASTM.

TABLA 3.9 Análisis Granulométrico Agregado Grueso

Ensayo Nº	% Retenido Acumulado en Tamiz								M.F.
	2"	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	Nº4	Base	
1	0,00	0,00	28,51	45,01	68,04	79,85	99,99	99,99	7,25
2	0,00	0,00	27,95	45,13	67,40	79,07	99,99	99,99	7,24
3	0,00	0,00	27,66	44,22	67,59	79,28	99,99	99,99	7,23
4	0,00	0,00	27,43	45,16	67,98	79,13	99,99	99,99	7,24
5	0,00	0,00	28,89	45,46	67,33	79,80	99,99	99,99	7,25
6	0,00	0,00	27,83	44,07	68,63	81,35	99,99	99,99	7,25
7	0,00	0,00	28,23	43,76	65,72	77,82	99,99	99,99	7,22
8	0,00	0,00	27,98	44,60	66,70	79,37	99,99	99,99	7,24
9	0,00	0,00	27,78	43,80	68,69	80,74	99,99	99,99	7,25
10	0,00	0,00	27,04	43,33	68,51	78,96	99,99	99,99	7,22
11	0,00	0,00	28,31	48,00	67,47	78,34	99,99	99,99	7,26
12	0,00	0,00	27,66	44,83	66,26	80,14	99,99	99,99	7,25
13	0,00	0,00	27,37	46,84	65,22	81,01	99,99	99,99	7,28
14	0,00	0,00	29,38	45,98	66,18	78,93	99,99	99,99	7,25
15	0,00	0,00	28,35	47,83	66,46	78,04	99,99	99,99	7,26
16	0,00	0,00	28,28	44,77	64,57	80,35	99,99	99,99	7,25
17	0,00	0,00	27,17	42,21	63,69	81,20	99,99	99,99	7,23
18	0,00	0,00	27,65	44,97	66,76	82,49	99,99	99,99	7,27
19	0,00	0,00	28,33	43,55	66,91	81,09	99,99	99,99	7,25
20	0,00	0,00	28,22	46,58	67,88	78,75	99,99	99,99	7,25
Promedio	0,00	0,00	28,00	45,00	66,90	79,78	99,99	99,99	7,25
Desv.	0,000	0,000	0,572	1,478	1,348	1,240	0,002	0,002	0,015
Dep	0,000	0,000	0,165	0,427	0,389	0,358	0,001	0,001	0,004
Error	0,000	0,000	0,590	0,948	0,582	0,448	0,001	0,001	0,059

Con los datos promedio de la tabla 3.9 se obtiene y se realiza la grafica granulométrica promedio del agrega grueso de la zona en estudio rio San Juan del oro Localidad El Puente, la cual esta dentro de los limites admisible de las curvas limite superior y inferior de acuerdo a las Especificaciones ASTM.

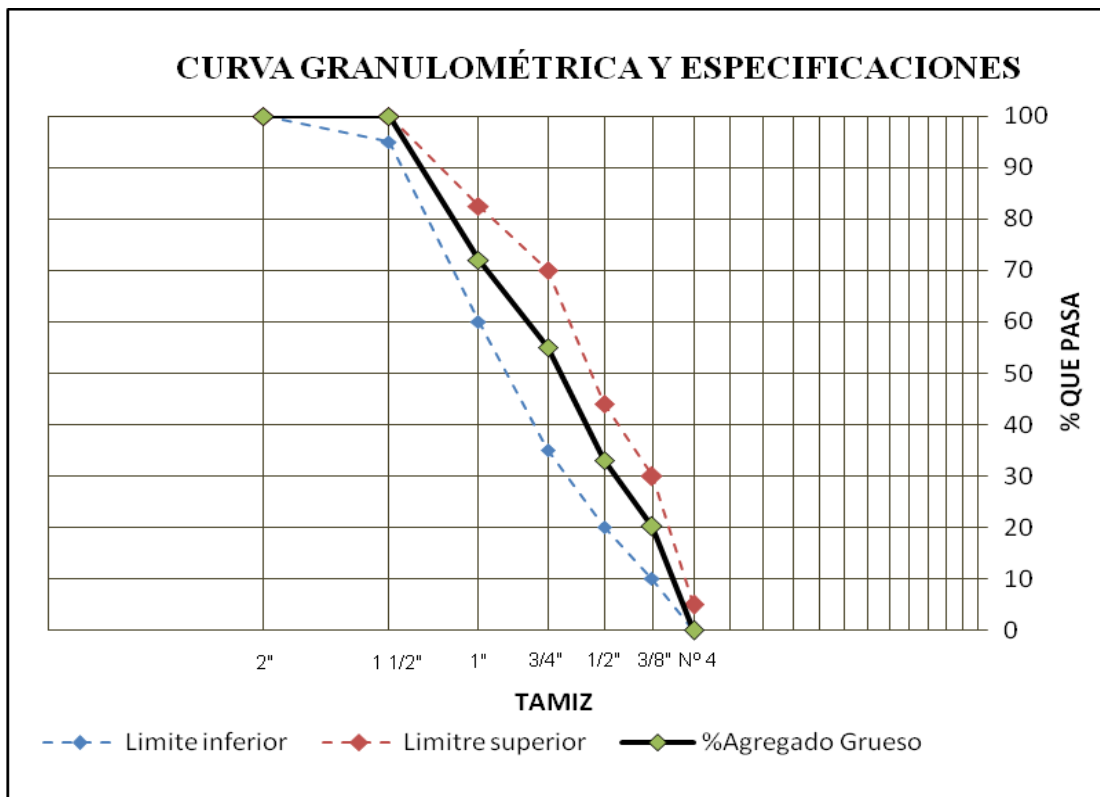


FIGURA 3.2. Curva granulométrica promedio del agregado grueso y Especificaciones.

TABLA 3.10 Peso Específico y Absorción Agregado Grueso

Ensayo Nº	Peso Específico (gr/cm ³)			Absorción (%)
	A Granel	S.S.S.	Aparente	
1	2,58001	2,61097	2,65504	1,03051
2	2,58589	2,60688	2,64813	0,96931
3	2,57680	2,60010	2,64458	1,05093
4	2,57760	2,61506	2,66111	1,07136
5	2,58376	2,60824	2,65043	0,98970
6	2,57616	2,60417	2,64971	1,07136
7	2,57547	2,61233	2,65736	1,05093
8	2,58459	2,61506	2,65843	1,01010
9	2,57391	2,60824	2,65575	1,11223
10	2,57886	2,61780	2,66487	1,09179
11	2,57528	2,60539	2,64657	0,96931
12	2,57779	2,61780	2,65773	0,92854
13	2,58772	2,61917	2,65737	0,88781
14	2,58198	2,60281	2,65005	1,11223
15	2,57797	2,60417	2,64618	0,98970
16	2,57942	2,60688	2,64725	0,94892
17	2,58073	2,61506	2,66111	1,07136
18	2,58480	2,60417	2,64442	0,94892
19	2,57583	2,61643	2,65897	0,98970
20	2,58585	2,61097	2,64973	0,90817
Promedio	2,58002	2,61009	2,65324	1,01014
Desv.	0,00417	0,00576	0,00622	0,06751

TABLA 3.11. Peso Unitario Suelto y Compactado Agregado Grueso

Ensayo Nº	Peso Unitario (gr/cm ³)	
	Estado Suelto	Estado Compactado
1	1,592	1,701
2	1,599	1,710
3	1,596	1,690
4	1,591	1,710
5	1,598	1,710
6	1,591	1,699
7	1,595	1,695
8	1,594	1,701
9	1,587	1,711
10	1,594	1,701
11	1,590	1,692
12	1,596	1,703
13	1,596	1,703
14	1,592	1,699
15	1,591	1,701
16	1,599	1,706
17	1,593	1,700
18	1,595	1,702
19	1,598	1,705
20	1,596	1,703
Promedio	1,594	1,702
Desv.	0,003	0,006

TABLA 3.12. Material que Pasa el Tamiz N° 200 Agregado Grueso

Ensayo N°	Material que Pasa el Tamiz N° 200 (%)
1	0,22
2	0,20
3	0,26
4	0,20
5	0,18
6	0,28
7	0,24
8	0,22
9	0,26
10	0,24
11	0,30
12	0,26
13	0,24
14	0,24
15	0,22
16	0,20
17	0,18
18	0,28
19	0,26
20	0,26
Promedio	0,24
Desv.	0,03

TABLA 3.13. Desgaste de los Ángeles agregado grueso

Ensayo N°	Desgaste de los ángeles (%)
1	30,88
2	31,76
3	31,88
4	31,48
5	31,30
Promedio	31,46
Desv.	0,40

TABLA 3.14. Coeficiente volumétrico o de forma Agregado Grueso

Ensayo N°	Coeficiente volumétrica o de forma
1	0,157
2	0,170
3	0,175
4	0,179
5	0,163
Promedio	0,169
Desv.	0,009

3.5.5. Resultados del análisis estadístico

La necesidad de garantizar resultados confiables es extremadamente importante en este tipo de trabajos de investigación; y por ello es importante realizar la suficiente cantidad de ensayos para luego aplicar a los datos experimentales las teorías estadísticas ya mencionadas.

Analizando: tabla 3.5. (Análisis granulométrico agregado fino), tabla 3.9. (Análisis granulométrico agregado grueso); podemos observar que las desviaciones de los porcentajes retenidos acumulados en cada tamiz, son inferiores al máximo de 4% exigidos para la dosificación de hormigones. Como así también podemos observar en cada grafica, que las curvas se encuentran dentro de los límites especificados por la Norma ASTM, la cual visualmente nos indica que se trata de una granulometría continua.

Respecto al error experimental medido, respecto a los porcentajes retenidos acumulados de cada tamiz, están dentro del error experimental permitido, que universalmente se acepta que no sea mayor al 5%.

TABLA 3.15. Error experimental Promedio

Agregado Fino						
Ensayo	Unidad	Nº	Media	Desv. Stand.	Desv. Poblac.	% de Error
Módulo de finura		20	2,610	0,026	0,006	0,227
Mat. que pasa tamiz Nº 200	%	20	1,758	0,111	0,025	1,412
Peso específico a granel	gr/cm ³	20	2,637	0,010	0,002	0,086
Peso específico s.s.s.	gr/cm ³	20	2,674	0,010	0,002	0,083
Peso específico aparente	gr/cm ³	20	2,739	0,010	0,002	0,085
Absorción	%	20	1,422	0,101	0,023	1,592
Peso unitario suelto	gr/cm ³	20	1,574	0,009	0,002	0,128
Peso unitario compactado	gr/cm ³	20	1,720	0,007	0,002	0,091
Agregado Grueso						
Ensayo	Unidad	Nº	Media	Desv. Stand.	Desv. Poblac.	% de Error
Módulo de finura		20	7,247	0,015	0,003	0,046
Mat. que pasa tamiz Nº 200	%	20	0,237	0,034	0,008	3,197
Peso específico a granel	gr/cm ³	20	2,580	0,004	0,001	0,036
Peso específico s.s.s.	gr/cm ³	20	2,610	0,006	0,001	0,049
Peso específico aparente	gr/cm ³	20	2,653	0,006	0,001	0,052
Absorción	%	20	1,010	0,068	0,015	1,494
Peso unitario suelto	gr/cm ³	20	1,594	0,003	0,001	0,042
Peso unitario compactado	gr/cm ³	20	1,702	0,006	0,001	0,079

TABLA 3.16. Precisión de los Ensayos (Criterio de Grubbs)

Agregado Fino						
Ensayo	Unidad	Media	Desv. Stand.	Datos Dudosos	Valor Grubbs	Valor Limite
Modulo de finura		2,610	0,026	2,570	1,493	2,710
				2,680	2,665	
Material que pasa el tamiz N°200	%	1,758	0,111	1,620	1,243	2,710
				1,980	2,000	
Peso específico a granel	gr/cm ³	2,637	0,010	2,617	1,942	2,710
				2,657	1,944	
Peso específico s.s.s.	gr/cm ³	2,674	0,010	2,654	2,040	2,710
				2,694	2,006	
Peso específico aparente	gr/cm ³	2,739	0,010	2,717	2,087	2,710
				2,759	1,987	
Absorción	%	1,422	0,101	1,317	1,032	2,710
				1,761	3,355	
Peso unitario suelto	gr/cm ³	1,574	0,009	1,553	2,333	2,710
				1,589	1,667	
Peso unitario compactado	gr/cm ³	1,720	0,007	1,709	1,571	2,710
				1,735	2,143	
Agregado Grueso						
Ensayo	Unidad	Media	Desv. Stand.	Datos Dudosos	Valor Grubbs	Valor Limite
Modulo de finura		7,247	0,015	7,220	1,812	2,710
				7,280	2,214	
Material que pasa el tamiz N°200	%	0,237	0,034	0,180	1,682	2,710
				0,300	1,859	
Peso específico a granel	gr/cm ³	2,580	0,004	2,574	1,467	2,710
				2,588	1,848	

Peso específico s.s.s.	gr/cm ³	2,610	0,006	2,600	1,734	2,710
				2,619	1,578	
Peso específico aparente	gr/cm ³	2,653	0,006	2,644	1,418	2,710
				2,665	1,871	
Absorción	%	1,010	0,068	0,888	1,812	2,710
				1,112	1,512	
Peso unitario suelto	gr/cm ³	1,594	0,003	1,587	2,333	2,710
				1,599	1,667	
Peso unitario compactado	gr/cm ³	1,702	0,006	1,690	2,000	2,710
				1,711	1,500	

TABLA 3.17. Distribución de Probabilidades (t de Student)

Agregado Fino							
Ensayo	Unidad	Nº Datos	Media	Desv. Stand	t student	Rango Poblacional	
						Inferior	Superior
Módulo de finura		20	2,610	0,026	2,09	2,597	2,622
Material que pasa el tamiz N°200	%	20	1,758	0,111	2,09	1,706	1,810
Peso específico a granel	gr/cm ³	20	2,637	0,010	2,09	2,632	2,642
Peso específico S.S.S.	gr/cm ³	20	2,674	0,010	2,09	2,669	2,679
Peso específico aparente	gr/cm ³	20	2,739	0,010	2,09	2,734	2,743
Absorción	%	20	1,422	0,101	2,09	1,374	1,469
Peso unitario suelto	gr/cm ³	20	1,574	0,009	2,09	1,570	1,578
Peso unitario compactado	gr/cm ³	20	1,720	0,007	2,09	1,717	1,723

Agregado Grueso							
Ensayo	Unidad	Nº Datos	Media	Desv. Stand	t student	Rango Poblacional	
						Inferior	Superior
Módulo de finura		20	7,247	0,015	2,09	7,240	7,254
Material que pasa el tamiz N°200	%	20	0,237	0,034	2,09	0,221	0,253
Peso específico a granel	gr/cm ³	20	2,580	0,004	2,09	2,578	2,582
Peso específico S.S.S.	gr/cm ³	20	2,610	0,006	2,09	2,607	2,613
Peso específico aparente	gr/cm ³	20	2,653	0,006	2,09	2,650	2,656
Absorción	%	20	1,010	0,068	2,09	0,979	1,042
Peso unitario suelto	gr/cm ³	20	1,594	0,003	2,09	1,593	1,595
Peso unitario compactado	gr/cm ³	20	1,702	0,006	2,09	1,699	1,705

Los datos experimentales de los diferentes ensayos ejecutados en los agregados, están dentro del error experimental permitido, que universalmente se acepta que sea menor al 5%. El cálculo del Error de Gauss, ha permitido medir la magnitud de los errores casuales cometidos durante la ejecución de los ensayos tabla 3.15.

Los valores hallados de acuerdo al Criterio de Grubbs para los datos experimentales que aparentemente eran anómalos y que debieran descartarse tabla 3.16, en la cual existe un solo dato con mayor a lo permitido pero esta se acepta porque esta dentro del 5% de probabilidad y los demás valores son menores a los valores límites; por tanto, estos datos no deben ser descartados, porque existe un 95% de probabilidad que los valores supuestos erróneos provienen de los datos colectivos que se analizan.

Los intervalos calculados según la distribución t de Student, ha permitido que a partir de la desviación standard de la muestra, se establezca un intervalo para la media de la población original con un nivel de confianza del 95% tabla 3.17. Es decir, si se hacen nuevos ensayos a los agregados del río San Juan del Oro Localidad El Puente, existe un 95% de probabilidad de que la media de los ensayos que se realizan, se encuentre dentro del intervalo definido para cada propiedad de los agregados.

Se realizó un informe de precisión para los ensayos realizados por la Norma ASTM: Pesos específicos, absorciones, Pesos unitarios, de los agregados: grueso y fino. El cual se encuentra en el Anexo 12, se puede observar que los valores obtenidos son menores, a los exigidos por la Norma ASTM.

Finalmente, el análisis estadístico efectuado en los datos experimentales ha permitido acreditar los resultados de la caracterización de los agregados del río San Juan del Oro Localidad El Puente.

CAPÍTULO 4

DOSIFICACIÓN

4.1 Introducción

En los anteriores capítulos al estudiar las propiedades de los componentes del concreto, se lo hace primordialmente con la finalidad de determinar el diseño de la mezcla (dosificación). El conocimiento de la dosificación del concreto, es de suma importancia para los ingenieros civiles, proyectistas, directores de obra, y toda persona dedicada al difícil arte de la construcción, permitiendo a los primeros especificar la clase de concreto para que sus propiedades tales como, resistencia a los esfuerzos, manejabilidad, docilidad, durabilidad, etc., que respondan a las condiciones de los proyectos, los reglamentos o especificaciones; y a los segundos con los materiales disponibles en obra, confeccionar concretos que cumplan con las propiedades especificadas, o sea, el objetivo en ambos casos es la predeterminación de las propiedades de los concretos lo más exacto posible.

La NORMA BOLIVIANA DEL HORMIGÓN ARMADO CBH-87 establece que la elección de los componentes y su dosificación, debe permitir cumplir las exigencias relativas a:

- Las características especificadas para el hormigón endurecido (resistencia a compresión, aspecto, etc.).
- La durabilidad, teniendo en cuenta la agresividad del ambiente en relación con el hormigón.
- Las características del hormigón fresco, especialmente su consistencia en función de los métodos de fabricación, transporte y puesta en obra.

- Las Consecuencias del tratamiento previsto para el hormigón (curado), en el ambiente en que vaya a ejecutarse.

El hormigón se dosificará con arreglo a los métodos que se estimen oportunos, respetando siempre las dos limitaciones siguientes:

a) La cantidad mínima de cemento, por metro cúbico de hormigón, será de 200 kg, en el caso de hormigones ligeramente armados, y de 350 kg, en el caso de hormigones normalmente armados.

b) La cantidad máxima de cemento, por metro cúbico, será de 400 kg. En casos excepcionales, previa justificación experimental se podrá superar dicho límite.

Para establecer la dosificación (o dosificaciones si son varios los tipos de hormigón exigidos), se deberá recurrir en general a ensayos previos en laboratorio con objeto de que el hormigón resultante satisfaga las condiciones exigidas.

Como se puede ver, la NORMA BOLIVIANA DEL HORMIGÓN ARMADO CBH87, no recomienda un método particular para la dosificación de hormigones; sin embargo, frente a la diversidad de métodos de dosificación se debe utilizar aquél que satisfaga las condiciones generales expuestas anteriormente.

4.2. Elección del Método de Dosificación - Justificación

Existen varios métodos y reglas para dosificar teóricamente un hormigón, pero no son más que orientativos, pues se basan en pruebas de laboratorio y de campo en hormigones elaborados con materiales propios del lugar donde

el método ha sido desarrollado. Por ello, salvo en obras de poca importancia, para determinar las proporciones definitivas de los componentes de un hormigón deben adecuarse tales métodos por medio de ensayos de laboratorio a las condiciones locales.

Los resultados obtenidos de las resistencias vs. Consumo de cemento; respecto a ambos métodos no arrojan datos contundentes para determinar cual de los dos es económicamente más favorable.

El método utilizado en esta investigación es: American Concrete Institute ACI 211.1.74, el cual a desarrollado un procedimiento de diseño de mezcla bastante simple, basándose en tablas que se presentaran en el desarrollo del mismo, nos permite obtener los valores de los diferentes materiales que integran la unidad cúbica del hormigón de manera inmediata.

Si inicialmente se conocen las características de los materiales componentes del hormigón, ésta es una de las ventajas que ofrece el método de la American Concrete Institute ACI, frente al O'Relly en cuanto a diseño de mezcla, ya que este último método requiere en forma adicional la determinación del Coeficiente de Forma o Característica "A" del agregado grueso, este valor es fundamental para determinar la relación agua/cemento de diseño.

También se puede mencionar que el método de la American Concrete Institute ACI, es el más difundido en varios países, en los que se incluye el nuestro, por la confianza en la conocida tecnología norteamericana. Siendo un método desarrollado en Los Estados Unidos de Norte América, está basado en las características propias de sus materiales, por lo que proporciona en el diseño de hormigones una aproximación a las proporciones reales, las cuales tendrán que ser corregidas y adaptadas a las condiciones

locales. Esta adaptación del método, se logra gracias a que el método permite establecer la correspondencia entre la resistencia a compresión del hormigón y la relación agua/cemento para condiciones reales o locales.

Por las razones anteriormente expuestas, la dosificación de hormigones se realizó utilizando el método ACI. El método tiene la ventaja de su simplicidad y puede aplicarse igualmente con agregado grueso redondeado o angular, para el caso del agregado corriente o liviano y para concretos con o sin aire incluido. Para materiales dados se mantiene aproximadamente constante el contenido del agua y prácticamente constante el contenido de agregado grueso.

Para determinar las resistencias de tipo A y Tipo C y su respectiva dosificación que nos planteamos en esta investigación, se determino primero la curva resistencia relación agua/cemento para agregados del río San Juan del Oro Localidad de El Puente.

4.3. Dosificación de hormigones para la determinación de la curva resistencia - Relación agua/cemento

4.3.1. Factores y parámetros de diseño

4.3.1.1. Características de los agregados

Los ensayos realizados de su caracterización de los agregados del río San Juan del Oro Localidad de El Puente, han sido presentados en el Capítulo 3.

4.3.1.2. Características del agua

El lavado del agregado grueso se realizó durante el proceso de toma de muestras, para tal efecto, se utilizó agua del mismo río.

Se utilizó como agua de mezclado y agua de curado agua potable de la ciudad de Tarija, y posee similitud con el agua potable de la Localidad de El Puente ya que tienen las mismas características químicas entre ambas. Sus características físico-químicas se muestran en el Capítulo 3.

4.3.1.3. Tipo de cemento

Para la dosificación de las mezclas de hormigón, se utilizó cemento portland Tipo IP-30. El Puente, producido por la Fabrica de Cemento El Puente (SOBOCE) Tarija. Sus características químicas y físicas son presentadas en el Capitulo 3.

4.3.1.4. Asentamiento

La dosificación de hormigones se realizó para una mezcla de consistencia media (5.0 a 8.0 cm. de asentamiento) adoptando un valor constante de 6 cm de asentamiento, con una tolerancia de ± 1 cm. Estas mezclas podrán ser utilizadas en la construcción de pavimentos compactados a mano, secciones medianamente reforzadas, losas, muros, vigas, etc., con un sistema de colocación manual y sistema de compactación sin vibración.

4.3.1.5. Tamaño máximo del agregado

Para la investigación se utilizaron agregados que pasan el tamiz de 1½" quedando desechados los materiales retenidos en dicho tamiz.

- Tamaño máximo = 1 ½" (38.0 mm.)
- Tamaño máximo nominal = 1 ½" (38.0 mm.)

4.3.1.6. Relación agua/cemento

La relación agua/cemento necesaria depende de las características que se exijan al hormigón, y debe determinarse mediante ensayos previos. No obstante, con respecto a la protección de las armaduras frente a la corrosión, debe señalarse que el valor final real de la relación agua/cemento no debe exceder del 0.70 si se trata de ambientes interiores, ni del 0.65 en ambientes exteriores no agresivos. Por otra parte, la Norma Boliviana del Hormigón Armado CBH-87 no recomienda exceder de 400 kg de cemento por m³ de concreto para evitar agrietamiento del hormigón por efectos de contracción de la pasta de cemento que corresponde aproximadamente a una relación agua/cemento de 0.45 en mezclas de consistencia media.

En la investigación, se dosificaron mezclas para diferentes relaciones agua/cemento: **0.45, 0.50, 0.55 y 0.60**, correspondientes a las resistencias teóricas según ACI: **380.87 kg/cm², 334.47 kg/cm², 293.73 kg/cm², 257.95 kg/cm²**.

La elección de estas relaciones agua/cemento permitirá establecer la correspondencia entre la resistencia real a compresión del hormigón y la relación agua/cemento, con los agregados del río San Juan del Oro Localidad de El Puente y cemento El Puente. Esta elección se la realizó en base a resultados de investigaciones efectuadas por diversos autores en los que normalmente éste es el rango en el que se debe variar las relaciones agua/cemento para producir concreto normal.

4.3.2. Mezclas de prueba

Previamente al diseño de las mezclas para la determinación de las curvas resistencia relación agua/cemento, se realizaron mezclas de prueba para los

hormigones dosificados en base a las relaciones agua/cemento de **0.45, 0.50, 0.55 y 0.60** así se pudo determinar la cantidad de agua de mezclado más próxima a la real, necesaria para alcanzar la consistencia requerida. Estas mezclas de prueba se diseñaron con los valores de agua sugeridos por el método de dosificación de la ACI; las diferencias en la utilización de agua se muestran en la tabla 4.1.

TABLA 4.1. Cantidad de agua de mezclado que requiere para lograr el asentamiento proyectado 6 cm.

Dosificación	Cantidad de Agua Según ACI Kg/m ³ .	Cantidad de Agua de Mezclado Kg/m ³ .
A/C = 0.45	160.000	165.852
A/C = 0.50	160.000	166.663
A/C = 0.55	160.000	167.065
A/C = 0.60	160.000	167.274

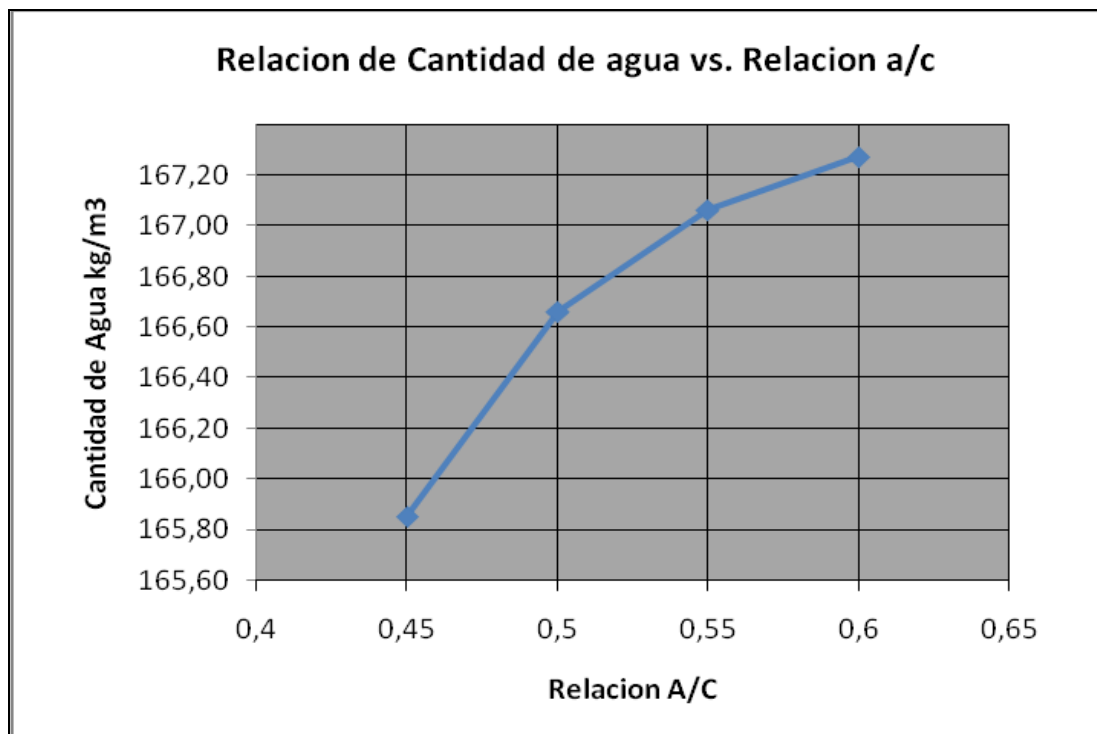


FIGURA 4.1 Representación Grafica de la relación Cantidad de Agua y relación A/C obtenida en laboratorio Mediante Pruebas

La cantidad de agua real necesaria para alcanzar el revenimiento proyectado, fue calculada dividiendo el contenido neto de agua de mezclado de la mezcla de prueba entre el rendimiento de la mezcla de prueba en m^3 y aumentando la cantidad re-estimada de agua 2 kg. por cada centímetro de aumento del asentamiento requerido, posteriormente se re-dosificaron las cantidades de cemento, grava y arena; para el caso de la grava se observó una trabajabilidad adecuada, por lo que se mantuvo el volumen del agregado grueso sugerido por la ACI. La verificación del contenido de aire se realizó por el método de volúmenes de los ingredientes, realizándose una sumatoria de los volúmenes de ingredientes en la mezcla de prueba y por diferencia con el rendimiento de la mezcla se calculó el volumen de aire naturalmente atrapado. También se realizó mediante el Método de Presión. Estos valores fueron muy próximos al 1%, por lo que, se asumió para posteriores dosificaciones como correcta la presunción de 1 % de aire naturalmente atrapado.

Durante el proceso de correcciones en las mezclas de prueba, también se determinaron en laboratorio los Pesos Unitarios del hormigón fresco, verificándose los valores iniciales calculados mediante la fórmula propuesta por la ACI para el cálculo de tales pesos.

4.3.3. Dosificaciones

Realizadas las correcciones en las mezclas de prueba, se establecieron las dosificaciones finales para los valores de las relaciones agua/cemento desde 0.45 hasta 0.60 (con intervalos de 0.05).

El proceso de dosificación para cada relación agua/cemento: 0.45, 0.50, 0.55, 0.60, el lector podrá observar de forma detallada a continuación en:

Dosificación D-1, tabla 4.2.a; Dosificación D-2, tabla 4.2.b.; Dosificación D-3, tabla 4.2.c y Dosificación D-4, tabla 4.2.d; en los cuales se muestran las cantidades de los componentes necesarios para la elaboración de 1 m³ de concreto resultado de las dosificaciones para diferentes relaciones agua/cemento ya descritas. Para determinar la cantidad de agregado fino se empleo el método: en base al volumen absoluto de los ingredientes; siendo el más confiable, las proporciones calculadas en base a este método han sido utilizadas para la fabricación de probetas.

En la tabla 4.3 se resumen las correcciones por humedad y absorción de los agregados realizados a los componentes de las tablas: 4.2.a, 4.2.b, 4.2.c, 4.2.d.

DOSIFICACIÓN DE HORMIGÓN NORMAL - ACI 211.1**Dosificación D-1****Relación agua/cemento : A/C = 0.45****MATERIALES**

Agregado Grueso : Río San Juan del Oro
Agregado fino : Río San Juan del Oro
Cemento : El Puente IP 30

CARACTERÍSTICAS**Datos :**

Peso específico cemento	3030,00 kg/m ³	Absorción A.G.	1,010 %
Peso específico a granel A. G.	2,580 g/cm ³	Absorción A.F.	1,422 %
Peso específico a granel A. F.	2,637 g/cm ³	Humedad A.G.	0,340 %
Peso unitario compactado A. G.	1,702 g/cm ³	Humedad A.F.	1,060 %
Peso unitario compactado A. F.	1,720 g/cm ³	Pérdidas	10 %
Módulo de finura A.G.	7,250		
Módulo de finura A.F.	2,610		

Cálculos :

Asentamiento (Adoptado)	6.0 ± 1 cm	Relación A/C	0,450
Tamaño máx. A.G. (Granulometría)	38,000 mm	Cantidad de cemento	368,560 kg
Cantidad de agua (Tabla 4,1)	165,852 kg/m ³	Cantidad A.G. (Tabla2,14)	0,730 m ³
Contenido de aire (pruebas Lab.)	1 %	Cantidad A.G.	1242,460 kg

Cantidad de agregado fino sobre la base del volumen absoluto

Volumen de agua	0,166 m ³
Volumen absoluto cemento	0,122 m ³
Volumen absoluto de A.G.	0,482 m ³
Volumen aire atrapado	0,010 m ³
Volumen parcial	0,779 m ³
Volumen absoluto A.F.	0,221 m ³
Peso A.F.	582,622 kg

Componentes	Con base en volumen absoluto kg/m ³ _H
Agua	165,852
Cemento	368,560
Agregado Grueso (seco)	1242,460
Agregado Fino (seco)	582,622

TABLA 4.2.a

DOSIFICACIÓN DE HORMIGÓN NORMAL - ACI 211.1

Dosificación D-2

Relación agua/cemento : A/C = 0.50

MATERIALES

Agregado Grueso : Río San Juan del Oro
Agregado fino : Río San Juan del Oro
Cemento : El Puente IP 30

CARACTERÍSTICAS

Datos :

Peso específico cemento	3030,00 kg/m ³	Absorción A.G.	1,010 %
Peso específico a granel A. G.	2,580 g/cm ³	Absorción A.F.	1,422 %
Peso específico a granel A. F.	2,637 g/cm ³	Humedad A.G.	0,350 %
Peso unitario compactado A. G.	1,702 g/cm ³	Humedad A.F.	1,080 %
Peso unitario compactado A. F.	1,720 g/cm ³	Pérdidas	10 %
Módulo de finura A.G.	7,250		
Módulo de finura A.F.	2,610		

Cálculos :

Asentamiento (Adoptado)	6.0 ± 1 cm	Relación A/C	0,500
Tamaño máx. A.G. (Granulometría)	38,000 mm	Cantidad de cemento	333,326 kg
Cantidad de agua (Tabla 4,1)	166,663 kg/m ³	Cantidad A.G. (Tabla 2,14)	0,730 m ³
Contenido de aire (pruebas Lab.)	1 %	Cantidad A.G.	1242,460 kg

Cantidad de agregado fino sobre la base del volumen absoluto

Volumen de agua	0,167 m ³
Volumen absoluto cemento	0,110 m ³
Volumen absoluto de A.G.	0,482 m ³
Volumen aire atrapado	0,010 m ³
Volumen parcial	0,768 m ³
Volumen absoluto A.F.	0,232 m ³
Peso A.F.	611,147 kg

Componentes	Con base en volumen absoluto kg/m ³ H
Agua	166,663
Cemento	333,326
Agregado Grueso (seco)	1242,460
Agregado Fino (seco)	611,147

TABLA 4.2.b

DOSIFICACIÓN DE HORMIGÓN NORMAL - ACI 211.1**Dosificación D-3****Relación agua/cemento : A/C = 0.55****MATERIALES**

Agregado Grueso : Río San Juan del Oro
Agregado fino : Río San Juan del Oro
Cemento : El Puente IP 30

CARACTERÍSTICAS**Datos :**

Peso específico cemento	3030,00 kg/m ³	Absorción A.G.	1,010 %
Peso específico a granel A. G.	2,580 g/cm ³	Absorción A.F.	1,422 %
Peso específico a granel A. F.	2,637 g/cm ³	Humedad A.G.	0,360 %
Peso unitario compactado A. G.	1,702 g/cm ³	Humedad A.F.	1,070 %
Peso unitario compactado A. F.	1,720 g/cm ³	Pérdidas	10 %
Módulo de finura A.G.	7,250		
Módulo de finura A.F.	2,610		

Cálculos :

Asentamiento (Adoptado)	6.0 ± 1 cm	Relación A/C	0,550
Tamaño máx. A.G. (Granulometría)	38,000 mm	Cantidad de cemento	303,755 kg
Cantidad de agua (Tabla 4,1)	167,065 kg/m³	Cantidad A.G. (Tabla 2,14)	0,730 m³
Contenido de aire (pruebas Lab.)	1 %	Cantidad A.G.	1242,460 kg

Cantidad de agregado fino sobre la base del volumen absoluto

Volumen de agua	0,167 m ³
Volumen absoluto cemento	0,100 m ³
Volumen absoluto de A.G.	0,482 m ³
Volumen aire atrapado	0,010 m ³
Volumen parcial	0,759 m ³
Volumen absoluto A.F.	0,241 m ³
Peso A.F.	635,823 kg

Componentes	Con base en volumen absoluto kg/m³
Agua	167,065
Cemento	303,755
Agregado Grueso (seco)	1242,460
Agregado Fino (seco)	635,823

TABLA 4.2.c

DOSIFICACIÓN DE HORMIGÓN NORMAL - ACI 211.1**Dosificación D-4****Relación agua/cemento : A/C = 0.60****MATERIALES**

Agregado Grueso : Río San Juan del Oro
Agregado fino : Río San Juan del Oro
Cemento : El Puente IP 30

CARACTERÍSTICAS**Datos :**

Peso específico cemento	3030,00 kg/m ³	Absorción A.G.	1,010 %
Peso específico a granel A. G.	2,580 g/cm ³	Absorción A.F.	1,422 %
Peso específico a granel A. F.	2,637 g/cm ³	Humedad A.G.	0,360 %
Peso unitario compactado A. G.	1,702 g/cm ³	Humedad A.F.	1,090 %
Peso unitario compactado A. F.	1,720 g/cm ³	Pérdidas	10 %
Módulo de finura A.G.	7,250		
Módulo de finura A.F.	2,610		

Cálculos :

Asentamiento (Adoptado)	6.0 ± 1 cm	Relación A/C	0,600
Tamaño máx. A.G. (Granulometría)	38,000 mm	Cantidad de cemento	278,790 kg
Cantidad de agua (Tabla 4.1)	167,274 kg/m ³	Cantidad A.G. (Tabla 2,14)	0,730 m ³
Contenido de aire (pruebas Lab.)	1 %	Cantidad A.G.	1242,460 kg

Cantidad de agregado fino sobre la base del volumen absoluto

Volumen de agua	0,167 m ³
Volumen absoluto cemento	0,092 m ³
Volumen absoluto de A.G.	0,482 m ³
Volumen aire atrapado	0,010 m ³
Volumen parcial	0,751 m ³
Volumen absoluto A.F.	0,249 m ³
Peso A.F.	656,998 kg

Componentes	Con base en volumen absoluto kg/m ³
Agua	167,274
Cemento	278,790
Agregado Grueso (seco)	1242,460
Agregado Fino (seco)	656,998

TABLA 4.2.d

**TABLA 4.3. Ajustes por el contenido de humedad de los agregados
Elaboración curva Resistencia - Relación agua/cemento**

Cantidad por m ³ de Hormigón - Docificación ACI																
Dosif.	A/C	Agua de Cemento		A. Fino		A. Grueso		Humedad		A. Fino		A. Grueso		Agua Absorbida		Agua Añadida kg.
		mezclado kg.	kg.	Seco kg.	kg.	Seco kg.	kg.	A.F. %	A.G. %	Húmedo kg.	kg.	Húmedo kg.	A.F. kg.	A.G. kg.		
D-1	0,45	165,852	368,560	582,622	611,147	1242,460	1242,460	1,06	0,34	588,798	1246,684	2,106	8,326	176,285		
D-2	0,50	166,663	333,326	611,147	635,823	1242,460	1242,460	1,08	0,35	617,748	1246,809	2,087	8,202	176,952		
D-3	0,55	167,065	303,755	635,823	656,998	1242,460	1242,460	1,07	0,36	642,626	1246,933	2,235	8,078	177,378		
D-4	0,60	167,274	278,790	656,998	656,998	1242,460	1242,460	1,09	0,36	664,160	1246,933	2,178	8,078	177,530		

Absorción del agregado fino 1,422 %

Absorción del agregado grueso 1,010 %

TABLA 4.4 Revoltura para 4 probetas con una pérdida de 10 %

vr = 0,0233 m³

Dosif.	A/C	Agua Cemento		A. Fino		A. Grueso	
		Agua Añadida kg.	kg.	Húmedo kg.	kg.	Húmedo kg.	kg.
D-1	0,45	4,112	8,597	13,734	29,081		
D-2	0,50	4,128	7,775	14,410	29,083		
D-3	0,55	4,138	7,085	14,990	29,086		
D-4	0,60	4,141	6,503	15,492	29,086		

En la tabla 4.5. y 4.6., se resumen las cantidades finales de los componentes necesarios para producir 1 m³ de concreto. La tabla 4.5., se refiere a agregados secos y el agua corresponde al agua de mezclado; si se hacen las dosificaciones en estas condiciones, habrá que añadir a la mezcla la cantidad de agua necesaria para lograr la saturación de los agregados.

Sin embargo, los agregados almacenados en patio pueden tener un contenido de humedad variable que impide su dosificación por peso seco; entonces, resulta más práctico utilizar los agregados en la condición de humedad que se encuentren en el momento de la elaboración de las mezclas y hacer las correcciones a los valores de la tabla 4.5.

En la tabla 4.6., se presentan las cantidades corregidas por humedad y absorción de los agregados, se puede observar el incremento en el peso de los agregados igual al porcentaje de agua que contienen y también el incremento en la cantidad de agua debido a que los agregados presentan un estado de humedad menor que el estado saturado y superficialmente seco.

**TABLA 4.5. Elaboración curva resistencia - relación agua/cemento
Cantidades por m³ de Hormigón (Agregados Secos)**

Dosif.	A/C	Resist. Teórica ACI kg/cm ²	Cemento kg.	A.F. Seco kg.	A.G. Seco kg.	Agua de Mezclado litros
D-1	0.45	380.87	368.560	582.622	1242.46	165.852
D-2	0.50	334.47	333.326	611.147	1242.46	166.663
D-3	0.55	293.73	303.755	635.823	1242.46	167.065
D-4	0.60	257.95	278.790	656.998	1242.46	167.274

La fabricación de probetas para la elaboración de la curva resistencia-relación agua/cemento, se ha realizado con las cantidades de la tabla 4.6.

**TABLA 4.6. Elaboración curva resistencia - relación agua/cemento
Cantidades por m³ de Hormigón (Agregados Húmedos)**

Dosif.	Humedad (%)		Cemento kg.	A. F. Húmedo kg.	A. G. Húmedo kg.	Agua Añadida litros	Proporciones en Peso *
	A. F.	A. G.					
D-1	1,06	0,34	368,560	588,798	1246,684	176,285	1 : 1.598 : 3.383 / 0.48
D-2	1,08	0,35	333,326	617,748	1246,809	176,952	1 : 1.853 : 3.741 / 0.53
D-3	1,07	0,36	303,755	642,626	1246,933	177,378	1 : 2.116 : 4.105 / 0.58
D-4	1,09	0,36	278,790	664,160	1246,933	177,530	1 : 2.382 : 4.473 / 0.64

* El orden es, Cemento : Agregado Fino : Agregado Grueso / Relación a/c que se debe añadir a la mezcla Considerando la humedad de los agregados.

4.4. Confección, curado y rotura de probetas

4.4.1. Mezclado

Para el mezclado se utilizó una mezcladora de tambor rotatorio eléctrica, mezclándose los materiales suficientes para la elaboración de cuatro probetas por cada mezclada, se consideró un 10 % de pérdidas.

Para determinar la cantidad de agua de mezclado se realizó 8 pruebas dos por cada relación agua/cemento, con el fin de obtener el revenimiento deseado, tomando en cuenta para cada una de ellas el porcentaje de vacíos real y el rendimiento del hormigón, aumentando la cantidad de agua, en 2 kg. por cada cm. para alcanzar el revenimiento requerido, aumentando de esta manera el agua de mezclado. Cada prueba o revoltura de 3 probetas, se indica Tabla 4.1.

Con las cantidades de agua obtenidas se procedió a la elaboración del hormigón de acuerdo al procedimiento indicado por el método ACI. Se preparó revolturas de 4 probetas por cada relación agua/cemento. Se dosificaron 4 relaciones agua/cemento, haciendo un total de 32 probetas para la determinación de la curva, 16 para la rotura a los 7 días y 16 para la rotura a los 28 días. El procedimiento de mezclado se realizó según indica la norma ASTM C 192 – 82.

4.4.2. Tiempo de mezclado

Un tiempo de mezclado demasiado corto trae como consecuencia un concreto no uniforme, de baja resistencia y reducida durabilidad. Por el contrario, tiempos de mezclado excesivos facilitan la evaporación del agua de mezclado con la eventual pérdida de manejabilidad.

El proceso de mezclado se realizó por un lapso entre 2 y 2 ½ minutos.

4.4.3. Determinación del asentamiento

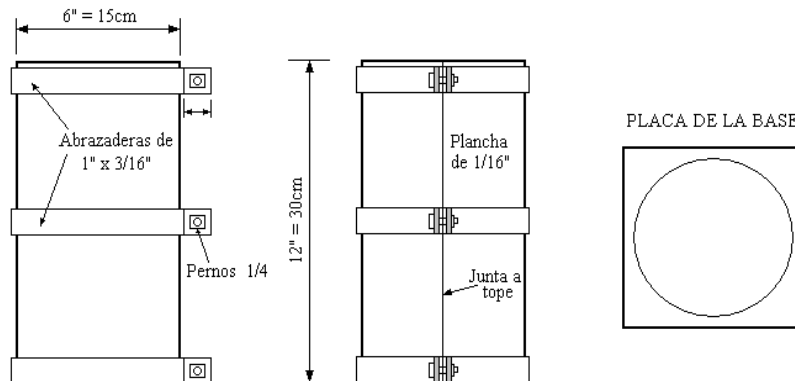
El asentamiento se determinó utilizando el cono de Abrams en la forma que indica la norma ASTM C 143-82; el rango de variación aceptado con respecto al asentamiento predefinido es de ± 1 cm., valor confirmado en la Norma Boliviana del Hormigón Armado para concretos consistencia plástica y blanda.

4.4.4. Vaciado de probetas

Para el vaciado se utilizaron moldes metálicos de forma cilíndrica con 15 cm de diámetro y 30 cm de altura, vaciándose las mezclas en tres capas. La junta longitudinal de cada molde fue impermeabilizada con cinta adhesiva

plástica; las paredes interiores del molde fueron recubiertas con una finísima capa de grasa mecánica con el fin de evitar la adherencia del hormigón a las paredes. El vaciado se realizó siguiendo el procedimiento de la norma ASTM C 192.

Molde para Probeta Cilíndrica de Hormigón



4.4.5. Compactado

La compactación se hizo manualmente utilizando una varilla de acero de 5/8" (16 mm) de diámetro y 24" (610 mm) de longitud con los extremos de forma semiesférica. Se aplicaron 25 golpes en cada una de las tres capas tal y como indica la norma ASTM C 192.

4.4.6. Curado de probetas

Una vez vaciadas las mezclas en los moldes, se dejaron fraguar por un lapso de 24 horas para luego desencofrarlas y sumergir las probetas en la piscina de curado a una temperatura media ambiente aproximada de 21 °C. El procedimiento fue ejecutado siguiendo estrictamente lo indicado por la norma ASTM C 192. Las probetas estuvieron sumergidas completamente hasta horas antes de la rotura.

También se realizó curado mediante riegos periódicos para comparar la diferencia con el curado bajo el agua, la cual tubo una diferencia significativa ya que los curados bajo agua tuvieron mayor resistencia que los que se realizaron mediante riegos periódicos.

4.4.7. Capinado de Probetas

Con la finalidad de nivelar la superficie de las caras (bases) de las probetas de hormigón, se realizó el capinado de las mismas. El camping utilizado se compone de un mortero de azufre compuesto de un 60 % de material combustible (azufre) y un 40 % de material incombustible (cemento) como se indica en la norma ASTM C617-76.

4.4.8. Rotura de probetas

La rotura se realizó a los 7 días las 16 primeras probetas, las restantes 16 probetas a los 28 días, se elaboró la curva resistencia- relación agua/cemento para los 7 días y 28 días de edad.

Para determinar la resistencia a la compresión de las probetas de hormigón, se utilizó una prensa hidráulica manual con una capacidad de 100 Toneladas para cilindros de hasta 160 mm de diámetro por 320 mm de altura con un manómetro de 300 mm de diámetro. El ensayo es detallado en la norma ASTM C39-81.

La carga leída se afectó con un coeficiente de 0.0161 debido al tiempo de uso de la prensa hidráulica (Laboratorio).

4.5. Datos experimentales de las pruebas de resistencia

En las tablas 4.7.a y 4.7.b se muestran los datos experimentales de las pruebas de resistencia en probetas elaboradas para la determinación de la curva resistencia relación agua/cemento, para edades de 7 días y 28 días. También se encuentran en los anexos 15

TABLA 4.7.a. Resistencia a compresión de probetas de Hormigón para elaboración curva resistencia - relación agua/cemento

Relación agua/cemento A/C = 0.45							
Prob. N°	Asent. cm.	Fecha de Vaciado	Fecha de Rotura	Edad días	Sección cm ²	Carga kg.	Resistencia kg./cm ²
N-1-R45-7	6 ±1	05/12/2014	12/12/2014	7	176,71	32024,40	181,23
N-2-R45-7	6 ±1	05/12/2014	12/12/2014	7	176,71	33152,12	187,61
N-3-R45-7	6 ±1	05/12/2014	12/12/2014	7	176,71	33024,86	186,89
N-4-R45-7	6 ±1	05/12/2014	12/12/2014	7	176,71	32995,56	186,72

Relación agua/cemento A/C = 0.50							
Prob. N°	Asent. cm.	Fecha de Vaciado	Fecha de Rotura	Edad días	Sección cm ²	Carga kg.	Resistencia kg./cm ²
N-1-R50-7	6 ±1	08/12/2014	15/12/2014	7	176,71	28562,12	161,63
N-2-R50-7	6 ±1	08/12/2014	15/12/2014	7	176,71	28856,35	163,30
N-3-R50-7	6 ±1	08/12/2014	15/12/2014	7	176,71	28765,36	162,78
N-4-R50-7	6 ±1	08/12/2014	15/12/2014	7	176,71	28635,84	162,05

Relación agua/cemento A/C = 0.55							
Prob. N°	Asent. cm.	Fecha de Vaciado	Fecha de Rotura	Edad días	Sección cm ²	Carga kg.	Resistencia kg./cm ²
N-1-R55-7	6 ±1	10/12/2014	17/12/2014	7	176,71	24562,12	139,00
N-2-R55-7	6 ±1	10/12/2014	17/12/2014	7	176,71	24265,65	137,32
N-3-R55-7	6 ±1	10/12/2014	17/12/2014	7	176,71	24345,95	137,77
N-4-R55-7	6 ±1	10/12/2014	17/12/2014	7	176,71	24495,26	138,62

Relación agua/cemento A/C = 0.60							
Prob. N°	Asent. cm.	Fecha de Vaciado	Fecha de Rotura	Edad días	Sección cm ²	Carga kg.	Resistencia kg./cm ²
N-1-R60-7	6 ±1	12/12/2014	19/12/2014	7	176,71	19153,95	108,39
N-2-R60-7	6 ±1	12/12/2014	19/12/2014	7	176,71	19752,98	111,78
N-3-R60-7	6 ±1	12/12/2014	19/12/2014	7	176,71	19023,45	107,65
N-4-R60-7	6 ±1	12/12/2014	19/12/2014	7	176,71	19058,21	107,85

TABLA 4.7.b. Resistencia a compresión de probetas de Hormigón para elaboración curva resistencia - relación agua/cemento

Relación agua/cemento A/C = 0.45							
Prob. N°	Asent. cm.	Fecha de Vaciado	Fecha de Rotura	Edad días	Sección cm ²	Carga kg.	Resistencia kg./cm ²
N-1-R45-28	6 ±1	05/12/2014	02/01/2015	28	176,71	50342,65	284,89
N-2-R45-28	6 ±1	05/12/2014	02/01/2015	28	176,71	50096,95	283,50
N-3-R45-28	6 ±1	05/12/2014	02/01/2015	28	176,71	51025,42	288,75
N-4-R45-28	6 ±1	05/12/2014	02/01/2015	28	176,71	50516,12	285,87

Relación agua/cemento A/C = 0.50							
Prob. N°	Asent. cm.	Fecha de Vaciado	Fecha de Rotura	Edad días	Sección cm ²	Carga kg.	Resistencia kg./cm ²
N-1-R50-28	6 ±1	08/12/2014	05/01/2015	28	176,71	44220,98	250,25
N-2-R50-28	6 ±1	08/12/2014	05/01/2015	28	176,71	44846,79	253,79
N-3-R50-28	6 ±1	08/12/2014	05/01/2015	28	176,71	44647,24	252,66
N-4-R50-28	6 ±1	08/12/2014	05/01/2015	28	176,71	44388,51	251,19

Relación agua/cemento A/C = 0.55							
Prob. N°	Asent. cm.	Fecha de Vaciado	Fecha de Rotura	Edad días	Sección cm ²	Carga kg.	Resistencia kg./cm ²
N-1-R55-28	6 ±1	10/12/2014	07/01/2015	28	176,71	38124,49	215,75
N-2-R55-28	6 ±1	10/12/2014	07/01/2015	28	176,71	37925,65	214,62
N-3-R55-28	6 ±1	10/12/2014	07/01/2015	28	176,71	37635,79	212,98
N-4-R55-28	6 ±1	10/12/2014	07/01/2015	28	176,71	37156,56	210,27

Relación agua/cemento A/C = 0.60							
Prob. N°	Asent. cm.	Fecha de Vaciado	Fecha de Rotura	Edad días	Sección cm²	Carga kg.	Resistencia kg./cm²
N-1-R60-28	6 ±1	12/12/2014	09/01/2015	28	176,71	29256,26	165,56
N-2-R60-28	6 ±1	12/12/2014	09/01/2015	28	176,71	29126,54	164,83
N-3-R60-28	6 ±1	12/12/2014	09/01/2015	28	176,71	29199,56	165,24
N-4-R60-28	6 ±1	12/12/2014	09/01/2015	28	176,71	29179,21	165,12

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

5.1. Introducción

El análisis metodológico que se realizará en el presente apartado tiene un carácter principalmente de relación y comparación, entre el comportamiento del hormigón ante la resistencia a compresión y las distintas variables ó características de sus componentes, que en este caso es la variación de la relación agua/cemento.

Para nuestro estudio partimos de dos variables bien definidas, que son:

- Resistencia a compresión del hormigón
- Edad del hormigón

Partiendo de relacionar estas variables, podemos obtener gráficos y ábacos consistentes en curvas ajustadas, que nos darán una idea real de cómo es el comportamiento del hormigón y así poder relacionarlo o compararlo con los parámetros de estudio.

Se prefiere adoptar una metodología de relación y comparación por ser práctica y demostrativa, para así lograr un mejor entendimiento de cómo se comporta el hormigón ante el esfuerzo compresión con una variación de la relación agua/cemento.

Los propósitos de las pruebas de resistencia del concreto son para determinar el cumplimiento de una especificación de resistencia y para medir la variabilidad del concreto.

El Concreto, que es una masa endurecida de materiales heterogéneos, está sujeto a la influencia de numerosas variables. Dependiendo de su propia variabilidad, las características de cada uno de Los ingredientes pueden ocasionar variaciones en la resistencia de éste. Las variaciones también pueden ser el resultado de las prácticas seguidas durante la dosificación, el mezclado, la transportación, la colocación y el curado. Además de las variaciones presentes en el concreto mismo, las variaciones en las pruebas de resistencia también serán el resultado de la fabricación, de las pruebas y del tratamiento de las mezclas de prueba. Deben aceptarse las variaciones en la resistencia del concreto, pero con toda confianza se puede producir concreto de la calidad adecuada si se mantiene un control apropiado, si se interpretan correctamente los resultados de las pruebas y si se toman en consideración sus limitaciones.

Los procedimientos estadísticos nos proporcionan medios valiosos para la evaluación de los resultados de las pruebas de resistencia, y la información que se deriva de dichos procedimientos también sirve para reafirmar los criterios y las especificaciones del diseño. Para que estos procedimientos estadísticos sean válidos, los datos deben derivarse de muestras obtenidas en el curso del desarrollo de un plan de muestreo al azar, diseñado para reducir la posibilidad de que aquél que haga la prueba, escoja las muestras.

Para obtener el máximo de información, debe efectuarse una cantidad suficiente de pruebas, con lo cual se indica la variación en el concreto elaborado y permite la utilización de los procedimientos estadísticos apropiados que serán empleados en la interpretación de los resultados de las pruebas.

5.2. Funciones estadísticas

La estadística, estudia los métodos científicos para recoger, organizar, resumir y analizar datos, así como para sacar conclusiones válidas y tomar decisiones razonables basadas en tal análisis.

El uso de los diferentes métodos que nos proporciona la estadística es general, por lo que la rama de la Ingeniería Civil no puede dejar de hacer uso de estos métodos, ya que los mismos le permiten contar con una herramienta de control y toma de decisiones.

En el presente trabajo de investigación, no se pretende describir ampliamente estos métodos; sino, trataremos de exponer en forma resumida algunas definiciones y métodos que se utilizarán y a su vez nos permitirán interpretar correctamente los resultados y valores obtenidos en el presente trabajo.

5.2.1. Promedio, \bar{x}

La resistencia promedio de todas las funciones individuales se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (5.1)$$

Donde: $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ son los resultados de la resistencia de las pruebas individuales y n es el número total de pruebas efectuadas.

5.2.2. Desviación standard, σ

La medida de dispersión generalmente más reconocida es la raíz cuadrada del promedio de la suma de los cuadrados de las desviaciones de las resistencias, con respecto a la resistencia promedio, dividido entre el número de resultados menos uno.

Esta estadística es conocida como la desviación standard y puede considerarse como el radio de giro alrededor de la línea de simetría del área bajo la curva de distribución de frecuencia de los datos de resistencia.

La manera de hallar la desviación standard depende del número de muestras que se tenga en cuenta para la ejecución del control de calidad de la producción; así:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (5.2)$$

Para ≤ 30 datos

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (5.3)$$

Para > 30 datos

5.2.3. Coeficiente de variación, V

Es la desviación Standard, expresada como un porcentaje de la resistencia promedio.

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} * 100 \dots \% \quad (5.4)$$

σ = Desviación Estándar

\bar{x} = Promedio

Los valores que relacionan el grado de control de calidad con el coeficiente de variación se muestra en la tabla 5.1.

TABLA 5.1. Coeficiente de variación para diferentes grados de control de calidad en la producción de Hormigones

Grado de control	Coeficiente de variación (V)
Ensayos de laboratorio	5%
Excelente en obra	10 % a 12 %
Bueno	15%
regular	18%
Inferior	20%
Malo	25%

Fuente: "Práctica Recomendable para la Evaluación de los resultados de Prueba de Resistencia ACI 214", Instituto mexicano del Cemento y del Concreto.

El coeficiente de variación de las muestras de ensayo tomadas en obra y utilizadas en el concreto, toma en cuenta los coeficientes de variación de la compañía constructora (V_1) y del laboratorio encargado del control (V_2) y se relacionan mediante la siguiente ecuación:

$$V = \sqrt{V_1^2 + V_2^2} \quad (5.5)$$

5.2.4. Intervalo, R

El intervalo es la estadística que se obtiene restando el menor de un conjunto de números del más alto del grupo. El intervalo dentro de la prueba se obtiene restando la menor de las resistencias del conjunto de cilindros promediada para formar una prueba a partir de la más alta del grupo.

El intervalo dentro de la prueba es útil en el cálculo de la desviación standard inherente a la prueba.

5.3. Normas de control

La decisión relativa a si la desviación standard o el coeficiente de variación es la medida apropiada de dispersión que debe utilizarse en determinada situación, depende de cuál de las dos medidas es la constante más cercana a las características de resistencia, a través de un intervalo de resultados, de esa situación en particular. La desviación standard permanece como una constante más aproximada, en especial en resistencias superiores a 200 kg/cm². Se considera más aplicable el coeficiente de variación para las variaciones dentro de la prueba.

TABLA 5.2. Norma para el control de calidad del Hormigón

Variación total					
Clase de Operador	Desviación Standard para diferentes grados de control (kg./cm²)				
	Excelente	Muy bueno	Bueno	Aceptable	Pobre
Pruebas de control en el campo	< 25	25 a 35	35 a 40	40 a 50	> 50
Mezclas de prueba de laboratorio	< 15	15 a 17	17 a 20	20 25	> 20
Variación en las pruebas					
Clase de operador	Coefficiente de variación para diferentes grados de control (%)				
	Excelente	Muy bueno	Bueno	Aceptable	Pobre
Pruebas de control en el campo	< 3	3 a 4	4 a 5	5 a 6	> 6
Mezclas de prueba de laboratorio	< 2	2 a 3	3 a 4	4 a 5	> 5

Fuente: "Práctica Recomendable para la Evaluación de los Resultados de Pruebas de Resistencia ACI 214", Instituto Mexicano del Cemento y del concreto.

La tabla 5.2 muestra la variabilidad que puede esperarse de las pruebas de resistencia a la compresión en proyectos sujetos a diferentes grados de control. Estos valores no se aplican a otras pruebas de resistencia.

5.4. Resultados del análisis de datos experimentales

En las tablas 5.3.a y 5.3.b se resume la aplicación de las funciones estadísticas media, desviación standard y coeficiente de variación a los datos experimentales para la elaboración de la curva resistencia - relación agua/cemento, para edades de 7 días y 28 días.

TABLA 5.3.a. Control estadístico probetas para la elaboración curva resistencia - relación agua/cemento

Probetas Nº	Relación A/C	Edad días	Resistencia kg./cm ²	Control Estadístico		
N-1-R45-7	0.45	7	181,23			
N-2-R45-7	0.45	7	187,61	Promedio	kg/cm ²	185,61
N-3-R45-7	0.45	7	186,89	Desv. Stand.	kg/cm ²	2,95
N-4-R45-7	0.45	7	186,72	Coef. Variación	%	1,59

N-1-R50-7	0.50	7	161,63			
N-2-R50-7	0.50	7	163,30	Promedio	kg/cm ²	162,44
N-3-R50-7	0.50	7	162,78	Desv. Stand.	kg/cm ²	0,74
N-4-R50-7	0.50	7	162,05	Coef. Variación	%	0,46

N-1-R55-7	0.55	7	139,00			
N-2-R55-7	0.55	7	137,32	Promedio	kg/cm ²	138,18
N-3-R55-7	0.55	7	137,77	Desv. Stand.	kg/cm ²	0,77
N-4-R55-7	0.55	7	138,62	Coef. Variación	%	0,56

N-1-R60-7	0.60	7	108,39			
N-2-R60-7	0.60	7	111,78	Promedio	kg/cm ²	108,92
N-3-R60-7	0.60	7	107,65	Desv. Stand.	kg/cm ²	1,93
N-4-R60-7	0.60	7	107,85	Coef. Variación	%	1,78

TABLA 5.3.b. Control estadístico probetas para la elaboración curva resistencia - relación agua/cemento

Probetas Nº	Relación A/C	Edad días	Resistencia kg./cm ²	Control Estadístico		
N-1-R45-28	0.45	28	284,89			
N-2-R45-28	0.45	28	283,50	Promedio	kg./cm ²	285,75
N-3-R45-28	0.45	28	288,75	Desv. Stand.	kg./cm ²	2,22
N-4-R45-28	0.45	28	285,87	Coef. Variación	%	0,78

N-1-R50-28	0.50	28	250,25			
N-2-R50-28	0.50	28	253,79	Promedio	kg./cm ²	251,97
N-3-R50-28	0.50	28	252,66	Desv. Stand.	kg./cm ²	1,57
N-4-R50-28	0.50	28	251,19	Coef. Variación	%	0,62

N-1-R55-28	0.55	28	215,75			
N-2-R55-28	0.55	28	214,62	Promedio	kg./cm ²	213,40
N-3-R55-28	0.55	28	212,98	Desv. Stand.	kg./cm ²	2,38
N-4-R55-28	0.55	28	210,27	Coef. Variación	%	1,11

N-1-R60-28	0.60	28	165,56			
N-2-R60-28	0.60	28	164,83	Promedio	kg./cm ²	165,19
N-3-R60-28	0.60	28	165,24	Desv. Stand.	kg./cm ²	0,30
N-4-R60-28	0.60	28	165,12	Coef. Variación	%	0,18

Como no se pretende determinar la aceptación o rechazo de un lote de hormigón, ni tampoco evaluar la uniformidad de hormigón, caso más frecuente, para conocer su grado de control en función de las condiciones de ejecución y además todas las series de un mismo lote, fueron hechas con el mismo material, la misma persona, el mismo equipo e incluso el mismo día es de esperar que no existan variaciones fundamentales en la resistencia. Por tanto, nos interesa conocer la variación total de cada lote, y en este caso la desviación standard es la medida apropiada de dispersión y como se

puede ver en la tabla 5.4. Las desviaciones standard son menores a 15 kg/cm² que corresponde a un grado de control excelente según la tabla 5.2. Ningún cilindro es considerado sospechoso al no existir una variación mayor que $\pm 2 \sigma$ respecto a la resistencia promedio.

TABLA 5.4. Resultado del análisis estadístico probetas para elaboración curva resistencia – relación agua/cemento

Dosif.	A/C	Nº Prob.	Edad días	R. Prom. kg./cm ²	Desv. Stad. kg./cm ²	Coef. Var. %	Intervalo
D-1	0.45	4	7	185,61	2,95	1,59	181,23 - 187,61
D-2	0.50	4	7	162,44	0,74	0,46	161,63 - 163,30
D-3	0.55	4	7	138,18	0,77	0,56	137,32 - 139,00
D-4	0.60	4	7	108,92	1,93	1,78	107,65 - 111,78
D-1	0.45	4	28	285,75	2,22	0,78	283,50 - 288,75
D-2	0.50	4	28	251,97	1,57	0,62	250,25 - 253,79
D-3	0.55	4	28	213,40	2,38	1,11	210,27 - 215,75
D-4	0.60	4	28	165,19	0,30	0,18	164,83 - 165,56

5.5. Ecuaciones y curvas: resistencia – relación agua/cemento

5.5.1. Curvas de ajuste

Los resultados numéricos, obtenidos de la rotura de probetas en laboratorio y presentados anteriormente, permiten desarrollar modelos matemáticos traducidos en ecuaciones, las cuales expresan la resistencia a la compresión del hormigón en función de la relación agua/cemento.

Para determinar la ecuación que relacione las variables, un primer paso es la colección de datos (x,y) que muestran la correspondencia de las variables consideradas.

Si tenemos los puntos (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_n, y_n) representados en un sistema de coordenadas rectangulares (diagrama de dispersión), esta serie de puntos experimentales no encaja dentro de una curva o línea recta que sabemos que debe ser la representación real del comportamiento de los datos obtenidos para un sistema bajo estudio, entonces hay necesidad de “ajustar” los datos experimentales conforme a una curva o línea recta, que muestre una cierta tendencia que luego permita sacar conclusiones más reales sobre el comportamiento del sistema estudiado.

El método más utilizado para ajustar tanto curvas como líneas rectas de datos experimentales es el llamado método de mínimos cuadrados.

5.5.1.1. Método de mínimos cuadrados

Dentro del proceso de análisis de los resultados, encontraremos con frecuencia la relación existente entre dos variables, por ejemplo, datos de resistencia a compresión del hormigón vs. datos de edad del hormigón. Esto hace necesario que las mismas sean expresadas en forma matemática determinando una ecuación que conecte a las variables para una mayor interpretación de las mismas.

Para hallar una ecuación que relacione las variables que se pretende estudiar, el primer paso es obtener los datos que muestren valores correspondientes a las variables bajo consideración. Así por ejemplo si denotamos como “y” al valor de la resistencia obtenida en roturas de probetas de hormigón y como “x” a la edad correspondiente a una determinada mezcla de diseño, entonces la muestra de “n” probetas de hormigón revelaría las resistencias y_1, y_2, \dots, y_n y las edades correspondientes x_1, x_2, \dots, x_n .

El próximo paso es marcar los puntos (x_1, y_1) ; (x_2, y_2) ; (x_3, y_3) sobre un sistema de coordenadas rectangulares. El conjunto de puntos resultantes se llama a veces, un diagrama de dispersión.

A partir de un diagrama de dispersión es posible, visualizar una curva suave que aproxima los datos. Tal curva se llama curva aproximante. En la Fig. 5.1 por ejemplo, los datos parecen aproximarse bien a una línea recta, y decimos que hay una relación lineal. En la Fig. 5.2, sin embargo, aunque existe una relación entre las variables, no es lineal, y se dice que es una relación no lineal.

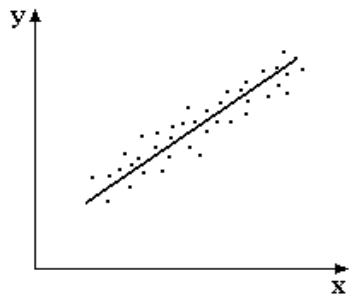


FIGURA 5.1 Aproximación lineal

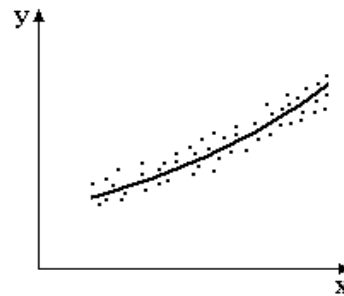


FIGURA 5.3 Aproximación no lineal

5.5.1.2. Recta de mínimos cuadrados

La recta de aproximación de mínimos cuadrados del conjunto de puntos (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_n, y_n) , tiene la ecuación de la forma:

$$y = a + b * x \quad (5.6)$$

Donde las constantes a y b se determinan mediante el sistema de ecuaciones:

$$\sum y = a * n + b * \sum x \quad (5.7)$$

$$\sum (x * y) = a * \sum x + b * \sum x^2$$

Que son las llamadas ecuaciones normales para la recta de mínimos cuadrados.

n = número de pares de datos

También a y b se pueden determinar con las siguientes ecuaciones:

$$a = \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i^2\right)\left(\sum_{i=1}^n y_i\right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)\left(\sum_{i=1}^n x_i y_i\right)}{n\left(\sum_{i=1}^n x_i^2\right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2}$$

(5.8)

$$b = \frac{n\left(\sum_{i=1}^n x_i y_i\right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)\left(\sum_{i=1}^n y_i\right)}{n\left(\sum_{i=1}^n x_i^2\right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2}$$

(5.9)

Coeficiente de correlación (r)

El coeficiente de correlación (r) se define como la raíz cuadrada del cociente entre la variación explicada entre la variación total y viene dada por:

$$r = \pm \sqrt{\frac{\text{variación.explicada}}{\text{variación.total}}} = \pm \sqrt{\frac{\sum (Y - \bar{y})^2}{\sum (y - \bar{y})^2}} \quad \text{(5.10)}$$

el coeficiente de correlación varía entre -1 y $+1$.

Este coeficiente se lo puede calcular con la siguiente fórmula práctica:

$$r = \frac{n\left(\sum_{i=1}^n x_i y_i\right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)\left(\sum_{i=1}^n y_i\right)}{\sqrt{\left[n\left(\sum_{i=1}^n x_i^2\right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2\right] * \left[n\left(\sum_{i=1}^n y_i^2\right) - \left(\sum_{i=1}^n y_i\right)^2\right]}} \quad \text{(5.11)}$$

5.5.1.3. Ley de Abrams

Duff Abrams, en el año 1918, formuló que para un concreto perfectamente compactado, empleando materiales con las mismas características y condiciones de ensayo, la resistencia, a una edad dada, es inversamente proporcional a la relación agua/cemento. Dicha ley la expresó matemáticamente en la forma siguiente:

$$R = \frac{K_1}{(K_2)^{A/C}} \quad (5.12)$$

Donde:

R = Resistencia del hormigón

K_1, K_2 = Constantes que dependen de la calidad de los materiales, edad del concreto, sistema de curado, condiciones de ensayo, etc.

A/C = Relación agua/cemento en peso.

5.5.2. Ajuste de la curva resistencia relación agua/cemento

La ecuación (5.12) representa una función exponencial, donde es posible transformar a una ecuación lineal de la forma (5.6) y por regresión lineal poder calcular las constantes K_1 y K_2 de la siguiente manera:

Si hacemos $A/C = x$ y aplicando logaritmos a la ecuación (5.12) se tiene:

$$\text{Log}(R) = \text{Log}(K_1) - x * \text{Log}(K_2)$$

Además:

$$y = \text{Log}(R)$$

$$a = \text{Log}(K_1)$$

$$b = - \text{Log}(K_2)$$

Entonces,

$$y = a + b * x$$

Que es una ecuación lineal de la forma de la ecuación (5.6).

Después de haber calculado las constantes a y b, se podrá graficar una curva en escala logarítmica, lo cual no tiene mucha importancia, sino el cálculo de las constantes K_1 y K_2 , con la cual la función adquiere nuevamente la forma exponencial, y su gráfico se refiere a una escala normal.

1. A continuación se muestra en forma resumida los cálculos para la determinación de la ecuación de la curva resistencia - relación agua/cemento, para la edad de 7 días.

TABLA 5.5 Ajuste de la curva relación agua/cemento edad 7 días

A/C=x	R.	x²	LogR=y	x*y	y²
0,45	185,61	0,2025	2,26860	1,02087	5,14655
0,50	162,44	0,2500	2,21069	1,10535	4,88716
0,55	138,18	0,3025	2,14045	1,17724	4,58151
0,60	108,92	0,3600	2,03711	1,22226	4,14981
2,10		1,115	8,65685	4,52573	18,76503

Luego, según el sistema de ecuaciones se tiene las siguientes soluciones:

$$\begin{aligned} 4 * a + 2.10 * b &= 8.65685 & a &= 2,96718 \\ 2.10 * a + 1.115 * b &= 4.52573 & b &= -1,52946 \end{aligned}$$

pero, según expresiones

anteriores

$$\begin{aligned} a &= \log(k_1) & k_1 &= 927,208171 \\ b &= -\log(k_2) & k_2 &= 33,842155 \end{aligned}$$

por lo tanto, la ecuación de ajuste según la ley de Abrams para 28 días es:

$$R = 927,208171 / 33,842155^{(A/C)} \quad (5.13)$$

Ajustado con un coeficiente de correlación de:

$$r = 0,99093$$

La ecuación 5.13 expresa la variación de la resistencia promedio a compresión del hormigón (R) en función de la relación agua/cemento (A/C) para condiciones de los materiales utilizados en la investigación.

En la tabla 5.6 se muestra los valores de las resistencias a compresión del hormigón para diferentes relaciones agua/cemento obtenidos de laboratorio y los valores ajustados de acuerdo a la ecuación 5.13, para la edad de 7 días.

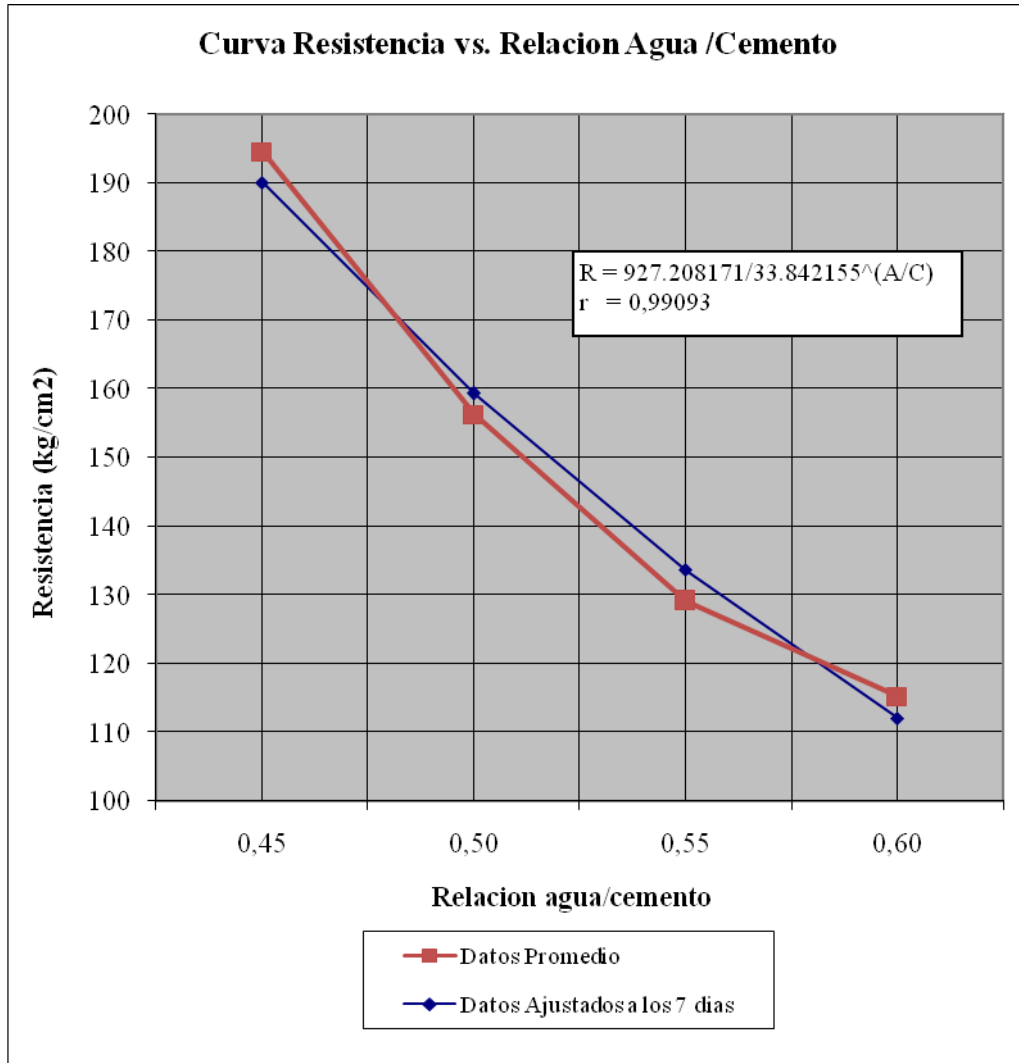
TABLA 5.6 Resistencia cilíndricas promedio y ajustadas para diferentes relaciones Agua/Cemento

Relación A/C	Resistencia Promedio a los 7 días kg/cm ²	Resistencia a los 7 días Ajustadas kg/cm ² *
0,45	185,61	190,073
0,50	162,44	159,385
0,55	138,18	133,652
0,60	108,92	112,073

*Estos valores Fueron calculados de acuerdo a la Ecuación 5.13

Los valores de la tabla 5.6 están representados gráficamente en la figura 5.3; la curva de ajuste tiene como ley de variación a la ecuación 5.13.

FIGURA 5.3 Ajuste de la curva resistencia vs. Relación agua/cemento para la edad de 7 días.



2. A continuación se muestra en forma resumida los cálculos para la determinación de la ecuación de la curva resistencia - relación agua /cemento, para edad de 28 días.

TABLA 5.7 Ajuste de la curva relación agua/cemento edad 28 días

A/C=x	R.	x²	LogR=y	x*y	y²
0,45	285,75	0,2025	2,45599	1,10520	6,03189
0,50	251,97	0,2500	2,40135	1,20068	5,76649
0,55	213,40	0,3025	2,32920	1,28106	5,42518
0,60	165,19	0,3600	2,21798	1,33079	4,91943
2,10		1,115	9,40452	4,91772	22,14299

Luego, según el sistema de ecuaciones se tiene las siguientes soluciones:

$$\begin{aligned} 4 \cdot a + 2.10 \cdot b &= 9.40452 & a &= 3,17662 \\ 2.10 \cdot a + 1.115 \cdot b &= 4.91772 & b &= -1,57236 \end{aligned}$$

pero, según expresiones anteriores

$$\begin{aligned} a &= \log(k_1) & k_1 &= 1501,831517 \\ b &= -\log(k_2) & k_2 &= 37,356229 \end{aligned}$$

por lo tanto, la ecuación de ajuste según la ley de Abrams para 28 días es:

$$R = 1501,831517 / 37,356229^{(A/C)} \quad (5.14)$$

Ajustado con un coeficiente de correlación de:

$$r = 0,98693$$

De la misma manera la ecuación 5.14 expresa la variación de la resistencia promedio a compresión del hormigón (R) en función de la relación agua/cemento (A/C) para condiciones materiales utilizados en la investigación.

3. Realizaremos una comparación de acuerdo con la resistencia Teórica del ACI para los 28 días según la tabla 2.13 del capítulo 2, obtenemos la siguiente ecuación:

TABLA 5.8 Ajuste de la curva relación agua/cemento edad 28 días según ACI

A/C=x	R.	x²	LogR=y	x*y	y²
0,38	450,000	0,1444	2,653212514	1,008220755	7,039536643
0,43	400,000	0,1849	2,602059991	1,118885796	6,770716198
0,48	350,000	0,2304	2,544068044	1,221152661	6,472282214
0,55	300,000	0,3025	2,477121255	1,362416690	6,136129711
0,62	250,000	0,3844	2,397940009	1,486722805	5,750116285
0,7	200,000	0,4900	2,301029996	1,610720997	5,294739041
0,80	150,000	0,6400	2,176091259	1,740873007	4,735373168
3,96		2,3766	17,15152307	9,548992712	42,198893260

Luego, según el sistema de ecuaciones se tiene las siguientes soluciones:

$$7 \cdot a + 3.96 \cdot b = 17.15152 \quad a = 3,08852$$

$$3.96 \cdot a + 2.3766 \cdot b = 9.548992 \quad b = -1,12831$$

pero, según expresiones anteriores

$$a = \log(k_1) \quad k_1 = 1226,075643$$

$$b = -\log(k_2) \quad k_2 = 13,437161$$

por lo tanto, la ecuación de ajuste según la ley de Abrams para 28 días es:

$$R = 1226.075643/13.437161^{(A/C)} \quad (5.15)$$

Ajustado con un coeficiente de correlación de:

$$r = 0,99908412$$

En la tabla 5.9 se muestra los valores de las resistencias a compresión del hormigón para diferentes relaciones agua/cemento obtenidos de laboratorio y los valores ajustados de acuerdo a la ecuación 5.14, para la edad de 28 días, como también los valores ajustados de acuerdo Resistencia Teórica a los 28 días del ACI tabla 2.13 con la ecuación 5.15.

TABLA 5.9 Resistencia cilíndricas promedio y ajustadas para diferentes relaciones Agua/Cemento

Relación A/C	Resistencia Teórica a los 28 días según ACI kg/cm ² *	Resistencia Promedio a los 28 días kg/cm ²	Resistencia 28 días Ajustadas kg/cm ² **
0,45	380,872	285,75	294,481
0,50	334,475	251,97	245,720
0,55	293,730	213,40	205,032
0,60	257,948	165,19	171,082

* Estos valores han sido calculados por medio de la ecuación 5.15 de ajuste según la ley de Abrams con datos de resistencia vs. relación agua/cemento de la tabla 2.13 capítulo 2.

** Estos valores han sido calculados por medio de la ecuación 5.14.

Los valores de la tabla 5.9 están representados gráficamente en la figura 5.4; la curva de ajuste tiene como ley de variación a la ecuación 5.14 y 5.15.

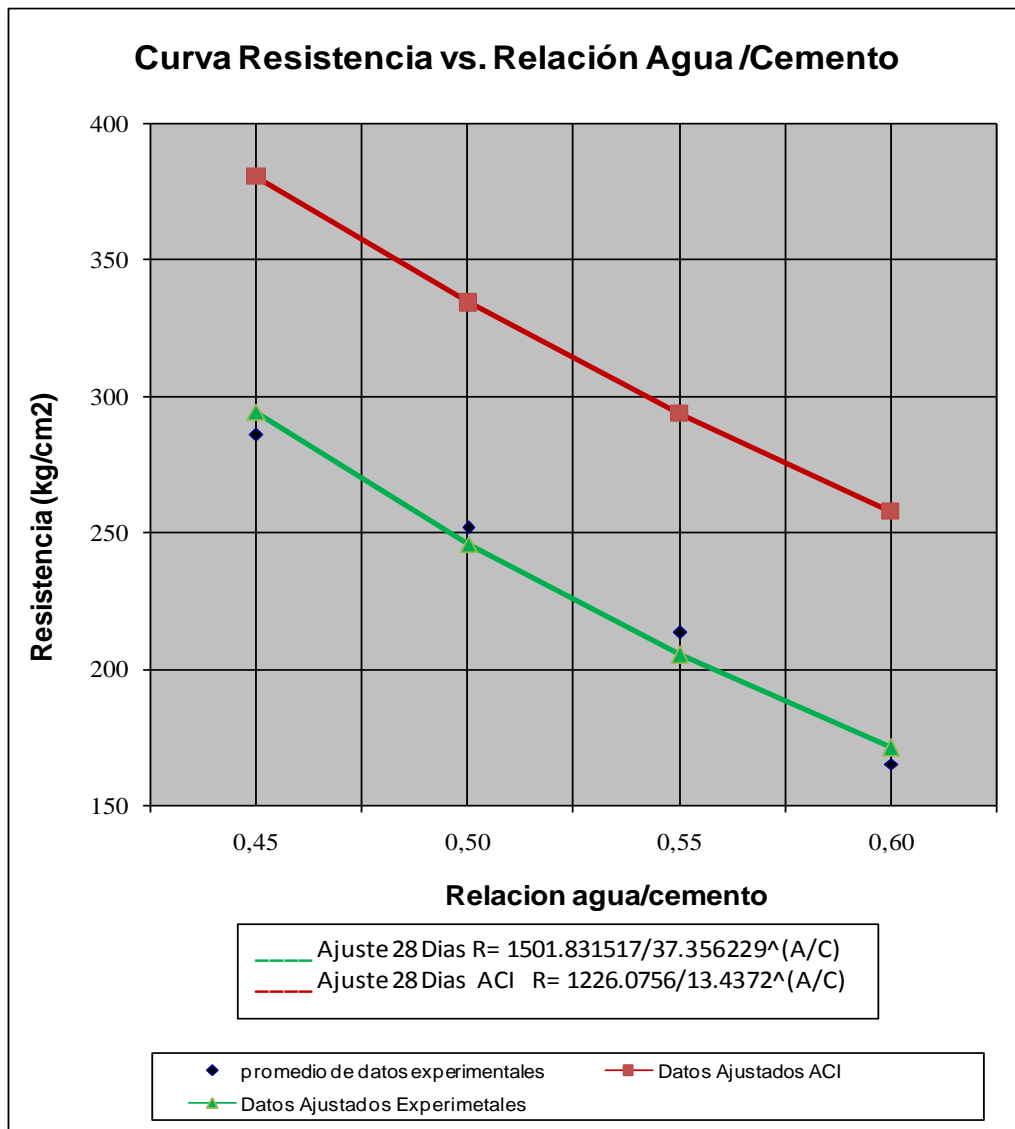


FIGURA 5.4 Ajuste de la curva resistencia vs. Relación agua/cemento para la edad de 28 días.

En la figura 5.4, podemos observar en las curvas de 28 días de edad la diferencia, entre la curva teórica del Método ACI y la curva real obtenida con los agregados del río San Juan del Oro Localidad El Puente, utilizando cemento El Puente, es desfavorable para nuestra curva real que no alcanza la resistencia teórica especificada por el Método ACI. Este defecto se puede atribuir a que las tablas utilizadas por el Método son obtenidas a partir de ensayos con agregados y cemento Portland de EE.UU.

5.6. Validación de la ecuación y curva resistencia-relación agua/cemento

5.6.1. Validación estadística

Una de las formas para determinar la validez de las ecuaciones 5.13 y 5.14. Consiste en realizar pruebas estadísticas (pruebas de hipótesis y análisis de varianza).

Dos pruebas estadísticas muy usadas en trabajos de investigación para los que se realizan mediciones son la **prueba t** y la **prueba F**.

5.6.1.1. Prueba de hipótesis (prueba t)

Sea,

$$y = a + b \cdot x$$

La ecuación de ajuste por mínimos cuadrados.

Varianza:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-2} * (y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n} - b^2 * \sum (x - X)^2) \quad (5.16)$$

Donde:

σ^2 = varianza

n = número de datos

y = logaritmo de la resistencia

* Para ver si el valor de la pendiente (b) es consistente se plantea las siguientes hipótesis:

Hipótesis nula $b = 0$

Hipótesis alternativa $b < 0$

El estadístico de prueba t se calcula mediante la ecuación:

$$t_b = \frac{(b - b_0)}{\sqrt{\frac{\sigma^2}{\sum (x - \bar{x})^2}}} \quad (5.17)$$

Donde:

b = valor de la pendiente (b) de la ecuación de regresión.

b_0 = pendiente a ser probada

σ^2 = varianza de (b)

El valor de t calculado es comparado con el valor de tabla 3.2 Capítulo 3.

* Para ver si la constante (a) es consistente, se plantea la siguiente hipótesis:

Hipótesis nula $a = 0$

Hipótesis alternativa $a > 0$

El estadístico de prueba t se calcula mediante la ecuación:

$$t_a = \frac{(a - a_0)}{\sqrt{\sigma^2 * \left(\frac{1}{n} + \frac{X^2}{\sum (x - X)^2} \right)}} \quad (5.18)$$

Donde:

a = valor de la constante (a) de la ecuación de regresión.

a_0 = valor hipotético de (a)

σ^2 = varianza de (a)

Prueba de hipótesis para la curva 7 días

Relación a/c= x	Resistencia Promedio	Resistencia Ajustada	(x-X) ²	y = log R	y ²
0,45	185,61	190,07	0,005625	2,268601371	5,146552179
0,50	162,44	159,39	0,000625	2,210692981	4,887163455
0,55	138,18	133,65	0,000625	2,140445188	4,581505604
0,60	108,92	112,07	0,005625	2,037107633	4,149807507
0,525			0,012500	8,65684717	18,76502875

* Para ver si el valor de la pendiente (b) es consistente se plantea las siguientes hipótesis:

Hipótesis nula $b = 0$

Hipótesis alternativa $b < 0$

$$b = 0$$

$$b_0 = -1,52946$$

Con la ecuación (5.16) se calcula:

$$\sigma^2 = 0.000269$$

Con la ecuación (5.17) se calcula:

$$t_b = -10.4310$$

Haciendo uso de las tablas de distribución t student con un nivel de significancia de 1% se rechaza la hipótesis nula, aceptando la hipótesis alternativa.

$$t_{\text{tabla}} = - 6.96$$

$$t_b \lll t_{\text{tabla}}$$

Por lo que no hay evidencia de rechazar la hipótesis alternativa, de donde se demuestra que el modelo es estadísticamente significativo.

* Para ver si la constante (a) es consistente, se plantea la siguiente hipótesis:

Hipótesis nula $a = 0$

Hipótesis alternativa $a > 0$

$$a = 0$$

$$a_0 = 2.96718$$

Con la ecuación (5.16) se calcula:

$$\sigma^2 = 0.000269$$

Con la ecuación (5.18) se calcula:

$$t_a = 38.328731$$

Haciendo uso de las tablas de distribución t student con un nivel de significancia de 1% se rechaza la hipótesis nula, aceptando la hipótesis alternativa.

$$t_{\text{tabla}} = 6.96$$

$$t_a \ggg t_{\text{tabla}}$$

Por lo que no hay evidencia de rechazar la hipótesis alternativa, de donde se demuestra que el modelo es estadísticamente significativo.

Prueba de hipótesis para la curva 28 días

Relación $a/c=x$	Resistencia Promedio	Resistencia Ajustada	$(x-X)^2$	$y = \log R$	y^2
0,45	285,75	294,48	0,005625	2,455989701	6,031885411
0,50	251,97	245,72	0,000625	2,401351410	5,766488596
0,55	213,40	205,03	0,000625	2,329202575	5,425184634
0,60	165,19	171,08	0,005625	2,217978808	4,919429992
0,525			0,012500	9,40452249	22,14298863

* Para ver si el valor de la pendiente (b) es consistente se plantea las siguientes hipótesis:

Hipótesis nula $b = 0$

Hipótesis alternativa $b < 0$

$$b = 0$$

$$b_0 = -1.57236$$

Con la ecuación 5.16, se calcula:

$$\sigma^2 = 0.000412$$

Con la ecuación 5.17. se calcula:

$$t_b = -8.662242$$

Haciendo uso de las tablas de distribución t student con un nivel de significancia de 1% se rechaza la hipótesis nula, aceptando la hipótesis alternativa.

$$t_{\text{tabla}} = -6.96$$

$$t_b \ll t_{\text{tabla}}$$

Por lo que no hay evidencia de rechazar la hipótesis alternativa, de donde se demuestra que el modelo es estadísticamente significativo.

* Para ver si la constante (a) es consistente, se plantea la siguiente hipótesis:

$$\text{Hipótesis nula} \quad a = 0$$

$$\text{Hipótesis alternativa} \quad a > 0$$

$$a = 0$$

$$a_0 = 3.17662$$

Con la ecuación 5.16, se calcula:

$$\sigma^2 = 0.000412$$

Con la ecuación 5.18, se calcula:

$$t_a = 33.146334$$

Haciendo uso de las tablas de distribución t student con un nivel de significancia de 1% se rechaza la hipótesis nula, aceptando la hipótesis alternativa.

$$t_{\text{tabla}} = 6.96$$

$$t_a \gg t_{\text{tabla}}$$

Por lo que no hay evidencia de rechazar la hipótesis alternativa, de donde se demuestra que el modelo es estadísticamente significativo.

5.7.1.2. Análisis de varianza (prueba F)

Sea:

$$y = a + b \cdot x$$

La ecuación de ajuste por mínimos cuadrados par n pares de datos

Con los resultados de regresión se calculan los siguientes valores:

Variación explicada $VE = a \cdot \sum y_i + b \cdot \sum x_i y_i - (\sum y_i)^2 / n$

Variación no explicada $VNE = \sum y_i^2 - a \sum y_i - b \sum x_i y_i$

Variación total $VT = VE + VNE$

Media de la suma de cuadrados MS para VE $MSVE = VE / \text{grados libertad}$

Media de la suma de cuadrados MS para YNE $MSVNE = VNE / \text{grados libertad}$

El estadístico de prueba de varianza es:

$$F = (MSVE) / (MSVNE) \quad (5.19)$$

Luego, el valor de F se compara con el valor del estadístico de la tabla de distribución Fisher.

Análisis de varianza (prueba F) (curva 7 días)

Para nuestro caso:

$$y = 2.96718 - 1.52946 \cdot x$$

Donde,

$$a = 2.96718$$

$$b = -1.52946$$

De la Tabla 5.5 se Obtienen los siguientes datos:

$$\sum y_i = 8.65685$$

$$\sum x_i y_i = 4.52573$$

$$\sum y_i^2 = 18.76503$$

$$n = 4$$

$$VE = 2.96718 * 8.65685 + (-1.52946) * 4.52573 - (8.65685)^2 / 4$$

$$VE = 0.0292405$$

$$VNE = 18.76503 - 2.96718 * 8.65685 - (-1.52946) * 4.52573$$

$$VNE = 0.0005375$$

$$VT = 0.0292405 + 0.0005375$$

$$VT = 0.0297780$$

$$MSVE = 0.0292405 / 1$$

$$MSVE = 0.0292405$$

$$MSVENE = 0.0005375 / 2$$

$$MSEVNE = 0.00026874$$

Remplazando en (5.19)

$$F = 0.0292405 / 0.00026874$$

$$\mathbf{F = 108.8057}$$

Haciendo uso de las tablas de distribución de Fisher, con un nivel de significancia del 1% se obtiene:

$$F_{\text{tabla}} = 98.5$$

$$F \ggg F_{\text{tabla}}$$

Como del "F" calculado es mayor al obtenido en tabla, se rechaza al nivel de 1 %, por no existir falta de ajuste.

Por lo que se demuestra que el modelo es estadísticamente significativo.

Análisis de varianza (prueba F) (curva 28 días)

Para nuestro caso:

$$y = 3.17662 - 1.57236*x$$

Donde,

$$a = 3.17662$$

$$b = -1.57236$$

De la Tabla 5.7 se Obtienen los siguientes datos:

$$\sum y_i = 9.40452$$

$$\sum x_i * y_i = 4.91772$$

$$\sum y_i^2 = 22.14299$$

$$n = 4$$

$$VE = 3.17662*9.40452 + (-1.57236)* 4.91772 - (9.40452)^2/4$$

$$VE = 0.030904$$

$$VNE = 22.14299 - 3.17662 * 9.40452 - (-1.57236) * 4.91772$$

$$VNE = 0.0008237$$

$$VT = 0.030904 + 0.0008237$$

$$VT = 0.0317278$$

$$MSVE = 0.030904 / 1$$

$$MSVE = 0.030904$$

$$MSVENE = 0.0008237 / 3$$

$$MSEVNE = 0.0002746$$

Remplazando en (5.19)

$$F = 0.030904 / 0.0002746$$

$$\mathbf{F = 112.55167}$$

Haciendo uso de las tablas de distribución de Fisher, con un nivel de significancia del 1% se obtiene:

$$F_{\text{tabla}} = 98.5$$

$F \gg F_{\text{tabla}}$ de donde se demuestra que el modelo es estadísticamente significativo.

Como del "F" calculado es mayor al obtenido en tabla, se rechaza al nivel de 1 %, por no existir falta de ajuste.

Por lo que se demuestra que el modelo es estadísticamente significativo.

5.6.1.3. Resultados

Resultados de la validación estadística de la ecuación y curva resistencia-relación agua/cemento (7 días).

- Coeficiente de correlación,

$$r = 0.99093 \quad (\text{próximo a la unidad})$$

- Pruebas t y F ,

$$T(k_1) = t_a = 38.3287 \quad (\text{satisfactorio})$$

$$T(k_2) = t_b = -10.4310 \quad (\text{satisfactorio})$$

$$F = 108.8057 \quad (\text{satisfactorio})$$

Resultados de la validación estadística de la ecuación y curva resistencia-relación agua/cemento (28 días).

- Coeficiente de correlación,

$$r = 0.98693 \quad (\text{próximo a la unidad})$$

- Pruebas t y F ,

$$T(k_1) = t_a = 33.14633 \quad (\text{satisfactorio})$$

$$T(k_2) = t_b = -8.662242 \quad (\text{satisfactorio})$$

$$F = 112.55167 \quad (\text{satisfactorio})$$

De esta manera se han cumplido los tres requisitos que validan estadísticamente la ecuación resistencia- relación agua/cemento.

Estos son:

- Coeficiente de correlación alto (próximo a la unidad),
- Prueba **t student**.
- Prueba **F Fisher**.

5.6.2. Validación práctica

Para verificar la validez práctica de la ecuación 5.14, y curva resistencia-relación agua/cemento figura 5.4 para 28 días, se dosificaron hormigones con resistencias características f_{ck} (de proyecto) de 160 kg/cm² (16.0 MPa) TIPO C y 210 kg/cm² (21 MPa) TIPO A

.

5.6.2.1. Límites de control

En la industria masiva de manufacturados (producción industrial) para el control de sus productos, evidentemente debe existir un límite superior como inferior. En cambio, en la producción del concreto un límite superior carece (le sentido técnico, así un concreto de elevada resistencia no sólo sirve sino que es favorable a la estructura pero tendrá sentido un límite superior si se considera el aspecto económico, ya que se puede disminuir la cantidad de cemento y conseguirse un ahorro considerable.

Por otro lado, el límite inferior o resistencia mínima tampoco es rígido puesto que al realizar los ensayos existe una dispersión natural así, sería injusto atribuir a la calidad del concreto y por otra, un resultado bajo no afectaría a toda una estructura; por tanto, se ha establecido en forma general que si 10% de los resultados son inferiores al mínimo esto será admisible siempre y cuando no sean continuados.

En otras palabras, se deberá proyectar el concreto para una resistencia tal que considerando la importancia de la estructura y otros factores, los resultados den una cantidad suficiente para cubrir este riesgo. Sobre este aspecto existen varios criterios bien marcados para esta resistencia.

5.7.2.2. Criterios para los requerimientos de resistencia de diseño de mezcla

La cantidad en la cual la resistencia promedio f_{cm} de diseño de la mezcla de concreto debe exceder de la resistencia especificada f_{ck} depende de los criterios que se utilicen en las especificaciones de un proyecto en particular.

El concreto debe diseñarse y producirse para asegurar una resistencia a compresión promedio f_{cm} lo suficiente alta para minimizar la frecuencia de resultados de pruebas de resistencia por debajo del valor de la resistencia a la compresión especificada del concreto f_{ck} . La resistencia a compresión promedio o resistencia de diseño de mezclas se calcula por medio de la siguiente expresión.

$$f_{cm} = f_{ck} + t \cdot \sigma \quad (5.20)$$

Donde:

f_{cm} = Promedio requerido de resistencia o resistencia de diseño o resistencia media de la mezcla kg/cm^2 .

f_{ck} = Resistencia especificada del hormigón o resistencia característica kg/cm^2 .

t = Constante que depende de la proporción de pruebas que puede caer por debajo del valor de f_{ck} y el número de muestras usadas para hallar el valor de σ ; preferiblemente, al menos 30 muestras deben ser usadas (tabla 5.9).

σ = Valor preestimado de la desviación estándar en kg/cm^2 .

Tabla 5.9. Valores de t para diferentes probabilidades de que pruebas individuales de resistencia caigan por debajo de f_{ck}

Porcentaje de pruebas que caen dentro de los límites $x + t \cdot \sigma$	Probabilidad de que caigan por debajo del límite inferior	Valor de t
40	3 en 10	0.52
50	2.5 en 10	0.67
60	2 en 10	0.84
68.27	1 en 6.3	1.00
70	1 en 10	1.04
80	1.5 en 10	1.28
90	1 en 20	1.65
95	1 en 40	1.96
95.45	1 en 44	2.00
98	1 en 100	2.33
99	1 en 200	2.58
99.73	1 en 741	3.00

Fuente: "Práctica Recomendable para la Evaluación de los Resultados de Pruebas de Resistencia ACI 214", Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.

Uno de estos criterios, es el propuesto por el código ACI - 318 que plantea las siguientes condiciones:

a) La probabilidad de obtener resultados de pruebas por debajo de $f_{ck} - 35 \text{ kg/cm}^2$ no debe exceder de 1 en 100.

b) La probabilidad de que el promedio de tres pruebas consecutivas sea inferior a f_{ck} no debe exceder de 1 en 100.

De tal manera, que aplicando estas condiciones a las fórmulas planteadas, resulta lo siguiente: "La resistencia promedio requerida f_{cm} en kg/cm^2 que se

utiliza para diseñar una mezcla de hormigón debe ser la mayor de las obtenidas con las siguientes ecuaciones, utilizando la desviación estándar":

$$f_{cm} = f_{ck} - 35 + (2.33\sigma) \quad (5.21)$$

$$f_{cm} = f_{ck} + \frac{2.33\sigma}{\sqrt{3}} = f_{ck} + (1.34\sigma) \quad (5.22)$$

Donde los valores están en kg/cm^2 . Cuando la desviación estándar está por debajo de cerca de 35 kg/cm^2 la ecuación 5.20 gobierna; pero para desviaciones estándar más altas, la ecuación 5.21 es la que determina el valor de f_{cm} .

Pero, la resistencia de diseño de la mezcla hallada por medio de estas expresiones sólo puede ser empleada cuando existen suficientes datos disponibles (al menos 30 pruebas). Sin embargo, si se tienen más de 15 registros pero menos de 30, la desviación estándar empleada en las fórmulas debe ser la desviación estándar calculada de los datos, multiplicada por el coeficiente de modificación indicado en la tabla 5.10.

**TABLA 5.10. Coeficientes de modificación para la desviación standard
Cuando hay menos de 30 pruebas.**

Número de pruebas	Coeficiente de modificación
15	1.16
20	1.08
25	1.03
30 o más	1.00

Fuente: Reglamento ACI 318 (CCCSR-Decreto 1400) (11.4, 11.9)

Por último, si no hay registros de pruebas de resistencia en donde se usaron materiales y condiciones similares aquellas que serán empleadas, la resistencia de diseño de la mezcla f_{cm} en kg/cm^2 se debe determinar de acuerdo a la tabla 5.11.

TABLA 5.11. Resistencia de diseño de mezcla para diferentes resistencias características cuando no se tienen datos disponibles

Resistencia específica f_{ck} en kg/cm^2	Resistencia de diseño de la mezcla f_{cm} en kg/cm^2
Menos de 211 kg/cm^2	$f_{ck} + 70 \text{ kg/cm}^2$
De 211 a 352 kg/cm^2	$f_{ck} + 84 \text{ kg/cm}^2$
Más de 352 kg/cm^2	$f_{ck} + 98 \text{ kg/cm}^2$

Fuente: Reglamento ACI 318-83

5.6.2.3. Determinación de la resistencia de diseño de mezclas

Como para la investigación no se dispone de información previa que permita establecer estadísticamente una relación entre f_{ck} y la resistencia media f_{cm} , entonces se utilizará la tabla 5.11 para definir las resistencias de diseño de mezclas, consecuentemente, para las resistencias características f_{ck} de:

TIPO C $f_{ck} = 160 \text{ kg/cm}^2$

TIPO A $f_{ck} = 210 \text{ kg/cm}^2$

Las resistencias medias correspondientes son:

TIPO C

$$f_{cm} = 160 \text{ kg/cm}^2 + 70 \text{ kg/cm}^2 \quad \mathbf{f_{cm} = 230 \text{ kg/cm}^2}$$

TIPO A

$$f_{cm} = 210 \text{ kg/cm}^2 + 70 \text{ kg/cm}^2 \quad \mathbf{f_{cm} = 280 \text{ kg/cm}^2}$$

5.6.2.4. Dosificación de mezclas de Hormigón

La validación práctica de la ecuación y curva resistencia - relación agua/cemento consiste en dosificar hormigones para:

TIPO C

$$f_{cm} = 230 \text{ kg/cm}^2$$

TIPO A

$$f_{cm} = 280 \text{ kg/cm}^2$$

Las cuales son resistencias medias o llamadas también resistencias de mezcla, para obtener su respectiva relación agua/cemento, se utilizó la ecuación 5.14. y su respectiva curva, resistencia-relación agua/cemento.

Para tal cometido se realizaron mezclas de prueba, para obtener la cantidad de agua para un revenimiento de 6 cm, y se estableció las dosificaciones finales V-1 y V -2.

En las tablas 5.12.a. y 5.12.b. se muestran las cantidades de los componentes necesarios para la elaboración de 1 m³ de concreto.

DOSIFICACIÓN DE HORMIGÓN NORMAL - ACI 211.1
HORMIGON TIPO C

$$f_{cm} = 230 \text{ kg/cm}^2$$

Dosificación V-1

Relación agua/cemento : A/C = 0,518

MATERIALES

Agregado Grueso : Río San Juan del Oro
Agregado fino : Río San Juan del Oro
Cemento : El Puente IP 30

CARACTERÍSTICAS

Datos:

Peso específico cemento	3030,00	kg/m ³	Absorción A.G.	1,010	%
Peso específico a granel A. G.	2,580	g/cm ³	Absorción A.F.	1,422	%
Peso específico a granel A. F.	2,637	g/cm ³	Humedad A.G.	0,340	%
Peso unitario compactado A. G.	1,702	g/cm ³	Humedad A.F.	1,060	%
Peso unitario compactado A. F.	1,720	g/cm ³	Pérdidas	10	%
Módulo de finura A.G.	7,250				
Módulo de finura A.F.	2,610				

Cálculos :

Asentamiento (Adoptado)	6.0 ± 1	cm	Relación A/C	0,518	
Tamaño máx. A.G. (Granulometría)	38,100	mm	Cantidad de cemento	321,754	kg
Cantidad de agua (Grafica 4,1)	166,765	kg/m ³	Cantidad A.G. (Tabla 2,14)	0,730	m ³
Contenido de aire (pruebas Lab.)	1	%	Cantidad A.G.	1242,460	kg

Cantidad de agregado fino sobre la base del volumen absoluto

Volumen de agua	0,167	m ³
Volumen absoluto cemento	0,106	m ³
Volumen absoluto de A.G.	0,482	m ³
Volumen aire atrapado	0,010	m ³
Volumen parcial	0,765	m ³
Volumen absoluto A.F.	0,235	m ³
Peso A.F.	620,949	kg

TABLA 5.12.a Componentes en kg/m³ de Hormigón Dosificación V-1 A/C = 0,518

Componentes	Con base en volumen absoluto kg/m ³ _{H^o}	Unidad
Agua	166,765	lts
Cemento	321,754	kg
Agregado Grueso (seco)	1242,460	kg
Agregado Fino (seco)	620,949	kg

DOSIFICACIÓN DE HORMIGÓN NORMAL - ACI 211.1
HORMIGON TIPO A

$$f_{cm} = 280 \text{ kg/cm}^2$$

Dosificación V-2

Relación agua/cemento : A/C = 0.464

MATERIALES

Agregado Grueso : Río San Juan del Oro
Agregado fino : Río San Juan del Oro
Cemento : El Puente IP 30

CARACTERÍSTICAS

Datos:

Peso específico cemento	3030,00	kg/m ³	Absorción A.G.	1,010	%
Peso específico a granel A. G.	2,580	g/cm ³	Absorción A.F.	1,422	%
Peso específico a granel A. F.	2,637	g/cm ³	Humedad A.G.	0,370	%
Peso unitario compactado A. G.	1,702	g/cm ³	Humedad A.F.	1,100	%
Peso unitario compactado A. F.	1,720	g/cm ³	Pérdidas	10	%
Módulo de finura A.G.	7,250				
Módulo de finura A.F.	2,610				

Cálculos :

Asentamiento (Adoptado)	6.0 ± 1	cm	Relación A/C	0,464	
Tamaño máx. A.G. (Granulometria)	38,100	mm	Cantidad de cemento	357,795	kg
Cantidad de agua (Grafica 4,1)	166,017	kg/m ³	Cantidad A.G. (Tabla2,14)	0,730	m ³
Contenido de aire (pruebas Lab.)	1	%	Cantidad A.G.	1242,460	kg

Cantidad de agregado fino sobre la base del volumen absoluto

Volumen de agua	0,166	m ³
Volumen absoluto cemento	0,118	m ³
Volumen absoluto de A.G.	0,482	m ³
Volumen aire atrapado	0,010	m ³
Volumen parcial	0,776	m ³
Volumen absoluto A.F.	0,224	m ³
Peso A.F.	591,555	kg

TABLA 5.12.b Componentes en kg/m³ de Hormigón Dosificación V-2 A/C = 0,464

Componentes	Con base en volumen absoluto kg/m ³ _{H^o}	Unidad
Agua	166,017	lts
Cemento	357,795	kg
Agregado Grueso (seco)	1242,460	kg
Agregado Fino (seco)	591,555	kg



TABLA 5.13. Ajustes por el contenido de humedad de los agregados
Verificación curva Resistencia - Relación agua/cemento

Cantidad por m ³ de Hormigón - Docificación ACI																					
Dosif.	A/C	Agua de mezclado kg.	Cemento		A. Fino		A. Grueso		Humedad		A. Grueso		Agua Absorvida		Agua						
			kg.	kg.	Seco	kg.	Seco	kg.	A.F.	%	A.G.	%	Humedo	kg.	A.F.	kg.	A.G.	kg.	Añadida	kg.	
V-1	0,518	166,765	321,754	620,949	1242,460	1,06	0,34	1246,684	2,245	8,326	177,336	1247,057	1,902	7,953	175,873						
V-2	0,464	166,017	357,795	591,555	1242,460	1,1	0,37														
Absorción del agregado fino				1,422 %																	
Absorción del agregado grueso				1,010 %																	

TABLA 5.14 Revoltura para 5 probetas con una pérdida de 10 %

Dosif.	A/C	Agua Añadida kg.	Cemento kg.	A. Fino		A. Grueso	
				Húmedo	kg.	Húmedo	kg.
D-1	0,518	5,171	9,382	18,298	36,351		
D-2	0,464	5,128	10,433	17,438	36,362		

VR = 0,0292 m³

En las tablas 5.15.a., 5.15.b. y 5.15.c. se resume los aspectos sobresalientes de las dosificaciones y se presentan las cantidades finales de los componentes necesarios para producir 1 m³ de concreto. En la tabla 5.15.c, se presentan las cantidades corregidas por humedad y absorción de los agregados, se puede observar el incremento en el peso de los agregados de la tabla 5.15.b., igual al porcentaje de agua que contienen y también el incremento en la cantidad de agua debido a que los agregados presentan un estado de humedad menor que el estado saturado y superficialmente seco.

**TABLA 5.15.a. Verificación curva resistencia-relación agua/cemento
resistencia y selección de relación agua/cemento**

Dosif.	Resistencia Característica f_{ck} (kg/cm ²)	Mayoración kg/cm ²	Resistencia Característica f_{cm} (kg/cm ²)	Relación agua/cemento A/C*
V-1	160,000	70,000	230,000	0,518
V-2	210,00	70,000	280,000	0,464

* Valores han sido obtenidos de la curva resistencia-relación agua/cemento

**TABLA 5.15.b. Verificación curva resistencia - relación agua/cemento
cantidades por m³ de hormigón (Agregados Secos)**

Dosif.	A/C	Cemento kg.	A.F. Seco kg.	A.G. Seco kg.	Agua de Mezclado litros
V-1	0,518	321,754	620.949	1242.46	166,765
V-2	0,464	357,795	591.555	1242.46	166,017

TABLA 5.15.c. Verificación curva resistencia - relación agua/cemento cantidades por m³ de hormigón (Agregados Húmedos)

Dosif.	Humedad (%)		Cemento kg.	A. F. Húmedo kg.	A. G. Húmedo kg.	Agua Añadida litros	Proporciones en Peso *
	A. F.	A. G.					
V-1	1,07	0,35	321,754	627,532	1246,684	177,336	1 : 1.950 : 3.875 / 0.551
V-2	1,10	0,37	357,795	598,062	1247,057	175,873	1 : 1.672 : 3.485 / 0.492

* El orden es, Cemento: Agregado Fino : Agregado Grueso / Relación a/c que se debe añadir a la mezcla considerando la humedad de los agregados.

La fabricación de las probetas para la verificación de la curva resistencia relación agua/cemento se ha realizado con los valores de la tabla 5.15.c. El proceso de fabricación, curado y rotura de probetas ha sido efectuado con el mismo procedimiento seguido para la elaboración de la curva.

5.6.2.5. Datos experimentales de las pruebas de resistencia

En las tablas 5.16.a. y 5.16.b. se presentan los datos experimentales de las pruebas de resistencia de las probetas dosificadas para la validación de la curva resistencia-relación agua/cemento también se muestran en los anexos 16 y 17.

**TABLA 5.16.a Resistencia a compresión de probetas de hormigón
a los 28 días**

Resistencia característica $f_{ck} = 160 \text{ kg/cm}^2$ (Nº1)							
Resistencia media de diseño de mezcla $f_{cm} = 230 \text{ kg/cm}^2$							
Prob. Nº	Asent. cm.	Fecha de Vaciado	Fecha de Rotura	Edad días	Sección cm^2	Carga kg	Resistencia kg/cm^2
N-1-R0,518	6 ±1	09/02/2015	09/03/2015	28	176,71	41203,26	233,17
N-2-R0,518	6 ±1	09/02/2015	09/03/2015	28	176,71	41101,37	232,59
N-3-R0,518	6 ±1	09/02/2015	09/03/2015	28	176,71	41213,95	233,23
N-4-R0,518	6 ±1	09/02/2015	09/03/2015	28	176,71	41156,77	232,91
N-5-R0,518	6 ±1	09/02/2015	09/03/2015	28	176,71	40125,64	227,07
N-6-R0,518	6 ±1	10/02/2015	10/03/2015	28	176,71	40158,29	227,26
N-7-R0,518	6 ±1	10/02/2015	10/03/2015	28	176,71	40148,65	227,20
N-8-R0,518	6 ±1	10/02/2015	10/03/2015	28	176,71	40140,19	227,15
N-9-R0,518	6 ±1	10/02/2015	10/03/2015	28	176,71	40135,54	227,13
N-10-R0,518	6 ±1	10/02/2015	10/03/2015	28	176,71	40185,63	227,41
N-11-R0,518	6 ±1	12/02/2015	12/03/2015	28	176,71	40110,14	226,98
N-12-R0,518	6 ±1	12/02/2015	12/03/2015	28	176,71	40002,96	226,38
N-13-R0,518	6 ±1	12/02/2015	12/03/2015	28	176,71	40120,72	227,04
N-14-R0,518	6 ±1	12/02/2015	12/03/2015	28	176,71	40098,79	226,92
N-15-R0,518	6 ±1	12/02/2015	12/03/2015	28	176,71	40058,56	226,69
N-16-R0,518	6 ±1	14/02/2015	14/03/2015	28	176,71	41010,39	232,08
N-17-R0,518	6 ±1	14/02/2015	14/03/2015	28	176,71	41109,14	232,64
N-18-R0,518	6 ±1	14/02/2015	14/03/2015	28	176,71	41179,05	233,03
N-19-R0,518	6 ±1	14/02/2015	14/03/2015	28	176,71	41189,23	233,09
N-20-R0,518	6 ±1	14/02/2015	14/03/2015	28	176,71	41220,65	233,27
N-21-R0,518	6 ±1	16/02/2015	16/03/2015	28	176,71	40185,34	227,41
N-22-R0,518	6 ±1	16/02/2015	16/03/2015	28	176,71	40152,01	227,22
N-23-R0,518	6 ±1	16/02/2015	16/03/2015	28	176,71	40100,79	226,93
N-24-R0,518	6 ±1	16/02/2015	16/03/2015	28	176,71	40225,41	227,64
N-25-R0,518	6 ±1	16/02/2015	16/03/2015	28	176,71	40262,29	227,84
N-26-R0,518	6 ±1	18/02/2015	18/03/2015	28	176,71	41100,25	232,59
N-27-R0,518	6 ±1	18/02/2015	18/03/2015	28	176,71	41265,78	233,52
N-28-R0,518	6 ±1	18/02/2015	18/03/2015	28	176,71	41113,34	232,66
N-29-R0,518	6 ±1	18/02/2015	18/03/2015	28	176,71	41142,18	232,82
N-30-R0,518	6 ±1	18/02/2015	18/03/2015	28	176,71	41112,34	232,65

**TABLA 5.16.b. Resistencia a compresión de probetas de hormigón
a los 28 días**

Resistencia característica $f_{ck} = 210 \text{ kg/cm}^2$ (Nº2)							
Resistencia media de diseño de mezcla $f_{cm} = 280 \text{ kg/cm}^2$							
Prob. Nº	Asent. cm.	Fecha de Vaciado	Fecha de Rotura	Edad días	Sección cm ²	Carga kg	Resistencia kg/cm ²
N-1-R0,464	6 ±1	23/02/2015	23/03/2015	28	176,71	49125,25	278,00
N-2-R0,464	6 ±1	23/02/2015	23/03/2015	28	176,71	49001,36	277,30
N-3-R0,464	6 ±1	23/02/2015	23/03/2015	28	176,71	49113,95	277,94
N-4-R0,464	6 ±1	23/02/2015	23/03/2015	28	176,71	49009,65	277,35
N-5-R0,464	6 ±1	23/02/2015	23/03/2015	28	176,71	49095,69	277,83
N-6-R0,464	6 ±1	24/02/2015	24/03/2015	28	176,71	48758,65	275,92
N-7-R0,464	6 ±1	24/02/2015	24/03/2015	28	176,71	49002,96	277,31
N-8-R0,464	6 ±1	24/02/2015	24/03/2015	28	176,71	48752,13	275,89
N-9-R0,464	6 ±1	24/02/2015	24/03/2015	28	176,71	48958,70	277,06
N-10-R0,464	6 ±1	24/02/2015	24/03/2015	28	176,71	49012,19	277,36
N-11-R0,464	6 ±1	26/02/2015	26/03/2015	28	176,71	49315,62	279,08
N-12-R0,464	6 ±1	26/02/2015	26/03/2015	28	176,71	49562,75	280,48
N-13-R0,464	6 ±1	26/02/2015	26/03/2015	28	176,71	49235,97	278,63
N-14-R0,464	6 ±1	26/02/2015	26/03/2015	28	176,71	49725,98	281,40
N-15-R0,464	6 ±1	26/02/2015	26/03/2015	28	176,71	49195,35	278,40
N-16-R0,464	6 ±1	27/02/2015	27/03/2015	28	176,71	48825,54	276,30
N-17-R0,464	6 ±1	27/02/2015	27/03/2015	28	176,71	48954,74	277,03
N-18-R0,464	6 ±1	27/02/2015	27/03/2015	28	176,71	48796,23	276,14
N-19-R0,464	6 ±1	27/02/2015	27/03/2015	28	176,71	48754,99	275,90
N-20-R0,464	6 ±1	27/02/2015	27/03/2015	28	176,71	49025,73	277,44
N-21-R0,464	6 ±1	03/03/2015	31/03/2015	28	176,71	49265,14	278,79
N-22-R0,464	6 ±1	03/03/2015	31/03/2015	28	176,71	49398,27	279,54
N-23-R0,464	6 ±1	03/03/2015	31/03/2015	28	176,71	49526,24	280,27
N-24-R0,464	6 ±1	03/03/2015	31/03/2015	28	176,71	49356,62	279,31
N-25-R0,464	6 ±1	03/03/2015	31/03/2015	28	176,71	49164,68	278,22
N-26-R0,464	6 ±1	05/03/2015	02/04/2015	28	176,71	49985,06	282,86
N-27-R0,464	6 ±1	05/03/2015	02/04/2015	28	176,71	49856,24	282,14
N-28-R0,464	6 ±1	05/03/2015	02/04/2015	28	176,71	49995,10	282,92
N-29-R0,464	6 ±1	05/03/2015	02/04/2015	28	176,71	50024,29	283,09
N-30-R0,464	6 ±1	05/03/2015	02/04/2015	28	176,71	50098,14	283,50

5.6.2.6. Resultados del análisis de datos experimentales

En las tablas 5.17.a. y 5.17.b. se representan los resultados del control estadístico efectuado a las pruebas de resistencia.

TABLA 5.17.a. Control estadístico de probetas de hormigón a los 28 días resistencia característica $f_{ck} = 160 \text{ kg/cm}^2$

Probetas Nº	Relación A/C	Edad días	Resistencia kg/cm ²	Control Estadístico		
				Promedio	kg/cm ²	229.82
N-1-R0,518	0.518	28	233,17	Desv. Stand.	kg/cm ²	2.93
N-2-R0,518	0.518	28	232,59	Coef. Variación	%	1.28
N-3-R0,518	0.518	28	233,23			
N-4-R0,518	0.518	28	232,91			
N-5-R0,518	0.518	28	227,07			
N-6-R0,518	0.518	28	227,26			
N-7-R0,518	0.518	28	227,20			
N-8-R0,518	0.518	28	227,15			
N-9-R0,518	0.518	28	227,13			
N-10-R0,518	0.518	28	227,41			
N-11-R0,518	0.518	28	226,98			
N-12-R0,518	0.518	28	226,38			
N-13-R0,518	0.518	28	227,04			
N-14-R0,518	0.518	28	226,92			
N-15-R0,518	0.518	28	226,69			
N-16-R0,518	0.518	28	232,08			
N-17-R0,518	0.518	28	232,64			
N-18-R0,518	0.518	28	233,03			
N-19-R0,518	0.518	28	233,09			
N-20-R0,518	0.518	28	233,27			
N-21-R0,518	0.518	28	227,41			
N-22-R0,518	0.518	28	227,22			
N-23-R0,518	0.518	28	226,93			
N-24-R0,518	0.518	28	227,64			
N-25-R0,518	0.518	28	227,84			
N-26-R0,518	0.518	28	232,59			
N-27-R0,518	0.518	28	233,52			
N-28-R0,518	0.518	28	232,66			
N-29-R0,518	0.518	28	232,82			
N-30-R0,518	0.518	28	232,65			

TABLA 5.17.b. Control estadístico de probetas de hormigón a los 28 días Resistencia característica $f_{ck} = 210 \text{ kg/cm}^2$

Probetas Nº	Relación A/C	Edad días	Resistencia kg/cm ²	Control Estadístico		
N-1-R0,464	0.464	28	278,00	Promedio	kg/cm ²	278.78
N-2-R0,464	0.464	28	277,30	Desv. Stand.	kg/cm ²	2.32
N-3-R0,464	0.464	28	277,94	Coef. Variación	%	0.83
N-4-R0,464	0.464	28	277,35			
N-5-R0,464	0.464	28	277,83			
N-6-R0,464	0.464	28	275,92			
N-7-R0,464	0.464	28	277,31			
N-8-R0,464	0.464	28	275,89			
N-9-R0,464	0.464	28	277,06			
N-10-R0,464	0.464	28	277,36			
N-11-R0,464	0.464	28	279,08			
N-12-R0,464	0.464	28	280,48			
N-13-R0,464	0.464	28	278,63			
N-14-R0,464	0.464	28	281,40			
N-15-R0,464	0.464	28	278,40			
N-16-R0,464	0.464	28	276,30			
N-17-R0,464	0.464	28	277,03			
N-18-R0,464	0.464	28	276,14			
N-19-R0,464	0.464	28	275,90			
N-20-R0,464	0.464	28	277,44			
N-21-R0,464	0.464	28	278,79			
N-22-R0,464	0.464	28	279,54			
N-23-R0,464	0.464	28	280,27			
N-24-R0,464	0.464	28	279,31			
N-25-R0,464	0.464	28	278,22			
N-26-R0,464	0.464	28	282,86			
N-27-R0,464	0.464	28	282,14			
N-28-R0,464	0.464	28	282,92			
N-29-R0,464	0.464	28	283,09			
N-30-R0,464	0.464	28	283,50			

Ningún cilindro es considerado sospechoso al no existir una variación mayor a $\pm 2 \sigma$

Respecto a la resistencia promedio. Las desviaciones Standard de cada lote son menores 15 kg/cm^2 que corresponde a un rango de control excelente.

TABLA 5.18. Resultado del análisis estadístico probetas para elaboración Curva resistencia – relación agua/cemento

Dosif.	A/C	Nº Prob.	Edad días	R. Prom. kg./cm^2	Desv. Stad. kg./cm^2	Coef. Var. %	Intervalo
V-1	0.518	30	28	229.82	2.93	1.28	226.38 – 233.52
V-2	0.464	30	28	278.78	2.32	0.83	275.89 – 283.50

Los resultados del análisis de datos de las pruebas de resistencias obtenidas han sido aproximadamente iguales a los previstos, lo que evidentemente valida, desde un punto de vista práctico, la ecuación y curva resistencia-relación agua/cemento.

5.7. Evolución de la resistencia a compresión del hormigón a tempranas edades

En la mayoría de los casos las pruebas de resistencia se hacen a la edad de 28 días debido fundamentalmente que a partir de esta edad el concreto aumenta de resistencia no en forma significativa, y este aumento es considerado más bien como un factor de seguridad de la estructura.

Sin embargo, la resistencia a edades tempranas desde 1 hasta los 28 días de edad sí es importante y está influenciado por diversos factores tales como: las propiedades de cemento, la relación agua/cemento, la temperatura, la humedad, los aditivos, etc., por ello es muy difícil predecir la resistencia a los 28 días a partir de una medición efectuada a los 7 días.

Las mezclas con baja relación agua/cemento ganan resistencia, expresada como un porcentaje de su resistencia a largo plazo, con más rapidez que las que tienen una alta relación agua/cemento. Eso sucede porque en el primer caso los granos de cemento están más cerca unos de otros y se establece con mayor rapidez un sistema continuo de gel.

El alcance de la presente investigación no es estudiar la influencia de la edad en la resistencia del hormigón; sin embargo, el autor ha visto importante considerarlo pero en forma particular, y para ello se ha dosificado hormigones para una resistencia característica de 210 kg/cm² Tipo A y 160 kg/cm² Tipo C.

Se utilizó la misma dosificación de la verificación para $f_{ck} = 210 \text{ kg/cm}^2$, con $f_{cm} = 280 \text{ kg/cm}^2$ y $f_{ck} = 160 \text{ kg/cm}^2$, con $f_{cm} = 230 \text{ kg/cm}^2$ (tabla 5.15.c dosificaciones V-1 y V-2), se elaboraron 9 probetas: 3 para 7 días, 3 para 14 días y 3 para 28 días, los resultados de las roturas Anexo 18 y 19 como también se muestran en las tablas 5.19.a. y 5.19.b.; y el control estadístico de los datos en las tablas 5.20.a. y 5.20b.

TABLA 5.19.a. Resistencia a Compresión de probetas de hormigón para evolución de la resistencia $f_{ck} = 160 \text{ kg/cm}^2$ a tempranas edades

Resistencia característica $f_{ck} = 160 \text{ kg/cm}^2$ (Nº1)							
Resistencia media de diseño de mezcla $f_{cm} = 230 \text{ kg/cm}^2$							
Prob. Nº	Asent. cm.	Fecha de Vaciado	Fecha de Rotura	Edad días	Sección cm ²	Carga kg	Resistencia kg/cm ²
N-1-RO,518E	6 ±1	04/04/2015	11/04/2015	7	176,71	22256,24	125,95
N-2-RO,518E	6 ±1	04/04/2015	11/04/2015	7	176,71	21865,78	123,74
N-3-RO,518E	6 ±1	04/04/2015	11/04/2015	7	176,71	21958,74	124,26

Resistencia característica $f_{ck} = 160 \text{ kg/cm}^2$ (N°1)							
Resistencia media de diseño de mezcla $f_{cm} = 230 \text{ (kg/cm}^2)$							
Prob. N°	Asent. cm.	Fecha de Vaciado	Fecha de Rotura	Edad días	Sección cm^2	Carga kg	Resistencia kg/cm^2
N-4-RO,518E	6 ±1	04/04/2015	18/04/2015	14	176,71	30145,65	170,59
N-5-RO,518E	6 ±1	04/04/2015	18/04/2015	14	176,71	30245,24	171,16
N-6-RO,518E	6 ±1	04/04/2015	18/04/2015	14	176,71	29938,65	169,42
Resistencia característica $f_{ck} = 160 \text{ kg/cm}^2$ (N°1)							
Resistencia media de diseño de mezcla $f_{cm} = 230 \text{ kg/cm}^2$							
Prob. N°	Asent. cm.	Fecha de Vaciado	Fecha de Rotura	Edad días	Sección cm^2	Carga kg	Resistencia kg/cm^2
N-7-RO,518E	6 ±1	04/04/2015	02/05/2015	28	176,71	40454,29	228,93
N-8-RO,518E	6 ±1	04/04/2015	02/05/2015	28	176,71	40256,65	227,81
N-9-RO,518E	6 ±1	04/04/2015	02/05/2015	28	176,71	40854,67	231,20

TABLA 5.19.b. Resistencia a compresión de probetas de hormigón para evolución de la resistencia $f_{ck} = 210 \text{ kg/cm}^2$ a tempranas edades

Resistencia característica $f_{ck} = 210 \text{ kg/cm}^2$ (N°2)							
Resistencia media de diseño de mezcla $f_{cm} = 280 \text{ kg/cm}^2$							
Prob. N°	Asent. cm.	Fecha de Vaciado	Fecha de Rotura	Edad días	Sección cm^2	Carga kg	Resistencia kg/cm^2
N-1-RO,464E	6 ±1	07/04/2015	14/04/2015	7	176,71	25245,24	142,86
N-2-RO,464E	6 ±1	07/04/2015	14/04/2015	7	176,71	25024,98	141,62
N-3-RO,464E	6 ±1	07/04/2015	14/04/2015	7	176,71	25699,21	145,43
Resistencia característica $f_{ck} = 210 \text{ kg/cm}^2$ (N°2)							
Resistencia media de diseño de mezcla $f_{cm} = 280 \text{ kg/cm}^2$							
Prob. N°	Asent. cm.	Fecha de Vaciado	Fecha de Rotura	Edad días	Sección cm^2	Carga kg	Resistencia kg/cm^2
N-4-RO,464E	6 ±1	07/04/2015	21/04/2015	14	176,71	35965,17	203,53
N-5-RO,464E	6 ±1	07/04/2015	21/04/2015	14	176,71	35824,65	202,73
N-6-RO,464E	6 ±1	07/04/2015	21/04/2015	14	176,71	36195,67	204,83

Resistencia característica $f_{ck} = 210 \text{ kg/cm}^2$ (Nº2)							
Resistencia media de diseño de mezcla $f_{cm} = 280 \text{ kg/cm}^2$							
Prob. N°	Asent. cm.	Fecha de Vaciado	Fecha de Rotura	Edad días	Sección cm^2	Carga kg	Resistencia kg/cm^2
N-7-R0,464E	6 ±1	07/04/2015	05/05/2015	28	176,71	49129,57	278,02
N-8-R0,464E	6 ±1	07/04/2015	05/05/2015	28	176,71	49562,38	280,47
N-9-R0,464E	6 ±1	07/04/2015	05/05/2015	28	176,71	49109,54	277,91

TABLA 5.20.a. Control estadístico probetas para evolución de la resistencia $f_{ck} = 160 \text{ kg/cm}^2$ a tempranas edades

Resistencia característica $f_{ck} = 160 \text{ kg/cm}^2$						
Resistencia de diseño de la mezcla $f_{cm} = 230 \text{ kg/cm}^2$						
Probetas N°	Relación A/C	Edad días	Resistencia kg/cm^2	Control Estadístico		
N-1-R0,518E	0.518	7	125,95	Promedio	kg/cm^2	124,65
N-2-R0,518E	0.518	7	123,74	Desv. Stand.	kg/cm^2	1,15
N-3-R0,518E	0.518	7	124,26	Coef. Variación	%	0,93

Resistencia característica $f_{ck} = 160 \text{ kg/cm}^2$						
Resistencia de diseño de la mezcla $f_{cm} = 230 \text{ kg/cm}^2$						
Probetas N°	Relación A/C	Edad días	Resistencia kg/cm^2	Control Estadístico		
N-4-R0,518E	0.518	14	170,59	Promedio	kg/cm^2	170,39
N-5-R0,518E	0.518	14	171,16	Desv. Stand.	kg/cm^2	0,89
N-6-R0,518E	0.518	14	169,42	Coef. Variación	%	0,52

Resistencia característica $f_{ck} = 160 \text{ kg/cm}^2$						
Resistencia de diseño de la mezcla $f_{cm} = 230 \text{ kg/cm}^2$						
Probetas	Relación	Edad	Resistencia	Control Estadístico		
Nº	A/C	días	kg/cm^2			
N-7-R0,518E	0.518	28	228,93	Promedio	kg/cm^2	229,31
N-8-R0,518E	0.518	28	227,81	Desv. Stand.	kg/cm^2	1,72
N-9-R0,518E	0.518	28	231,20	Coef. Variación	%	0,75

TABLA 5.20.b. Control estadístico probetas para evolución de la resistencia $f_{ck} = 210 \text{ kg/cm}^2$ a tempranas edades

Resistencia característica $f_{ck} = 210 \text{ kg/cm}^2$						
Resistencia de diseño de la mezcla $f_{cm} = 280 \text{ kg/cm}^2$						
Probetas	Relación	Edad	Resistencia	Control Estadístico		
Nº	A/C	días	kg/cm^2			
N-1-R0,464E	0.464	7	142,86	Promedio	kg/cm^2	143,30
N-2-R0,464E	0.464	7	141,62	Desv. Stand.	kg/cm^2	1,95
N-3-R0,464E	0.464	7	145,43	Coef. Variación	%	1,36

Resistencia característica $f_{ck} = 210 \text{ kg/cm}^2$						
Resistencia de diseño de la mezcla $f_{cm} = 280 \text{ kg/cm}^2$						
Probetas	Relación	Edad	Resistencia	Control Estadístico		
Nº	A/C	días	kg/cm^2			
N-4-R0,464E	0.464	14	203,53	Promedio	kg/cm^2	203,70
N-5-R0,464E	0.464	14	202,73	Desv. Stand.	kg/cm^2	1,06
N-6-R0,464E	0.464	14	204,83	Coef. Variación	%	0,52

Resistencia característica $f_{ck} = 210 \text{ kg/cm}^2$						
Resistencia de diseño de la mezcla $f_{cm} = 280 \text{ kg/cm}^2$						
Probetas	Relación	Edad	Resistencia	Control Estadístico		
Nº	A/C	días	kg/cm^2			
N-7-R0,464E	0.464	28	278,02	Promedio	kg/cm^2	278,80
N-8-R0,464E	0.464	28	280,47	Desv. Stand.	kg/cm^2	1,45
N-9-R0,464E	0.464	28	277,91	Coef. Variación	%	0,52

Ningún cilindro es considerado sospechoso al no existir variación mayor a $\pm 2\sigma$ respecto a la resistencia promedio. Las desviaciones Standard de cada lote con menores a 15 kg/cm^2 que corresponde a un grado de control excelente.

TABLA 5.21.a. Resultado del análisis estadístico probetas para evolución de la resistencia a tempranas edades

Resistencia característica $f_{ck} = 160 \text{ kg/cm}^2$							
Resistencia de diseño de la mezcla $f_{cm} = 230 \text{ kg/cm}^2$							
Dosif.	A/C	Nº	Edad	R. Prom.	Desv. Stad.	Coef. Var.	Intervalo
		Prob.	días	kg./cm^2	kg./cm^2	%	
V-1	0.518	3	7	124.65	1.15	0.93	123.74 – 125.74
V-1	0.518	3	14	170.39	0.89	0.52	169.42 – 171.16
V-1	0.518	3	28	229.31	1.72	0.75	227.81 – 231.20

TABLA 5.21.b. Resultado del análisis estadístico probetas para evolución de la resistencia a tempranas edades

Resistencia característica $f_{ck} = 210 \text{ kg/cm}^2$							
Resistencia de diseño de la mezcla $f_{cm} = 280 \text{ kg/cm}^2$							
Dosif.	A/C	Nº Prob.	Edad días	R. Prom. kg./cm ²	Desv. Stad. kg./cm ²	Coef. Var. %	Intervalo
V-2	0.464	3	7	143.30	1.95	1.36	141.62 – 145.43
V-2	0.464	3	14	203.70	1.06	0.52	202.73 – 204.83
V-2	0.464	3	28	278.80	1.45	0.52	277.91 - 280.47

Si se toma como base la resistencia máxima a la compresión a los 28 días, el aumento promedio de la resistencia con el tiempo es la que indica en la tabla 5.21.a. Para $f_{ck} = 160 \text{ kg/cm}^2$, y tabla 5.21.b. para $f_{ck} = 210 \text{ kg/cm}^2$.

TABLA 5.22.a. Porcentaje de resistencia a compresión respecto a los 28 días para $f_{ck} = 160 \text{ kg/cm}^2$ A/C = 0.518 a diferentes edades

Edad días	Resistencia promedio kg./cm ²	Resistencia respecto a los 28 días %
7	124,650	54,36%
14	170,391	74,31%
28	229,313	100,00%

TABLA 5.22.b. Porcentaje de resistencia a compresión respecto a los 28 días para $f_{ck} = 210 \text{ kg/cm}^2$ A/C = 0.464 a diferentes edades

Edad días	Resistencia promedio kg./cm ²	Resistencia respecto a los 28 días %
7	143,303	51,40%
14	203,696	73,06%
28	278,802	100,00%

5.7.1. Determinación de curvas de resistencia a compresión vs. Edad del Hormigón

Para realizar el ajuste de los datos obtenidos en los ensayos de compresión, con el objeto de determinar las curvas de mejor ajuste de la relación resistencia a compresión vs. edad del hormigón, se utilizó el método de **mínimos cuadrados** el mismo que fue explicado anteriormente.

Dentro del proceso de ajuste de los datos se utilizó como base la ecuación o modelo de regresión simple cuya expresión matemática es la siguiente:

$$y = a + b*x \quad (5.23)$$

Donde:

x_i = Representa la variable independiente cuyos valores son predeterminados por el experimentador como ser: x_1, x_2, \dots, x_n , en nuestro caso ésta variable viene a representar la edad del hormigón, es decir x_i = Edad del hormigón.

y_i = Representa la variable aleatoria dependiente, cuyos valores están en función a la variable x_i , los valores de y_i , determinados experimentalmente son y_1, y_2, \dots, y_n , en nuestro caso $y_i = R =$ Resistencia promedio de los ensayos a compresión.

Con la finalidad de dar una explicación teórica, del tratamiento que se dio en el ajuste de los datos a funciones de tipo logarítmica, a continuación se explica la relación aplicada:

- Curva logarítmica:

$$y = a + b \cdot \ln(x) = R$$

- Ecuación básica:

$$y = \alpha + \beta \cdot X$$

Donde:

$$y = R \quad \alpha = a \quad \beta = b \quad X = \ln(x)$$

TABLA.5.23.a. Estimación de la función "Resistencia a compresión del hormigón vs. edad del hormigón" por el Método de Mínimos cuadrados.

Resistencia característica $f_{ck} = 160$ (kg/cm²) (Nº1)					
Resistencia de diseño de mezcla $f_{cm} = 230$ (Kg/cm²)					
Edad = x	R = y	X = ln x	X²	X*y	y²
7	124,65	1,946	3,787	242,558	15537,623
14	170,391	2,639	6,965	449,672	29033,093
28	229,313	3,332	11,104	764,118	52584,452
49	524,354	7,917	21,855	1456,347	97155,167

Luego, según el sistema de ecuaciones se tiene las siguientes soluciones:

$$3 \cdot a + 7.917 \cdot b = 524.354 \quad a = -24.460$$

$$7.917 \cdot a + 21.855 \cdot b = 1456.347 \quad b = 75.498$$

pero, según expresiones anteriores

$$\begin{aligned} a &= \alpha & y &= \alpha + \beta \cdot X \\ b &= \beta \\ X &= \ln x & R &= a + b \cdot \ln x \end{aligned}$$

ecuación estimada:

$$R = 75.498 \cdot \ln x - 24.460$$

Ajustado con un coeficiente de correlación de:

$$r = 0.9974$$

Edad días	Resistencia Promedio kg/cm ²	Resistencia Ajustada kg/cm ²
7	124,65	122,45
14.00	170,391	174,785
28.00	229,313	227,116

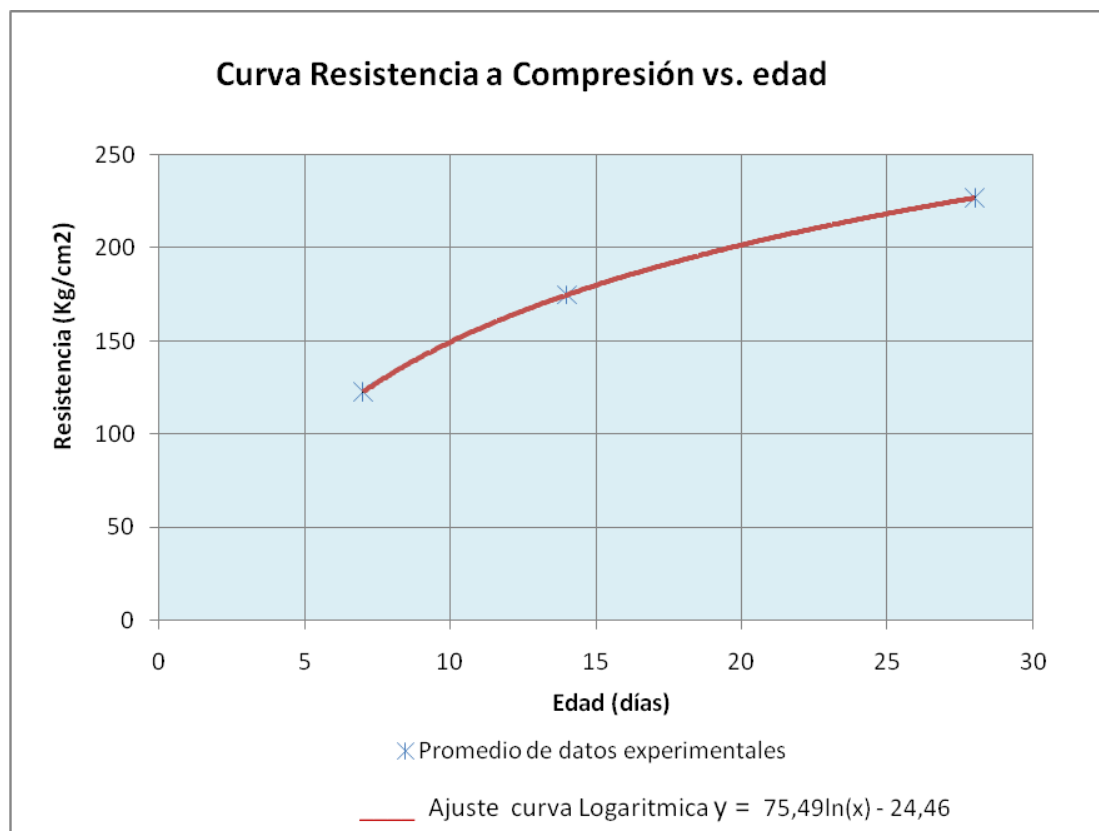


FIGURA 5.5. Representación gráfica de la resistencia en función de la edad del Hormigón para A/C = 0.518

TABLA.5.23.b. Estimación de la función "Resistencia a compresión del hormigón vs. edad del hormigón" por el Método de Mínimos cuadrados.

Resistencia característica $f_{ck} = 210 \text{ kg/cm}^2 \text{ (N}^{\circ}2)$					
Resistencia de diseño de mezcla $f_{cm} = 280 \text{ kg/cm}^2$					
Edad = x	R = y	X = ln x	X²	X*y	y²
7	143,303	1,946	3,787	278,855	20535,750
14	203,696	2,639	6,965	537,565	41492,060
28	278,802	3,332	11,104	929,025	77730,555
49	625,801	7,917	21,855	1745,445	139758,365

Luego, según el sistema de ecuaciones se tiene las siguientes soluciones:

$$\begin{aligned} 3 \quad *a + 7.917*b &= 625.801 & a &= -49.346 \\ 7.917*a + 21.855*b &= 1745.445 & b &= 97.742 \end{aligned}$$

pero, según expresiones anteriores

$$\begin{aligned} a &= \alpha & y &= \alpha + \beta * X \\ b &= \beta \\ X &= \ln x & R &= a + b * \ln x \end{aligned}$$

ecuación estimada:

$$R = 97.742 * \ln x - 49.346$$

Ajustado con un coeficiente de correlación de:

$$r = 0.9980$$

Edad días	Resistencia Promedio kg/cm^2	Resistencia Ajustada kg/cm^2
7	143,303	140,851
14.00	203,696	208,600
28.00	278,802	276,350

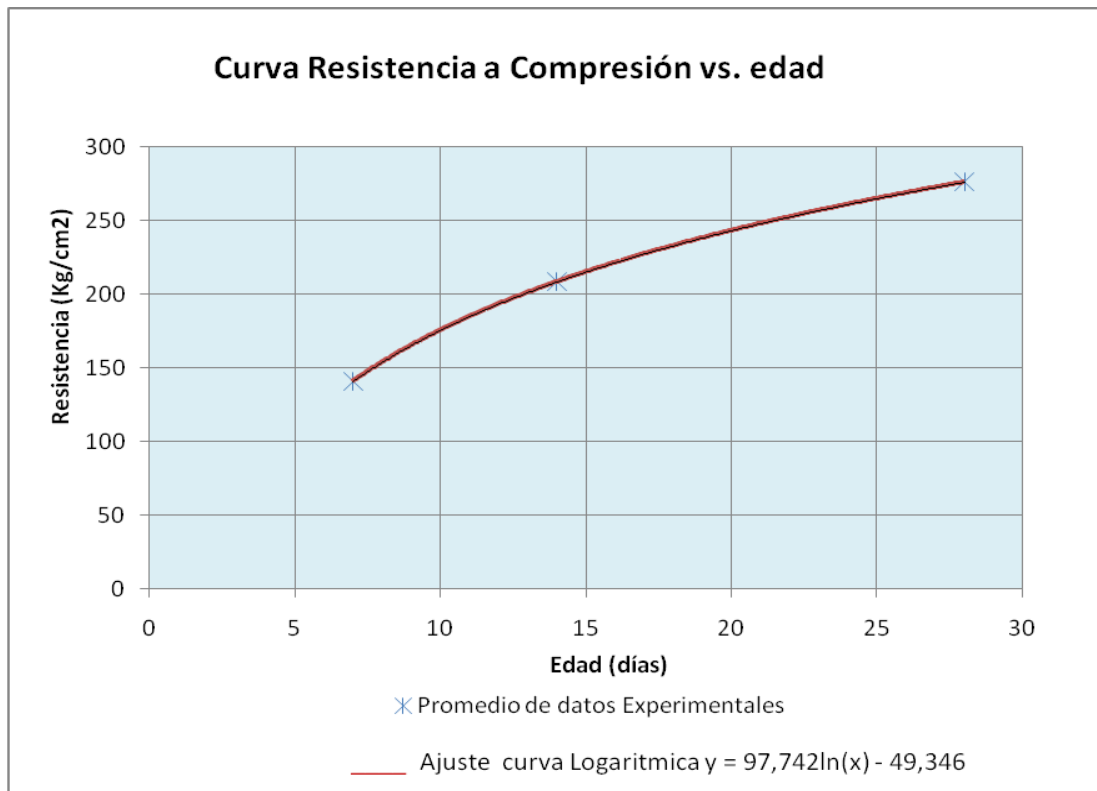


FIGURA 5.6. Representación gráfica de la resistencia en función de la edad del hormigón para A/C = 0.464

Los valores de la tabla 5.23.a y la tabla 5.23.b. son representados gráficamente con la ecuación ajustada por mínimos cuadrados, en la figura 5.5. y en la figura 5.6.

La gráfica muestra claramente que el aumento de la resistencia después de los 28 días es muy pequeño comparado con los primeros 28 días, y es por esta razón que en la práctica normalmente se especifica que el concreto alcanza la máxima resistencia a la compresión a la edad de 28 días.

5.7.2. Coeficientes de conversión de la resistencia a j días respecto a los 28 días

Las diferentes normas proporcionan, en forma meramente informativa o de referencia, ciertos coeficientes que relacionan la resistencia a j días de edad con la resistencia a 28 días de edad. Pero estos coeficientes de conversión no son de carácter general porque a edades tempranas influyen notablemente diversos factores y por ello las Normas recomiendan deducir experimentalmente estos coeficientes para el propio hormigón de que se trate.

En la tabla 5.24.a. se muestran los coeficientes determinados para la resistencia de diseño de mezcla $f_{cm} = 230 \text{ kg/cm}^2$, y en la tabla 5.24.b. $f_{cm} = 280 \text{ kg/cm}^2$, con agregados del río San Juan del Oro localidad El Puente y cemento El Puente. También se presentan los coeficientes proporcionados a título indicativo por la Norma Boliviana CBH-87 y el Comité ACI.

TABLA 5.24.a. Coeficiente de conversión de la resistencia $f_{ck} = 160 \text{ kg/cm}^2$ a j días con respecto a los 28 días de edad
Resistencia de mezcla $f_{cm} = 230 \text{ kg/cm}^2$

Edad	Rio San Juan del Oro (El Puente)	Norma Boliviana	Según ACI
1	***	***	0.12
3	***	0.50	0.40
7	0.54	0.65	0.70
14	0.77	***	0.90
21	***	***	***
28	1.00	1.00	1.00
56	***	***	1.10
90	***	1.20	1.20
180	***	***	1.25
360	***	1.35	***

*** No definidas

TABLA 5.24.b. Coeficiente de conversión de la resistencia $f_{ck} = 210$ kg/cm² a j días con respecto a los 28 días de edad
Resistencia de mezcla $f_{cm} = 280$ kg/cm²

Edad	Rio San Juan del Oro (El Punte)	Norma Boliviana	Según ACI
1	***	***	0.12
3	***	0.50	0.40
7	0.51	0.65	0.70
14	0.75	***	0.90
21	***	***	***
28	1.00	1.00	1.00
56	***	***	1.10
90	***	1.20	1.20
180	***	***	1.25
360	***	1.35	***

*** No definidas

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El objetivo general planteado para la elaboración del presente trabajo de investigación, ha sido el estudio de las características físicas y mecánicas de los agregados del río San Juan del Oro Localidad El Puente y su aplicación de esta caracterización en la dosificación de hormigones por el método ACI.

Para cumplir con los objetivos planteados, se ha desarrollado una investigación basada en un plan lógico de acciones secuenciales, de tal forma que los resultados del trabajo de laboratorio constituyan la columna vertebral sobre la que está armada toda la estructura del presente trabajo de investigación.

Las pruebas en escala de laboratorio, han permitido la acumulación de los datos experimentales; posteriormente estos han sido evaluados y complementados con la discusión de los resultados. Para finalizar con este proceso de investigación se plantean las siguientes conclusiones y recomendaciones:

6.1. Yacimiento de agregados

Los factores más importantes que hay que tener en cuenta en la fabricación de concretos son las características de los agregados, por estas circunstancias y tomando en cuenta el objetivo de esta investigación, se puede concluir que la cantera del río San Juan del Oro Localizada en la Comunidad de El Puente es de tipo aluvial originados por la acción erosiva de las aguas pluviales, combinada con la acción hidráulica y mecánica

producida por el acarreo de los fragmentos a lo largo de las corrientes superficiales del agua del río San Juan del Oro.

El material conglomerado del río San Juan del Oro consta principalmente de partículas de piedra, grava, arena gruesa y cantidad mínima de arcilla y limo.

6.2 El muestreo de los agregados:

Las muestras de los agregados tomadas para realizar los ensayos, se extrajeron según corresponde a Yacimientos “depósitos de grava y arena naturales canto rodado”. La fuente de abastecimiento fue trabajado como banco de frente abierto con respectivo sondeo de pozos en una franja de longitud 2000 m. Se dividió en 4 zonas de muestreo, cada zona de 500 metros, en cada zona de muestreo se tomó las muestras directamente de 5 pozos por zona, se excavaron pequeños pozos de sondeo de 1.0 metro de ancho, por 1.0 metro de largo y por 1.0 metro de alto, que se encuentren a alguna distancia por detrás y paralelos al frente del pozo central previamente definido.

Con las muestras extraídas de cada pozo se realizó el separado con el tamiz n°4 en agregado grueso y fino, seguidamente ya teniendo todas las muestras separadas se mezclaron todas las muestras de los 5 pozos por zonas, mediante cuarteo manual, se realizaron las pruebas necesarias en campo para obtener las 5 mezclas compuestas y representativas de cada zona y se fueron repitiendo esta metodología en las 4 zonas identificadas a lo largo de la franja de estudio para obtener las 20 muestras para realizar la caracterización de los agregados de esta zona.

Cada muestra de agregado grueso que se extrajo en peso de aproximadamente de 100 kilogramos, y el agregado fino de 75 kilogramos en peso en bolsas de polietileno.

En laboratorio se redujo las muestras de campo de los agregados hasta cantidades apropiadas para realizar los ensayos, empleando procedimientos que minimicen las variaciones en las características determinadas entre las muestras de ensayo y las muestras de campo, utilizando el método del cuarteo mecánico.

Para el agregado fino (arena), su explotación es muy favorable, por poseer gran cantidad de material, las muestras fueron tomadas en 4 puntos, de la franja escogida para el presente estudio, su contenido de arcilla y limo en porcentaje de 1.75 % que está dentro de lo permitido por ASTM C 33 cual es de 5%.

El agregado grueso (grava), su cantidad es muy escasa con relación a la arena, se encuentra a una profundidad de 1 m, eliminando la capa inicial de 20 a 50 cm de agregado fino (arena), posee una cantidad de arcilla y limo de alrededor de un 0.237% el cual está dentro de lo permitido cual es de 1%. y resistencia a la abrasión de 31.46 % menor a lo permitido por ASTM C 131 cual es de 45%. Sus partículas del agregado grueso poseen diferente forma entre las que más predominan son de forma alargada y plana. Su coeficiente de forma es de $0.169 \geq 0.15$ de acuerdo a Norma Boliviana del Hormigón Armado CBH-87

6.3 Agregados

Los agregados ocupan aproximadamente las tres cuartas partes del volumen del concreto y por lo tanto su calidad es de considerable importancia tanto desde el punto de vista económico como de las propiedades finales del concreto que con ellos se produce.

No es posible conseguir un buen concreto si los agregados son de mala calidad, ya que sus propiedades físicas, químicas, mecánicas y térmicas influyen sobre el comportamiento del concreto. De ahí la importancia del estudio de las características para recomendar o descartar el uso de los agregados para la fabricación de concreto.

Los ensayos de los áridos, fueron realizados de acuerdo a los procedimientos de la norma ASTM, cuyos resultados mencionaremos a continuación:

6.3.1. Granulometría

Por tratarse, la totalidad de los agregados del rio San Juan del Oro Localidad de El Puente de origen aluvial, se debe tener en cuenta lo siguiente:

a.- Se debe separar la arena y la grava en tamiz N° 4, de esa manera trabajar con materiales independientes.

b.- Para explotaciones a pequeña escala se pueden eliminar los granos de sobre tamaño mayores a 1 ½" y para construcciones de gran tamaño (concretos en masa) se puede instalar una clasificadora, con la finalidad de separar grava y arena que existen en el banco estudiado.

Los agregados seleccionados deberán ser procesados, transportados, manipulados, almacenados y pesados de manera tal que se garantice que la pérdida de finos sea mínima, que se mantenga la uniformidad de los mismos y que no se presente rotura o segregación importante entre ellos.

El agregado grueso presenta una granulometría continua, la cual fue separada en tamiz 1 ½" y N° 4 cumplen con todos los requisitos de las

especificaciones correspondientes, tal como se muestra en los ensayos y su gráfica (FIGURA 3.2) capítulo 3, muestran con claridad los límites de las normas ASTM.

* Tamaño máximo = 1 ½"

* Tamaño máximo nominal = 1 ½"

* Módulo de finura = 7.25

Especificaciones 6.95 a 7.6

El agregado fino también presenta una granulometría continua, la cual fue separada por el tamiz N° 4 la que se presenta en los ensayos correspondientes a esta investigación, cumpliendo de esta manera con las especificaciones exigidas según Normas ASTM. Se muestra en el grafico (FIGURA 3.1) capítulo 3

* Módulo de finura = 2.61

Especificaciones 2.30 a 3.10

El análisis granulométrico de la arena se complementa calculando su módulo de finura, por lo que el agregado fino de nuestro banco investigado presenta un módulo de finura adecuado para la fabricación de concreto, por lo que entra en el rango especificado por ACI cual es de 2.30 a 3.10, y se lo puede definir como arena de finura media ya el límite que divide a la arena fina con la gruesa es el de 2.60.

6.3.2. Material que pasa el tamiz N° 200

La presencia de limos y arcillas (material que pasa el tamiz N° 200) en los agregados resulta indeseables, pues incrementa el requerimiento de agua de mezclado y los cambios volumétricos del concreto, pero en igualdad de condiciones es más perjudicial la arcilla por su carácter plástico. Sin embargo, la presencia de estos materiales es inevitable y el exceso no

representa un impedimento insalvable para su aprovechamiento, ya que pueden ser reducidos a límites tolerables mediante un adecuado tratamiento de lavado.

Los agregados del río San Juan del Oro Localidad de El Puente presentan: agregado grueso 0.24 %, agregado fino 1.76% de material que pasa el tamiz N° 200, lo que no tienen mucho contenido de limos y arcilla y no requiere su lavado para alcanzar los límites permisibles.

Los resultados de laboratorio nos dan los siguientes porcentajes:

Agregado grueso:

- Material que pasa el tamiz N° 200 = 0.24 % **Especificaciones \leq 1 %**

Agregado fino:

- Material que pasa el tamiz N° 200 = 1.76 % **Especificaciones \leq 5 %**

Los porcentajes de finos en los agregados cumplen con las especificaciones; no se ha considerado reducir más la cantidad de finos debido a la dificultad que podría representar luego durante la explotación ya que obtener en obra agregados completamente libre de estos materiales es prácticamente imposible; solo es posible a escala de laboratorio.

6.3.3. Peso específico y absorción

Normalmente no se especifican límites de aceptación para el peso específico de los agregados, por que esta propiedad física puede ser buen índice de su porosidad pero no necesariamente de su calidad intrínseco. Sin embargo, para producir un concreto deben emplearse agregados con peso específico comprendidos entre 2.4 y 2.8 g/cm³, aproximadamente.

La absorción de los agregados se determinan después de un periodo de inmersión de 24 horas en agua, por esta razón, la absorción no da una medida justa de la porosidad, ya que al cabo de este período el agregado continúa ganando peso en el curso del tiempo a ritmo más lento. Las especificaciones de agregado para concreto, no acostumbran fijar límites de aceptación para la absorción, no obstante, solamente a título informativo puede decirse que, cuando las rocas constitutivas son de buena calidad, la absorción no suele exceder de 3% en el agregado grueso ni de 5% en el agregado fino.

Agregado grueso:

		Especificaciones
- Peso específico a granel	= 2.58002 g/cm ³	2.4 g/cm ³ a 2.8 g/cm ³
- Peso específico s.s.s	= 2.61009 g/cm ³	2.4 g/cm ³ a 2.8 g/cm ³
- Peso específico aparente	= 2.65324 g/cm ³	2.4 g/cm ³ a 2.8 g/cm ³
- Absorción	= 1.01014 %	≤ 3 %

Agregado fino:

		Especificaciones
- Peso específico a granel	= 2.637031 g/cm ³	2.4 g/cm ³ a 2.8 g/cm ³
- Peso específico s.s.s	= 2.674119 g/cm ³	2.4 g/cm ³ a 2.8 g/cm ³
- Peso específico aparente	= 2.738609 g/cm ³	2.4 g/cm ³ a 2.8 g/cm ³
- Absorción	= 1.421545 %	≤ 5%

6.3.4. Peso unitario suelto y compactado

El peso unitario indica el grado de acomodamiento de las partículas y entre mayor sea este, menor será el volumen de vacíos entre partículas, que hace

que la mezcla sea más económica, porque habrá menor cantidad de huecos a ser llenados por la pasta de cemento.

El peso unitario en estado suelto es importante para el manejo, transporte y almacenamiento de los agregados. Mientras que el peso unitario compactado se utiliza para el diseño de las mezclas, ya que los agregados van a estar sometidos a una compactación durante la colocación del concreto en los encofrados. Las especificaciones de agregados, establecen que el peso unitario debe estar comprendido entre 1.200 g/cm^3 y 1.750 g/cm^3 .

Los agregados del río San Juan del Oro Localidad El Puente tienen los siguientes pesos unitarios:

Agregado grueso:

		Especificaciones
- Peso unitario suelto	= 1.594 g/cm^3	1.200 g/cm^3 a 1.750 g/cm^3
- Peso unitario compactado	= 1.702 g/cm^3	1.200 g/cm^3 a 1.750 g/cm^3

Agregado fino:

		Especificaciones
- Peso unitario suelto	= 1.574 g/cm^3	1.200 g/cm^3 a 1.750 g/cm^3
- Peso unitario compactado	= 1.720 g/cm^3	1.200 g/cm^3 a 1.750 g/cm^3

6.3.5. Resistencia a la abrasión del agregado grueso

La resistencia que los agregados gruesos oponen a sufrir desgaste, rotura o desintegración de las partículas por efecto de la abrasión, es una característica que suele considerarse como un índice de su calidad en general, esta propiedad cobra importancia cuando las partículas van a estar sometidas a una fricción continua; las especificaciones establecen que el

porcentaje de desgaste medido, por medio de la Máquina de los Ángeles no debe ser mayor del 45 %.

Agregado grueso:

Especificaciones

- Desgaste medido en la Máquina de los Ángeles = 31.46 % ≤ 45%

El porcentaje de desgaste en el agregado grueso cumple con las especificaciones, sin embargo, el agregado está compuesto por una variedad de tipos de rocas la mayoría muy resistentes pero también se encuentran partículas débiles como son las pizarras, y areniscas.

6.3.6. Formas de las partículas de agregado grueso

Con el fin de juzgar de manera más precisa la forma de las partículas se la realizo mediante la determinación del coeficiente volumétrico medio o coeficiente de forma, ensayo no normalizado, pero que ha sido adoptado por la Norma Boliviana del Hormigón Armado CBH-87, el cual establece que este coeficiente debe ser mayor a 0.15.

Agregado grueso:

Especificaciones

- Coeficiente de forma = 0.169 ≥ 0.15

El coeficiente volumétrico del agregado grueso del río San Juan del Oro Localidad de EL Puente cumple con las especificaciones y el valor expresa regular forma de partículas.

Los resultados de los ensayos realizados cumplen con las especificaciones exigidas por la norma ASTM “Sociedad Americana para Ensayos de Materiales”.

Con el fin de garantizar la confiabilidad de los ensayos de laboratorio se realizaron 20 ensayos. El análisis estadístico de los datos experimentales de la caracterización de los agregados se sustenta en la evaluación de los mismos por las siguientes definiciones:

Error Experimental Promedio: se utilizó, Calculo del Error de Gauss, el cual nos permitió determinar que nuestros ensayos están dentro del error experimental permitido, los cuales se pueden apreciar en la tabla 3.15.

Manejo de la Desviación de los Datos Experimentales: se utilizo, Criterio de Grubbs, no se descarto ninguno de los datos ya que son menores a los valores limites, los cuales se puede apreciar en la tabla 3.16.

Distribución de probabilidades: se utilizo, t student el cual nos estableció un intervalo de confianza para cada propiedad del agregado, los cuales se pueden apreciar en la tabla 3.17.

Se realizó un informe de precisión para los ensayos realizados por la Norma ASTM, los valores obtenidos son menores a los obtenidos como se pueden apreciar en el Anexo 12.

6.4. Agua

Para el proceso de mezclado y curado del concreto se recomienda la utilización agua potable de la Comunidad de El Puente, en nuestro caso se

utilizo el agua potable de la ciudad de Tarija para la realización en laboratorio, por cumplir los parámetros de la norma Boliviana para el agua.

Se recomienda la utilización del agua potable de la comunidad de El Puente para la elaboración del hormigón y curado por cumplir la norma Boliviana del agua para hormigones o en su caso buscar otras fuentes de aprovechamiento de agua en las comunidades aledañas a esta zona, previo análisis de estas aguas.

No se recomienda el uso del agua del río San Juan del Oro para la fabricación de Hormigones y curado por contener cloruros mayor a lo exigido en la norma Boliviana del hormigón armado, pero si para el uso del lavado de los agregados, si fuera necesario la reducción de material fino arcilla y/o limos, etc.

6.5. Resumen de los requisitos y ensayos utilizados por método ACI

Las características necesarias de los materiales y del hormigón, realizadas para la dosificación de hormigones, de acuerdo a las características de los materiales utilizados para la dosificación, son los mostrados en las tablas 6.1.a. - 6.2.b.

TABLA 6.1.a. Resumen de los requisitos para la dosificación por método ACI

Descripción	Método ACI
Características de los materiales	
Humedad y absorción de los agregados	Si
Peso específico de los agregados y cemento	Si
Pesos unitario del agregado grueso	Si
Granulometría	Si
Módulo de finura del agregado fino	Si
Curva relación A/C vs. resistencia	Si

TABLA 6.1.b. Resumen de los requisitos para la dosificación por método ACI

Descripción	Método ACI
Características del hormigón	Método ACI
Resistencia requerida	Si
Contenido de aire atrapado en el H ^o	Si
Revenimiento	Si
Tamaño máximo del agregado	Si

6.6. Dosificación de Hormigones

Para la determinación de cantidades de materiales componentes para la mezcla de hormigón, de propiedades deseadas, se han desarrollado procedimientos semi-analíticos de naturaleza empírica, debido a su dependencia de datos tabulados obtenidos de un gran número de mezclas de prueba.

Estos procedimientos permiten calcular con cierta exactitud las cantidades de los ingredientes de la mezcla para una variedad de condiciones. El procedimiento utilizado en nuestra investigación es el que frecuentemente se utiliza en nuestro medio, cual es método ACI 211.1.74, el cual es justificado en el capítulo 4, como también basándose en investigaciones realizadas en nuestra región, por estudiantes de la Carrera de Ingeniería Civil de nuestra Casa Superior de Estudios.

Deben considerarse siempre como sujetas a revisión sobre la base de la experiencia obtenida con las mezclas de prueba de laboratorio y realizando los ajustes necesarios en las mezclas de prueba preparadas en campo, y así corregir las posibles fallas causadas por la información tomada de pequeñas muestras, mezcladas en el ambiente de laboratorio precederán el comportamiento bajo las condiciones de campo.

Ningún método de dosificación puede generalizarse y sirve con un grado razonable de precisión, sólo para los materiales donde fue desarrollado y por ello es importante adaptar estos métodos a las condiciones y materiales locales.

Las diferentes dosificaciones efectuadas para cada relación agua/cemento en la elaboración de la curva resistencia-relación agua/cemento, requieren las mismas cantidades de agregado grueso seco; la diferencia en la cantidad de agua de mezclado neto no es significativa; sin embargo, la diferencia en las cantidades de cemento y agregado fino seco, si lo son, como se puede apreciar en la Figura 6.3.

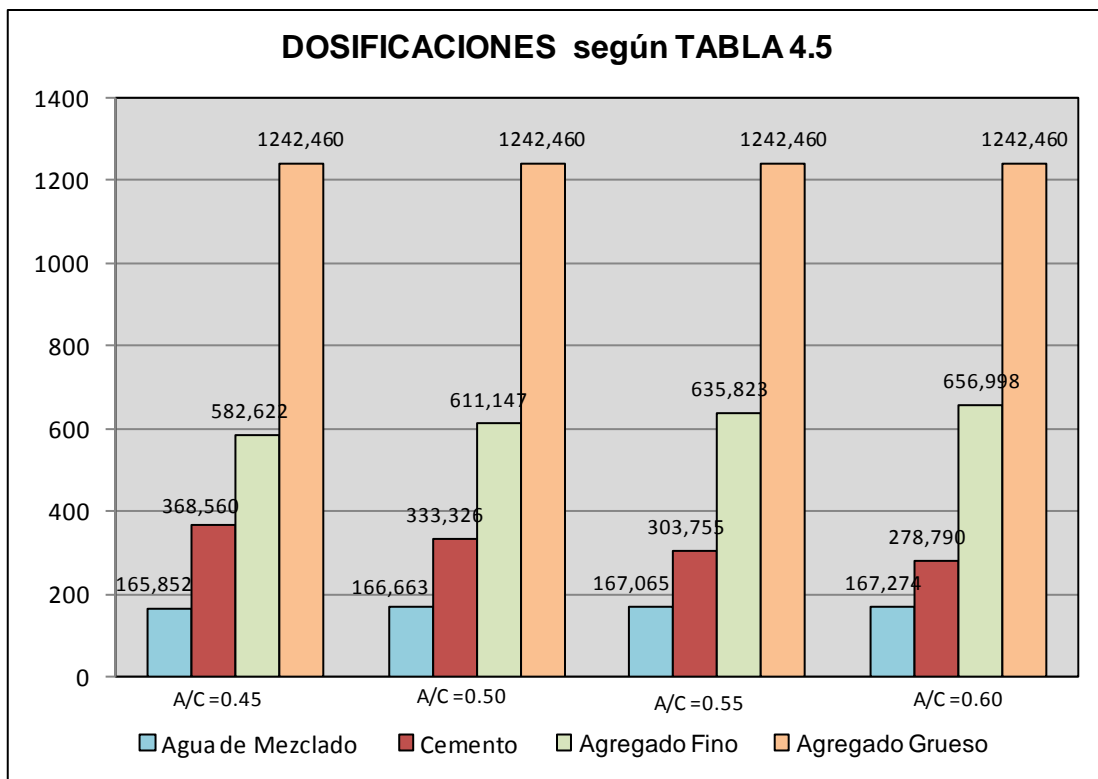


FIGURA 6.3. Consumo de material por m³ de hormigón para elaboración curva resistencia-relación agua/cemento

6.7. Curva resistencia-relación agua/cemento

La resistencia a compresión del hormigón depende de muchos factores. Sin embargo, para producir una mezcla trabajable, bien dosificada y en condiciones Standard de mezclado, curado, métodos de prueba, utilizado agregados con las mismas características, el mismo tipo de cemento y calidad del agua, la resistencia únicamente depende de la relación agua/cemento.

En la práctica, muchas veces se utilizan materiales con características distintas a las previstas en el diseño de la mezcla, lo que conduce a resistencias distintas con la misma relación agua/cemento. Por esta razón se hace indispensable efectuar ensayos con los materiales que realmente van a ser utilizados en obra.

TABLA 6.2.a. Resistencias cilíndricas promedio y ajustadas para diferentes relaciones Agua/Cemento

Relación A/C	Resistencia 7 días Promedio kg/cm ²	Resistencia 7 días Ajustadas kg/cm ² *
0.45	185.61	190.073
0.50	162.44	159.385
0.55	138.18	133.652
0.60	108.92	112.073

* Estos valores han sido calculados por medio de la ecuación 6.1. tabla 5.6

TABLA 6.2.b. Resistencias cilíndricas promedio y ajustadas para diferentes relaciones agua/cemento

Relación A/C	Resistencia 28 días	Resistencia 28 días	Resistencia 28 días
	Teórica ACI kgr/cm ² *	Promedio kgr/cm ²	Ajustadas kgr/cm ² **
0.45	380.872	285,75	294,481
0.50	334.475	251,97	245,720
0.55	293.730	213,40	205,032
0.60	257.948	165,19	171,082

* Estos valores han sido calculados por medio de la ecuación de ajuste según la ley de Abrams con datos de resistencia vs. relación agua/cemento de la tabla 2.13 Capítulo 2.

** Estos valores han sido calculados por medio de la ecuación 6.2. Tabla 5.9

Con los resultados obtenidos en laboratorio de dosificaciones con relaciones agua cemento de: 0.45, 0.50, 0.55, 0.60, se obtuvieron resistencias a la compresión del hormigón a los 7 días y 28 días, con los cuales desarrollamos modelos matemáticos traducidos en ecuaciones, las cuales expresan la resistencia a la compresión del hormigón en función de la relación-agua/cemento, los resultados obtenidos se pueden apreciar en las tablas 6.2.a. y 6.2.b., los cuales cumplieron con las normas de control con una desviación estándar con un grado de control Excelente en laboratorio, y un coeficiente de variación Excelente y muy bueno para mezclas de prueba en laboratorio.

Para este fin se utilizó la conocida ley de Abrams, y se obtuvieron las siguientes ecuaciones: 6.1. y 6.2.

$$R_{(7\text{días})} = \frac{927.208171}{33.842155^{\frac{A}{C}}} \quad (6.1.)$$

$$R_{(28\text{días})} = \frac{1501.831517}{37.356229^{\frac{A}{C}}} \quad (6.2.)$$

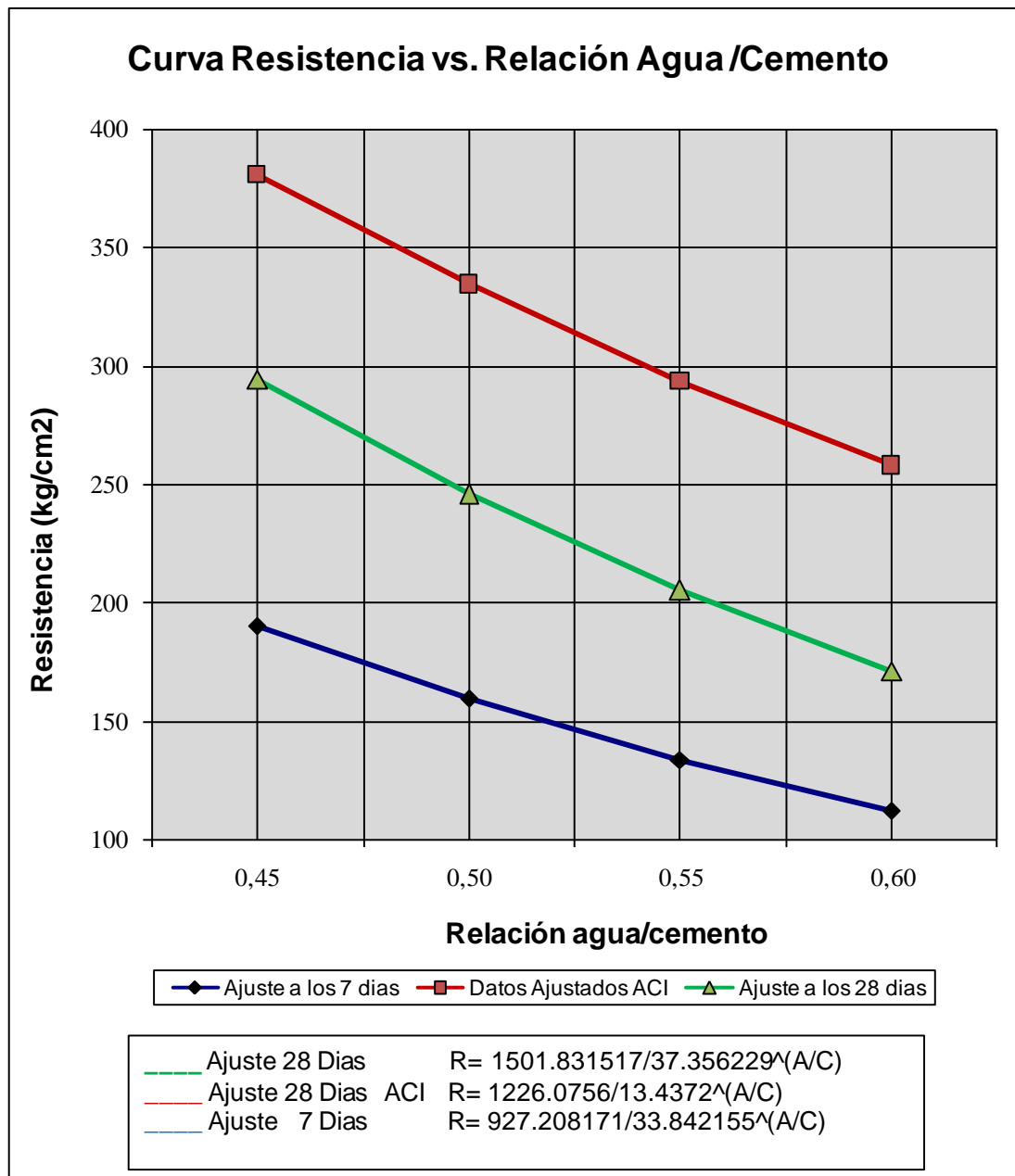


FIGURA 6.4. Correspondencia entre la resistencia a compresión y la relación agua/cemento. Edad 7días-28 días -ACI.

Las curvas generadas por las ecuaciones: 6.1 y 6.2, representadas en la figura 6.4., muestran claramente que cuando menor es la relación agua/cemento, mayor es la resistencia; sin embargo, al emplear relaciones

agua/cemento muy bajas la mezcla se vuelve más seca y difícil de compactar quedando porosa, al punto que la resistencia comienza a decrecer, además en este caso, el contenido de cemento aumenta produciendo mayor contracción con la consiguiente aparición de fisuras en la pasta o una pérdida de adherencia entre el cemento y el agregado.

En la figura 6.4, podemos observar en las curvas de 28 días de edad la diferencia, entre la curva teórica del Método ACI y la curva real obtenida con los agregados del río San Juan del Oro Localidad de El Puente a las edades de 7 y 28 días, utilizando cemento El Puente, es desfavorable para nuestra curva real que no alcanza la resistencia teórica especificada por el Método ACI. Este defecto se puede atribuir a que las tablas utilizadas por el Método son obtenidas a partir de relaciones empíricas con agregados de EE.UU., y a la calidad de cemento de nuestro país con el de EE.UU.

La determinación de las ecuaciones y curvas resistencia vs relación agua/cemento para las edades de 7 y 28 días se ha constituido la parte central de la presente investigación, con el fin de poder tener un conocimiento real de las resistencias obtenidas, utilizando los materiales del banco en estudio, que tienen características diferentes a los especificados por el método ACI.

6.8. Validación de la ecuación y curva resistencia-relación agua /cemento

La validación estadística efectuada cumple con las siguientes pruebas estadísticas efectuadas:

- Coeficiente de correlación alto (próximo a la unidad).
- Prueba **t student**
- Prueba **F Fisher**

Los resultados de las pruebas de resistencia efectuadas para dar validez práctica, como se esperaba, han sido prácticamente iguales a los previstos, lo que evidentemente valida, desde un punto de vista práctico, la ecuación y curva resistencia-relación agua/cemento obtenida.

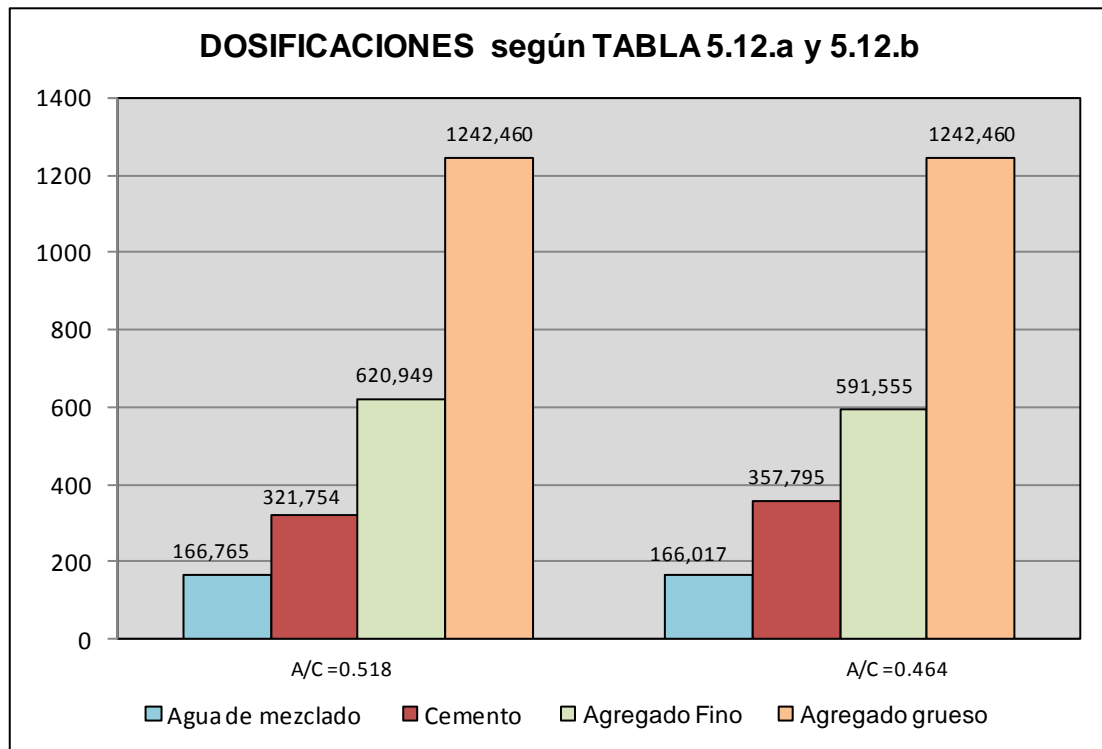


FIGURA 6.5. Consumo de materiales por m³ de hormigones para verificación curva resistencia-relación agua/cemento

Con respecto al consumo de materiales por metro cúbico de concreto para las diferentes dosificaciones efectuadas en la validación práctica de la ecuación y curva resistencia-relación agua/cemento, se concluye que el requerimiento de agregado grueso seco es el mismo, la diferencia en las cantidades de agua de mezclado neto no es significativa; sin embargo, la diferencia en las cantidades de cemento, agregado fino seco, sí son considerables, como se puede apreciar en la figura 6.5.

Los valores de mayoración aplicados a las resistencias características propuestas por la ACI para determinar las resistencia de diseño de mezclas, son demasiado conservadores producen amplio margen de seguridad figura 6.6.; y según los datos de rotura, con la que se generó la ecuación resistencia-relación agua/cemento, se obtuvieron las relaciones agua/cemento para obtener las resistencias mayoradas (resistencias medias) de la siguiente manera:

TIPO C		TIPO A	
$f_{ck} = 160 \text{ kg/cm}^2$	y	$f_{ck} = 210 \text{ kg/cm}^2$	
$f_{cm} = 230 \text{ kg/cm}^2$	y	$f_{cm} = 280 \text{ kg/cm}^2$	
A/C = 0.518	y	A/C = 0.464	

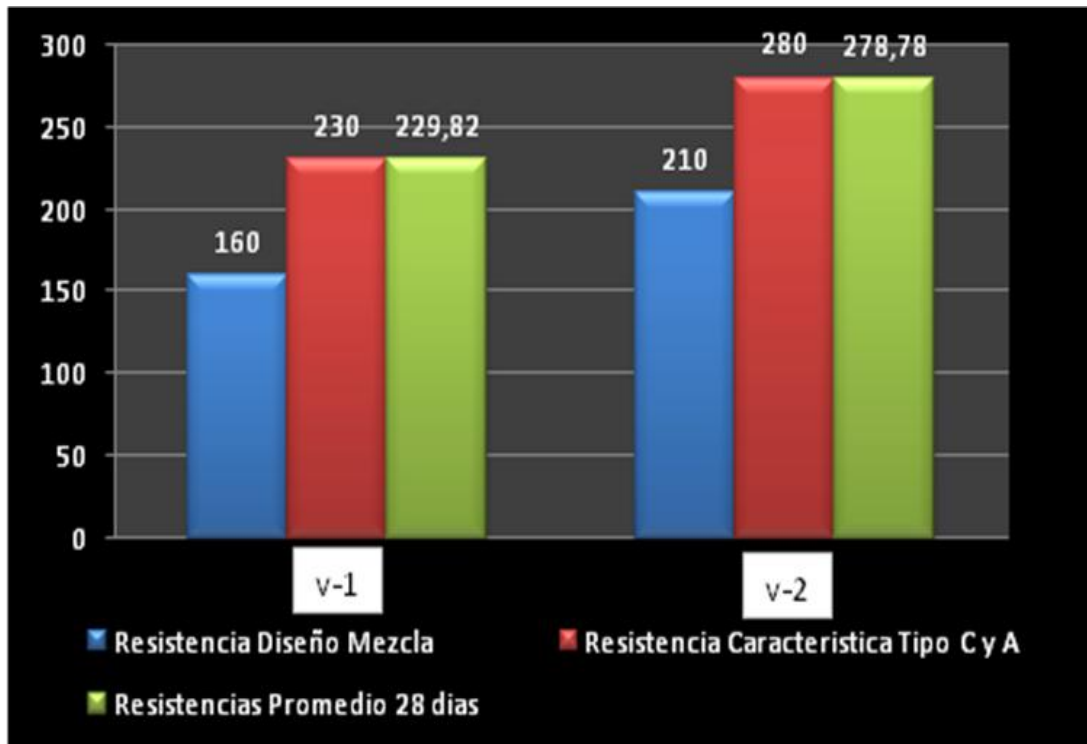


FIGURA 6.6. Representación gráfica de las pruebas de resistencia para la validación práctica curva resistencia-relación agua/cemento

Los resultados de las pruebas de resistencia para las dosificaciones con resistencia de diseño para el tipo A y tipo C, son prácticamente iguales con la resistencia promedio encontrado en laboratorio como se puede apreciar en la figura 6.6:

Tipo C (V-1) resistencia promedio = 229.82 kg/cm^2

Tipo A (V-2) resistencia promedio = 278.78 kg/cm^2

Esto permite concluir que la ecuación y curva resistencia-relación agua/cemento cumple para valores de A/C, utilizado para la dosificación para hormigones de tipo A y tipo C.

6.9. Utilidad de la curva resistencia-relación agua/cemento

La determinación de las ecuaciones y curvas que relaciona las variables, resistencia y relación agua cemento fue importante; ya que la relación agua/cemento es el principal factor que controla la resistencia del concreto a una determinada edad.

Las ecuaciones 6.1. y 6.2., y las curvas figura 6.4. Que se obtuvieron nos muestran claramente la variación de la resistencia a compresión promedio del hormigón según la edad de 7 días y 28 días, respecto a las relaciones agua/cemento: 0.45, 0.50, 0.55, 0.60. Las pruebas de resistencias efectuadas a las edades mencionadas están basadas en muestras fabricadas y curadas bajo condiciones Standard de laboratorio.

Las curvas mencionadas, podrán ser utilizadas en el diseño de mezclas de hormigón normal de consistencia media utilizando los agregados del río San Juan del Oro Localidad de El Puente, el cemento El Puente IP 30 y agua potable que cumpla las normas de calidad. Su aplicación se limita al diseño

de mezclas con relación agua /cemento mayor o igual a 0.45 y menor o igual a 0.60.

No se recomienda utilizar relaciones agua/cemento menores a 0.45 debido al excesivo consumo de cemento, sobre el cual la Norma Boliviana con el objeto de evitar agrietamiento en el hormigón por efectos de contracción de la pasta de cemento, no recomienda exceder de 400 kilogramos de cemento por metro cúbico de concreto. Por otra parte no es recordable utilizar relaciones agua/cemento mayores a 0.70, puesto que la Norma Boliviana con el objeto de proteger la armadura de la corrosión en hormigones armados, establece un mínimo contenido de cemento de 200 kilogramos para hormigones ligeramente armados y 350 kilogramos en hormigones normalmente armados por metro cúbico de concreto.

Los hormigones encontrados en nuestra investigación con los agregados del río en estudio cual es el Río San Juan del Oro Localidad El Puente: el de **tipo A** (resistencia característica de 210 kg/cm^2), el de **tipo C** (resistencia característica de 160 kg/cm^2), cuyas dosificaciones realizadas con resistencia de mezcla conservadoras por el método ACI, y relaciones utilizadas obtenidas por la ecuación 6.2., y su respectiva curva figura 6.4., de: 0.464 y 0.518 obtuvimos concretos con contenido dentro de lo normal cemento según la norma del hormigón. Esto se debe a que se tiene en banco de agregado fino (arena), con un bajo porcentaje de absorción.

6.10. Influencia de la edad del concreto

Inmediatamente que se presenta el fraguado del concreto comienza el proceso de adquisición de resistencia con el transcurso del tiempo; pero, este aumento de resistencia es significativo en tempranas edades del hormigón y

es por esta razón que en la práctica, normalmente se especifica que el concreto alcanza la máxima resistencia a la compresión a la edad de 28 días.

En la resistencia a tempranas edades influyen notablemente las propiedades del cemento, la relación agua/cemento, la temperatura, la humedad, los aditivos, etc. y es por ello, que las distintas normas proporcionan sólo a título indicativo coeficientes que relacionen la resistencia a los j días con la resistencia a los 28 días, recomendando deducir experimentalmente esos coeficientes para el propio hormigón de que se trate.

Para los hormigones dosificados, en esta investigación, la resistencia a compresión a tempranas edades únicamente está influenciada por la relación agua/cemento ya que todos los demás factores son similares; sin embargo, los coeficientes determinados para: $f_{ck} = 210 \text{ kg/cm}^2$ con $A/C = 0.464$ mostrados en las tablas 6.3., son prácticamente iguales a los que se obtuvieron para $f_{ck} = 160 \text{ kg/cm}^2$ con $A/C = 0.518$ por lo que pueden ser aplicados con una aproximación adecuada para los diferentes hormigones elaborados con materiales de la presente investigación .

TABLA 6.3. Coeficiente de conversión de la resistencia a compresión a diferentes Edades de los hormigones obtenidos en la zona de estudio

Edad (días)	7	14	28
Coeficiente	0.51- 0.54	0.75- 0.77	1

Tabla 5.24 a 5.24b

6.11. Recomendaciones

- El muestreo debe realizarse cuidadosamente, con el fin de no alterar sus características, y mantenerlos bien homogenizados.

- Los ensayos deben ser realizados de acuerdo al procedimiento y especificaciones de la norma ASTM, para tener la seguridad de obtener una dosificación real del hormigón.
- Se recomienda la explotación de la Arena ya que el volumen aprovechable es significativo, y tener un control minucioso en la explotación del agregado grueso por el escás de este material, para ello realizar un análisis ambiental tomando en cuenta las Normas Ambientales para la explotación de Bancos de Préstamo de Materiales Aluviales.
- Se recomienda utilizar agua de mezclado y agua de curado en lo posible agua potable de la comunidad de El Puente; en caso de utilizar otras aguas para la preparación del hormigón y posterior curado se deben realizar los análisis correspondientes las cuales deben cumplir con la norma boliviana de calidad del agua.
- Para el mezclado, la medición de las cantidades de cemento se la debe efectuar en peso, los agregados en peso húmedo y el agua en peso o volumen.
- Se deben efectuar las correcciones necesarias en las dosificaciones mediante mezclas de prueba en obra, para determinar el revenimiento deseado.
- Se deben cumplir las diferentes especificaciones y normas en cuanto al control de calidad, explotación, almacenamiento de los materiales, dosificaciones, fabricación y curado del concreto.

- Los resultados de la investigación sólo pueden ser aplicados cuando se utilice los agregados del río San Juan del Oro Localidad de El Puente, cemento El Puente IP-30, agua potable de dicha comunidad para el mezclado y curado del concreto. La utilización de agregados se limita al yacimiento considerado.

6.12. Recomendaciones para futuras investigaciones

Los productos de un proceso de investigación científica no son estáticos y sólo pueden ser corroborados o refutados con otras investigaciones. En consecuencia, la continuidad de este tipo de trabajos es un factor fundamental para lograr más y mejores resultados.

El presente trabajo es un inicio de la investigación de las características de los agregados del río San Juan del Oro Localidad de El Puente y su aplicación en la producción de hormigones, sin embargo, la aplicación de los resultados se limita al banco de materiales, condiciones y especificaciones utilizadas.

Este trabajo debe ser complementado con otras investigaciones en las que se consideren otros factores tales como: tipo de cemento, tamaño máximo del agregado, asentamiento, tiempo de mezclado, etc.

Finalmente, cualquier investigación que se refiera a estos temas se recomienda realizarlos con estricto rigor científico, ya que en la producción de concretos interviene una diversidad de factores y el no considerar a uno de éstos provocaría resultados no confiables.