

**ASPECTOS
GENERALES**

1. ASPECTOS GENERALES

1.1. Introducción

A lo largo del tiempo, el ser humano ha modificado su entorno para adaptarlo a sus necesidades. Con este propósito han sido utilizados diversos materiales naturales que, con el paso del tiempo y el desarrollo de la tecnología, se han ido transformando en distintos productos, mediante procesos de manufactura de creciente desarrollo.

Hasta la fecha se han presentado diferentes adiciones, técnicas, sustracciones a la mezcla de hormigón con el objeto de mejorar su comportamiento, abaratar el costo y aumentar la resistencia del mismo.

El hormigón es un material compuesto por “aglomerados y aglomerantes”, los aglomerados están compuestos por agregados pétreos que permite formar una pasta moldeable consistente y los aglomerantes están compuestos por agua y cemento, esta combinación reacciona químicamente logrando así el endurecimiento y las propiedades mecánicas del hormigón.

En nuestro medio el hormigón es el material principal utilizado en la construcción de obras civiles, esto se debe a sus propiedades mecánicas del mismo ya que es capaz de resistir grandes esfuerzos a compresión.

Pero llama la atención la existencia de vacíos en el hormigón, en especial en hormigones de consistencia seca, esta es una de las desventajas del mismo, que hace que la resistencia del hormigón se vea comprometida, además del uso de mayor cemento para alcanzar resistencias deseadas.

1.1.1. El problema

La consolidación del concreto es la operación por medio del cual se trata de densificar la masa, todavía blanda, reduciendo a un mínimo la cantidad de vacíos. Estos vacíos en la masa provienen de varias causas, de las cuales las dos más importantes son:

- el llamado aire atrapado

- y las vacuolas producidas por la evaporación de parte del agua de amasado.

El aire atrapado es consecuencia inevitable del manejo de la propia masa blanda de concreto que, al ser mezclada, transportada y colocada, incorpora estos volúmenes de aire en su interior. La evaporación de parte del agua de amasado se genera porque no toda ella toma parte en la reacción con el cemento. En realidad, esa masa de agua reactiva solo vienen a ser un poco más del 25 % en peso del cemento. El resto del agua no se combina químicamente, sino que cumple funciones de lubricación favoreciendo la trabajabilidad. Ese exceso de agua, y el aire atrapado, es lo que tratamos de eliminar cuando compactamos el hormigón recién colocado. El agua no reactiva que pueda quedar en el interior de la masa no participa de la función resistente del hormigón, y si se deseca, produce vacíos en forma de burbujas o de canales. Esos vacíos internos son, además de volúmenes sin resistencia mecánica, puntos débiles para la durabilidad.

Para disminuir los vacíos del hormigón se podría estudiar las siguientes alternativas:

- Autocompactantes
- Vibrado.
- Revibrado.

1.1.2. Formulación

El planteamiento de este trabajo de investigación surge de la siguiente pregunta:

¿Cómo reducir los espacios vacíos del hormigón?

La consolidación no es más que el apisonamiento del hormigón y puede ser elaborado química, manual o mecánicamente, para eliminar el aire atrapado en la mezcla y además ayudar al hormigón a amoldarse a los diferentes encofrados y mejorar su resistencia.

1.1.3. Sistematización

Para eliminar los espacios vacíos del hormigón se estableció el uso de productos o técnicas constructivas como:

- El uso de aditivos.
- Técnicas de vibrado.

Variables independientes

Colocación del hormigón en obra.- se debe tener en cuenta la colocación del hormigón en obra, ya que si se hace de la manera incorrecta, puede llevar a diferentes problemas como la segregación y la incrustación de aire en el mismo, problemas que se pueden mitigar, con un vaciado cuidadoso colocándolo lo más cerca de su posición final.

Vibrado.- Durante el mezclado y vaciado, el concreto atrapa grandes cantidades de aire formando espacios vacíos u hormigueros, los cuales restan la resistencia del hormigón, para lo cual; es **fundamental eliminar el aire atrapado con una adecuada operación de consolidación, compactación o vibrado.**

Relación agua cemento.- Con menores relaciones a/c, la concentración creciente de granos de cemento en la pasta deja menos espacio entre ellos para ser ocupados por el agua, al estar más unidos unos con otros. En resumen, hay mayor espacio entre los granos de cemento de la pasta a medida que aumenta la relación agua – cemento.

Granulometría y morfología de los agregados.- El tamaño de las partículas y sus acabados influyen en el acomodo de las mismas en el hormigón, ocasionando mayores espacios si estas provienen de materiales chancados y menores si son de canto rodado.

Curado y fraguado.- Con el fin de obtener un eficiente bloqueo de los poros capilares, los granos de cemento deben hidratarse. Para esto es indispensable proceder al curado del hormigón, que permite controlar su humedad y temperatura, después de su colocación y operaciones de terminación. Cuanto menor es la relación a/c, menor es el tiempo requerido de hidratación para cerrar los vacíos existentes entre los granos de cemento lo suficiente para cerrar los vacíos existentes entre ellos.

Mezclado.- El proceso de manipulación de los materiales en el proceso de mezclado es influyente en la incrustación de aire en el hormigón, pudiéndose realizar éste de

manera manual o mediante mezcladoras mecánicas, a mayores energías de mezclado, mayor incrustación de aire en la mezcla.

Encofrado.- Los materiales y formas de encofrado permiten que el hormigón se acomode de mejor o ineficiente manera en los espacios que éste debe ocupar; materiales de encofrado como la madera hacen que se deba tener un mayor cuidado en el acomodo del hormigón, y formas prismáticas del encofrado pueden producir espacios vacíos, en el cual se debe tener cuidado en el momento de vaciar y acomodar el hormigón.

Alternativas de solución

De las alternativas de solución planteadas en el punto 1.1.1., para solucionar los espacios vacíos en el hormigón, se realizará el análisis de cada una de estas soluciones:

1) Autocompactantes:

Para la obtención de hormigones autocompactantes, se emplea el uso de aditivos específicos, que son reductores de agua de alto rango. Los hormigones autocompactantes son extremadamente fluidos, cohesivos y no se segregan, permitiendo eliminar vacíos con estas nuevas propiedades que se le añade al hormigón.

Es una alternativa a tomar en cuenta, pero debido a su costo en nuestro medio, se la descartará.

2) Vibrado:

El vibrado se realiza para compactar el hormigón, ya que la vibración permite llenar los vacíos, expulsando el aire atrapado y parte del exceso de agua; contribuyendo de esta manera a la consolidación de los materiales y a la mejora de la resistencia del hormigón ya que se evita los vacíos.

Esta técnica es muy usada en nuestro medio, y contribuye a la técnica del revibrado.

3) Revibrado:

Se denomina revibrado a la acción de volver a vibrar el hormigón en un tiempo determinado, con el fin de eliminar espacios vacíos y mejorar su resistencia.

Se acostumbra vibrar el hormigón inmediatamente después de la colocación, de modo que la consolidación generalmente se completa antes de que el hormigón se haya endurecido (vibrado); sin embargo, para asegurar la buena unión entre capas, la capa superior de la capa inferior debe ser revibrada siempre y cuando la capa inferior pueda alcanzar el estado plástico; pueden eliminarse así, grietas de asentamiento y efectos internos de sangrado. De esta exitosa aplicación del revibrado surge la cuestión del uso general del revibrado.

Esta técnica es ignorada debido a su vago o escaso conocimiento.

Alternativa seleccionada

De las alternativas planteadas, se define como alternativa de estudio la tercera opción, el revibrado del hormigón para la eliminación de vacíos, además de hacer conocer esta técnica, en favor de la resistencia del hormigón.

1.2. Objetivos

El presente trabajo de investigación tiene los siguientes objetivos.

1.2.1. General

- Determinar el intervalo de tiempo más eficaz de revibrado, es decir volver a vibrar el hormigón, para incrementar su resistencia a compresión simple, a través de eliminar los espacios vacíos, con la aplicación de la técnica del revibrado externo, con mesa vibradora.

1.2.2. Específicos

- Evaluar los efectos provocados por la eliminación de vacíos en el hormigón.
- Comparar la densidad de un hormigón patrón con la de un hormigón revibrado.
- Comparar resistencias a compresión del hormigón patrón con el hormigón revibrado.
- Generar una ecuación empírica que permita determinar la resistencia del hormigón en función al intervalo de tiempo de revibrado.

- Generar una ecuación empírica que permita determinar la eliminación de vacíos en función al intervalo de revibrado.
- Conocer acerca del uso de la técnica del revibrado del hormigón.
- Identificar las aplicaciones del hormigón revibrado, en función a sus características físicas y mecánicas, de manera que sea posible ser usado en obra como material de construcción.

1.3. Justificación

Las razones por las cuales se plantea el trabajo de investigación son las siguientes:

1.3.1. Teoría

El trabajo de investigación propone en función de teorías existentes, hacer conocer innovaciones tecnológicas, para enriquecer conocimientos en los procesos de diseño de mezclas y su desarrollo mismo.

1.3.2. Metodología

El estudio está basado en una dosificación de consistencia seca con material chancado, a partir del cual, de manera experimental se comparará la eliminación de vacíos y los incrementos de resistencia para los intervalos de revibrado externo, en mesa vibradora. Para ello se va a elaborar probetas estandarizadas con una dosificación patrón con resistencia a la compresión de 210 Kg/cm^2 , a las que se va a revibrar en la mesa vibradora, con un mismo total de vibración, pero en diferentes intervalos de tiempo, es decir a los 30, 60, 90 [min] hasta el tiempo inicial de fraguado determinado por el ensayo del aparato de Vicat.

1.3.3. Práctica

Prácticamente al eliminar los espacios vacíos, a través del revibrado, nos brindara un hormigón más compacto, y con propiedades de resistencia mejores a compresión, que al del hormigón patrón.

1.3.4. Académica

El estudio de la técnica del revibrado del hormigón implica la realización de ensayos entrando al campo de la resistencia de los materiales. Para verificar la eficiencia del revibrado y su comportamiento en probetas sometidas a compresión simple.

1.3.5. Conceptual

Material compuesto.- Los materiales son compuestos solo cuando cumplen las siguientes características:

- Cuando están formados por dos o más componentes distinguibles físicamente y separados mecánicamente.
- Cuando presentan varias fases químicamente distintas completamente insolubles entre si y separados por una interface.
- Cuando sus propiedades mecánicas son superiores a la simple suma de las propiedades de sus componentes.

No pertenecen a los materiales compuestos, aquellos materiales polifásicos; como las aleaciones metálicas, en las que mediante un tratamiento térmico se cambian la composición.

El hormigón es un [material compuesto](#) empleado en construcción formado esencialmente por un [aglomerante](#) al que se añade: partículas o fragmentos de un [agregado](#), [agua](#) y [aditivos específicos](#).

La principal característica estructural del hormigón es que resiste muy bien los [esfuerzos de compresión](#), pero no tiene buen comportamiento frente a otros tipos de esfuerzos ([tracción](#), flexión, cortante, etc.), por este motivo es habitual usarlo asociado a ciertas [armaduras](#) de [acero](#), recibiendo en este caso la denominación de [hormigón armado](#), u hormigón pre-reforzado

La norma A.S.T.M. “las normas A.S.T.M. las usan los individuos, compañías y agencias en todo el mundo. Los vendedores y compradores incorporan normas a sus contratos; los científicos e ingenieros las usan en sus laboratorios y oficinas; los

arquitectos y diseñadores las usan en sus planos; las agencias gubernamentales hacen referencia a ellas en códigos reguladores y leyes; y muchos consultan para obtener orientación sobre muchos temas.

1.1.1. Espacial

Este estudio o trabajo de investigación, en el proceso de recolección de datos experimentales, fue desarrollado en las instalaciones del laboratorio de suelos y hormigones de la “Universidad Autónoma Juan Misael Saracho”, para luego procesar los mismos en gabinete.

1.1.2. Temporal

El tiempo estimado en que se realizó el estudio para reducir vacíos en el hormigón con el revibrado fue de 18 semanas que corresponden al primer semestre 2016.

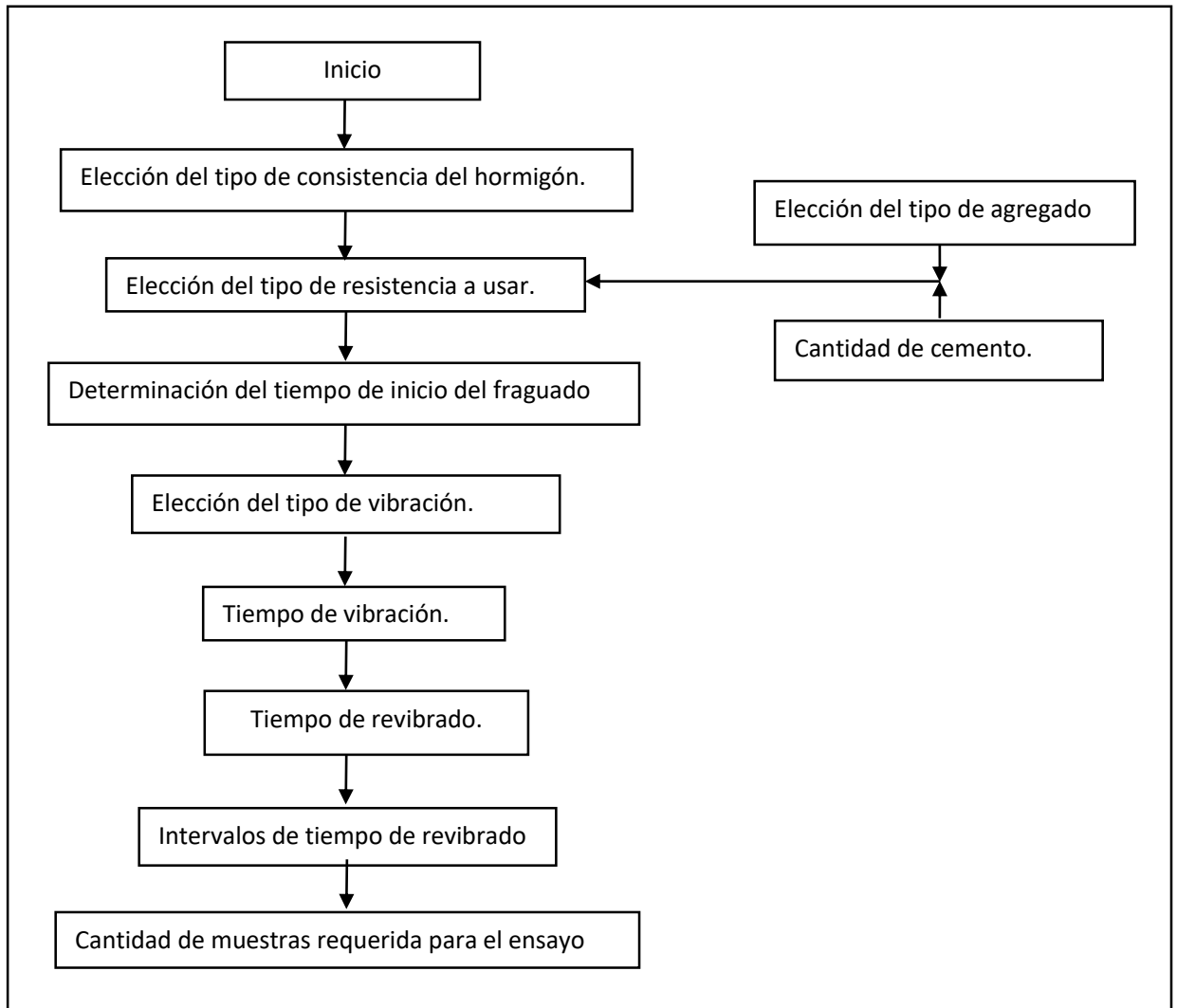
1.4. Alcance del estudio

1.4.1. Tipo de estudio

El estudio se rige en el diseño de un hormigón convencional para uso estructural, basados en los ensayos de A.S.T.M. para una mezcla de hormigón de consistencia seca ($slum = 5 \pm 2$ cm) y resistencia a la compresión de 210 Kg/cm^2 , con agregados chancados provenientes de la cuenca del río Tolomosa y cemento “El Puente IP-30”, a la cual se le aplicó la técnica del revibrado en una mesa vibradora.

Para realizar el estudio del hormigón revibrado, esta técnica involucra variables que son determinantes, sin las cuales no se podría realizar el trabajo. El siguiente flujograma muestra las variables en la técnica del hormigón revibrado

Figura N° 1. Flujograma de estudio.



Fuente: Elaboración propia.

Al tratarse de un estudio de vibración en el hormigón, necesariamente tendrán que ser hormigones de consistencia seca. La norma ASTM C138 indica se puede usar el método de vibración con hormigones que tengan desde $0 < \text{slum} < 10(\text{cm})$. Para el presente trabajo se elegirá un revenimiento de proyecto de $\text{slum} = 5(\text{cm})$ por considerar el siguiente criterio: $\text{slum} = 5 \pm 2(\text{cm})$.

A partir de estas variables y el hormigón patrón, es que se hace el revibrado en la mesa vibradora, permitiendo determinar la cantidad de vacíos eliminados y las resistencias alcanzadas, realizando una curva de la cual se extraerá el intervalo recomendado.

Adelanto del proceso

Revibrado del hormigón.- Una vez obtenida la dosificación patrón en el peso y colocado en probetas, se procederá a revibrar externamente en mesa vibradora, en intervalos de tiempo progresivos, con el mismo tiempo e intensidad de vibrado, hasta alcanzar el tiempo inicial de fraguado, y determinar sus nuevas propiedades, es decir nuevos espacios vacíos y resistencia a compresión.

Elaboración de probetas.- La medida de la resistencia a compresión se realizó mediante pruebas estandarizadas. Por lo tanto las probetas fueron elaboradas en cilindros de 15cm de diámetro de 30cm de alto.

Rotura de probetas.- La información de los datos para la rotura de probetas se basó en el procedimiento probabilístico de muestreo aleatorio simple, es decir cada medición tendrá una muestra de 10 probetas.

Espacios vacíos.- La determinación de los espacios vacíos se realizó a través del peso específico y contenido de humedad, para los diferentes intervalos de revibrado y poder analizar en cuánto influye en la resistencia del hormigón.

Con la finalidad de estudiar la resistencia mecánica de compresión se sometió las probetas a pruebas a los 7 y 28 días de edad.

1.4.2. Hipótesis

La concepción de las hipótesis se basa en estudios anteriores realizados por Adam Neville y publicado en su texto “tecnología del concreto” en el año 1975, lo cual nos permite plantear lo siguiente:

- El revibrado del hormigón, incrementará su resistencia en un porcentaje aproximado al 14%, a través de la eliminación de espacios vacíos y la prolongación de la producción de hidratos a través de volver a vibrar el hormigón.

- El revibrado eliminara espacios vacíos del hormigón en un porcentaje aproximado a 30% en relación con el porcentaje de vacíos del hormigón patrón.

1.4.3. Restricciones y limitaciones

El campo de trabajo de la investigación estuvo delimitado a estudiar la característica mecánica de resistencia a compresión del hormigón y su característica física de peso propio y espacios vacíos, a través del diseño de la mezcla basada en los ensayos de la norma A.S.T.M. Para una resistencia mecánica de 210Kg/cm^2 , en hormigón de consistencia seca con material chancado, siendo el punto de partida al cual las muestras se someterán al revibrado externo con mesa vibradora.

El procesamiento de datos tendrá como fin presentar un rango de tiempo en el cual el revibrado con mesa vibradora brinde mayores beneficios.

MARCO

TEÓRICO

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Generalidades

La construcción de una obra, actualmente, tiene un costo elevado porque los materiales son cada vez más caros. Esto se debe a que los insumos pasan por un proceso complicado y oneroso desde la extracción de la materia prima, pasando por la utilización de un componente energético hasta la culminación del insumo mismo.

La obtención de un hormigón de calidad en el cual **resistencia-costo** sea la más óptima es por lo tanto el más adecuado, las posibilidades son las siguientes.

Tabla N°1. Comparación del uso del cemento

	CONDICIONANTE	INSUMO	CONDICIONANTE	RESULTADOS	FACTIBILIDAD
A	MAYOR	CEMENTO	MAYOR	RESISTENCIA	CONDICIONADA ECONOMICAMENTE
A	MENOR	CEMENTO	MAYOR	RESISTENCIA	VIABLE ECONOMICAMENTE

Fuente: Elaboración propia.

El hormigón es un material de construcción masivamente utilizado en nuestro medio, porque se amolda a las exigencias más caprichosas, obteniendo resultados arquitectónicos de gran belleza. Desde el punto de vista de la resistencia, es un material bondadoso que está sometido a diferentes esfuerzos. El hormigón combinado con otros materiales de construcción se convierte en un material realmente útil, ya que absorbe diferentes solicitaciones. Su propiedad más importante es la resistencia a la compresión, en el cual realmente es todo un experto.

La tecnología del hormigón en estos últimos tiempos ha propiciado grandes avances en el incremento de la resistencia a la compresión, llegando incluso hasta los 100MPa (1000kg/cm²), esto con la adición o la inclusión de aditivos, escorias de alto horno, micro sílice y otros que van mejorando la resistencia de la probeta construida.

Bolivia como es un país subdesarrollado, en lo que más se exige a este material es en el conocimiento exacto de sus componentes, porque en nuestro medio prima la economía. Por lo tanto, sólo se puede hacer uso de los propios recursos que se tiene en el lugar.

2.2. Revibrado del hormigón.

2.2.1. Introducción.

Se denomina revibrado, a la acción de volver a vibrar el hormigón en un tiempo determinado, con el fin de mejorar su resistencia. Para que el vibrado proporcione sus máximos beneficios, la consistencia del hormigón debe ser seca o ligeramente plástica. Si la plasticidad es excesiva, el vibrado no proporciona ningún efecto apreciable de consolidación y, en vez de mejorar la calidad del hormigón, puede producir su segregación. En términos generales, no deben vibrarse hormigones cuya consistencia medida por el asentamiento del cono de Abrams exceda a 10 cm.

2.2.2. Antecedentes.

En las centrales hidroeléctricas, según la C.F.E., resulta particularmente aplicable en el colado de grandes volúmenes de hormigón, que necesariamente deben efectuarse por capas relativamente delgadas con el objeto de evitar la segregación, tal como se acostumbra en la construcción de grandes presas de hormigón. En este caso, una de las funciones importantes del personal de inspección consiste en verificar que el hormigón previamente colocado y compactado en la capa subyacente se encuentre moldeable (antes del fraguado inicial) en el momento de ser cubierto por una nueva capa, de manera que produzca fusión de ambos hormigones al ser vibrados conjuntamente.

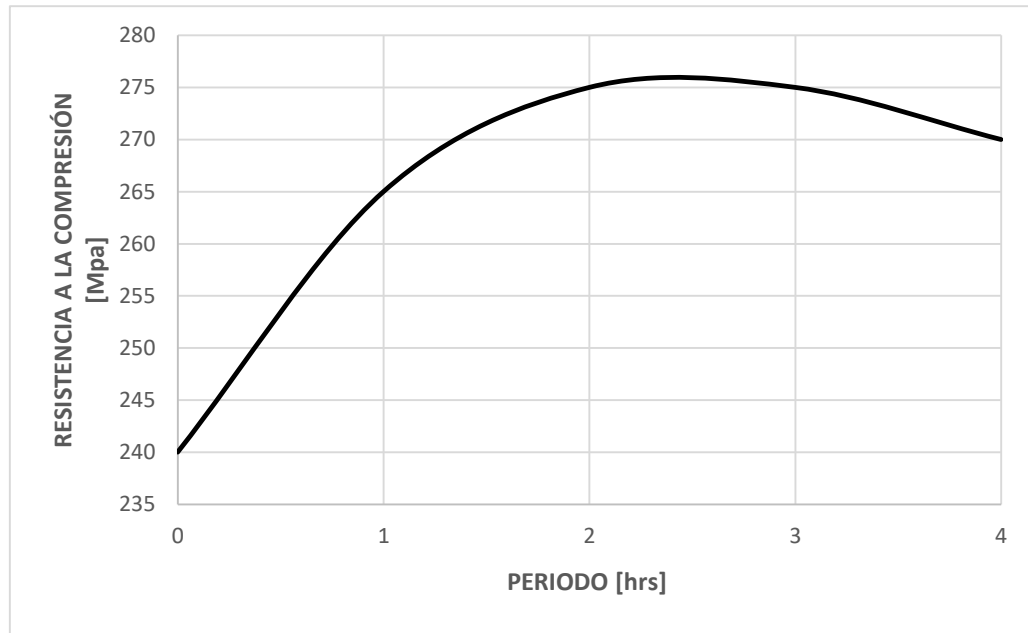
2.2.3. Estudios anteriores del revibrado.

Se acostumbra a vibrar el hormigón inmediatamente después de su colocación, de modo que la consolidación generalmente se completa antes de que el hormigón se haya endurecido. Todas las secciones precedentes se refieren a este tipo de vibración. Sin embargo se ha mencionado que para asegurar la buena unión entre capas, la parte superior de la capa inferior debe ser revibrada siempre y cuando la capa inferior pueda aún alcanzar el estado plástico, pueden eliminarse así, grietas de asentamiento y efectos

internos de sangrado. De esta exitosa aplicación del revibrado surge la cuestión del uso general del revibrado. (Neville A. M. Tecnología del concreto 1975).

En base a los resultados experimentales, se ve que el hormigón puede revibrarse exitosamente alrededor de cuatro horas desde el tiempo de mezclado. Se ha encontrado que el revibrado 1 ó 2 horas después de su colocación, tiene como resultado un incremento en la resistencia a la compresión a los 28 días, como se muestra en la figura.

Figura N°2. Resistencia a la compresión en el periodo de revibrado.



Fuente: Neville A. M. "Tecnología del concreto" (1975)

La comparación se basa en el mismo periodo total de vibración, aplicado inmediatamente después de la colocación o parcialmente en este momento y parcialmente después de un tiempo especificado. Se han observado incrementos en resistencia aproximadamente de 14%, pero los valores reales pueden depender de la trabajabilidad de la mezcla y los detalles de procedimiento. En general, el mejoramiento en la resistencia es más pronunciado en edades tempranas y es mayor en concretos propensos a sangrado fuerte; ya que el agua atrapada se expelle con la vibración. Por la misma razón, el revibrado mejora grandemente la unión entre el hormigón y el refuerzo. También es posible que, en parte, el aumento en la resistencia

se deba al relajamiento de los esfuerzos de contracción plástica alrededor de las partículas del agregado. (Neville A. M. “Tecnología del concreto” 1975).

2.2.4. Efectos del revibrado.

El revibrado induce de hecho a una alteración en los procesos físico-químicos que se desarrollan al interior de la masa de hormigón. Asimismo, dependiendo del lapso de tiempo en que se produzca la intervención intencionada, puede inducir a incrementos o decrementos en la resistencia a compresión del hormigón. El fenómeno de incremento en la resistencia, se basa en la siguiente teoría:

La perturbación producida por el revibrado acelera y prolonga la producción de los hidratos con el consiguiente aumento de resistencia. (Neville A. M. “Tecnología del concreto” 1975).

El fundamento de esta teoría surge del análisis de las reacciones físico-químicas (ocurridas en el proceso de hidratación en la masa de hormigón), que se alteran por la revibración, ya que al realizarse después de una primera cristalización, aumenta la compacidad del magma vítreo, borrando secuelas del primer compactado. De esta manera, se reagrupan y reacomodan los componentes granulares, entre los cuales están las partículas de cemento, originando un nuevo proceso de hidratación que conlleva un adicional endurecimiento que permite la soldadura de los enlaces rotos en la cristalización primaria.

Los nuevos cristales que se formaron principalmente en la zona dislocada, debido a la revibración se constituyen en centros generadores de cristalizaciones complementarias. Este hecho favorece la proliferación de nuevos cristales que nutren y refuerzan los enlaces rotos de una manera más completa, en la medida en que la soldadura de los enlaces rotos y la germinación de nuevos cristales compensen las dislocaciones primarias, se obtendrá un incremento de resistencia a compresión. (Neville A. M. “Tecnología del concreto” 1975).

2.3. Propiedades fundamentales del hormigón.

Fotografía N°1. Hormigón endurecido mostrando las partes que lo componen



Fuente: Elaboración propia.

El hormigón es un material compuesto por materias primas de uso común en el ámbito de la construcción. Al combinarse todos los materiales grava, arena, agua y algún aditivo con el cemento dan como resultado este noble material que es el hormigón.

2.3.1. Propiedades del hormigón fresco.

Fotografía N°2 hormigón fresco en un molde.



Fuente: Elaboración propia.

El hormigón fresco es un material esencialmente heterogéneo, puesto que en este coexisten tres fases: la sólida (áridos y cemento), la líquida (el agua) y la gaseosa (aire incluido). Cabe aclarar que la fase sólida es heterogénea entre sí, ya que los agregados son de naturaleza y dimensiones variables. El comportamiento del hormigón en estado fresco interesa en toda la etapa constructiva desde que se elabora hasta que resulta finalmente colocado, compactado y en reposo dentro del espacio cimbrado.

Es conveniente precisar la diferencia que existe entre el intervalo que corresponde al hormigón blando y al hormigón moldeable. En ese sentido, el intervalo de hormigón blando abarca desde la elaboración de mezcla del hormigón, hasta el inicio o principio de rigidez, en este intervalo de tiempo es donde mejor se puede manipular el hormigón, desde el transporte, colado y compactado en el lugar definitivo; es decir, los moldes. En cambio, el intervalo de concreto moldeable corresponde al mismo lapso anterior, pero ampliando hasta el acontecimiento del fraguado inicial, lo que significa que el hormigón se mantiene apto para ser moldeado.

Por lo tanto, se tiene la posibilidad de volver a compactar nuevamente con el propósito de disminuir los espacios con contenido de aire, y también en la parte constructiva de unir una capa con otra capa, con la finalidad de conseguir una continuidad en toda la estructura proyectada. Para fines prácticos, el hormigón puede ser manejable antes del fraguado inicial, como en la presente investigación para darle una nueva vibración.

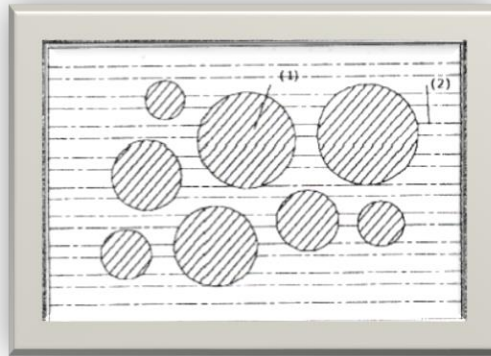
La duración del lapso en el que el hormigón permanece en estado fresco es una característica muy variable que depende de valores intrínsecos que están relacionados con su composición y factores intrínsecos como la temperatura. Se denomina intrínseco al tipo de cemento usado, el agua y los agregados.

En esta etapa el hormigón acepta desplazamientos y deformaciones con pequeños aportes de energía externa; en este caso la energía externa proviene del vibrador. Las fuerzas que resisten al movimiento provienen del rozamiento entre partículas y a la atracción que existe entre ellas.

El hormigón hidráulico convencional, recién elaborado, es un material que en pocas horas se transforma y cambia de estado, desde su condición inicial de masa blanda uniforme hasta la de cuerpo rígido que toma la forma del molde en que se coloca, después continúa evolucionando hasta adquirir sus propiedades definitivas como cuerpo duro y resistente.

El proceso de solidificación y endurecimiento del concreto es el resultado de las reacciones químicas que se producen entre el cemento y el agua, reacciones que de manera global y de principio a fin corresponden al proceso de hidratación del cemento. Debido a que la hidratación del cemento es una reacción de carácter exotérmico, también es posible seguir su desarrollo mediante la determinación del calor que se produce y libera en el curso de la misma. El proceso de hidratación y liberación del calor, en la pasta de cemento, tiene las siguientes fases principales:

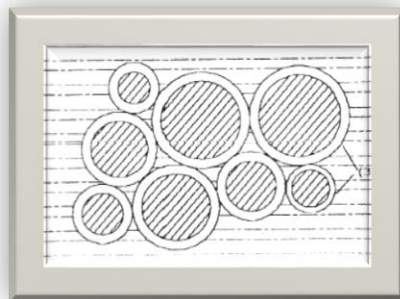
Figura N°3. Fase a)



Fuente: Comisión federal de electricidad (1994)

Fase a) los granos de cemento (1) se hallan inmersos en agua (2) en la pasta de cemento recién mezclado, existiendo un estado de disolución que produce una intensa reacción exotérmica inicial.

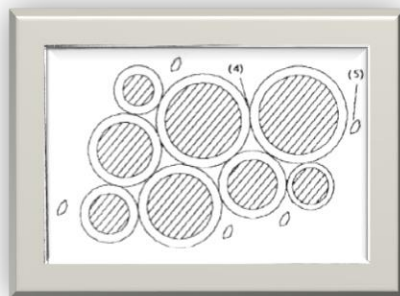
Figura N°4. Fase b)



Fuente: Comisión federal de electricidad (1994)

Fase b) al cabo de 10 minutos, aproximadamente, comienza a formarse una película gelatinosa alrededor de los granos (3), que inhibe su hidratación durante una o dos horas y que es el periodo “durmiente”.

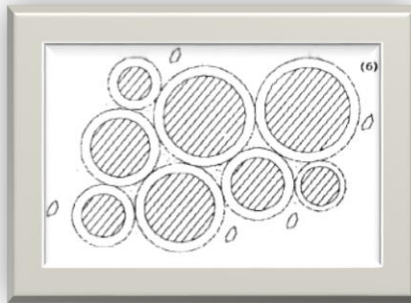
Figura N° 5. Fase c)



Fuente: Comisión federal de electricidad (1994)

Fase c) al continuar la hidratación de los granos del cemento, aumenta el espesor de la película creando puntos de contacto (4) e inmovilizando los granos. Se inicia la rigidización y aparecen cristales de hidróxido de calcio (5).

Figura N°6. Fase d)



Fuente: Comisión federal de electricidad (1994)

Fase d) se desarrollan filamentos tubulares en la película gelatinosa (6) que al incrementarse crean una trama (gel de cemento) que aglutina los granos en proceso de hidratación y comunica resistencia mecánica a la pasta endurecida. Las propiedades más importantes del hormigón en estado fresco incluyen: consistencia, homogeneidad, peso específico, trabajabilidad, docilidad, compactación, exudación y tiempo de fraguado.

2.3.1.1. Consistencia.

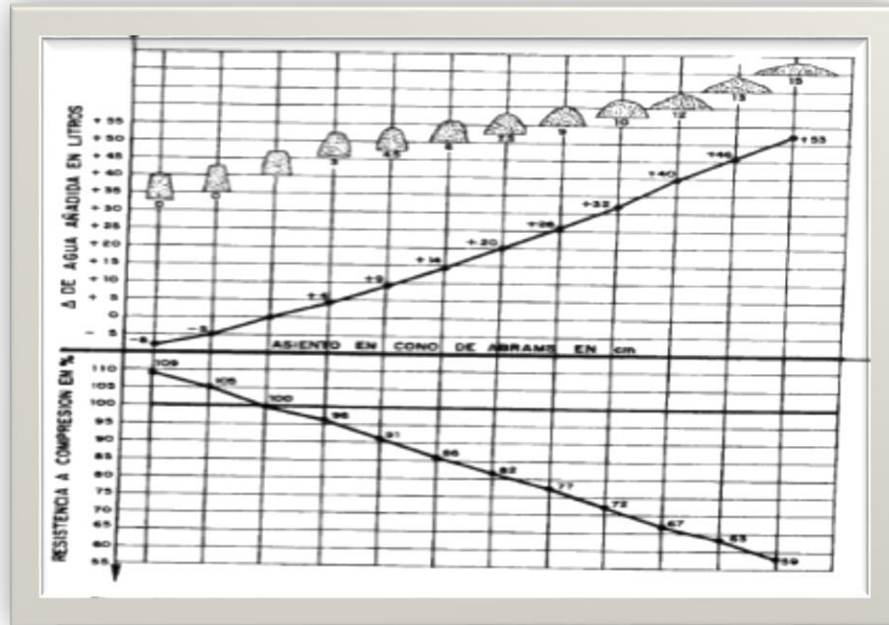
Consistencia es la menor o mayor facilidad que tiene el hormigón fresco para deformarse, esto varía según: cantidad de agua de amasado, tamaño máximo, granulometría y forma de los áridos; sin embargo, la mayor influencia es del agua de amasado.

Fotografía N°3. Hormigón fresco, ensayo del cono de Abrams.



Fuente: Elaboración propia.

Figura N°7. Influencia que tiene el agua en la consistencia del hormigón y en la resistencia.



Fuente: Jiménez Montoya “Hormigón armado” (1990)

a. Cono de Abrams (ASTM C 143)

En el ensayo del cono de Abrams se verifica la cohesividad como se puede apreciar en los siguientes gráficos:

Fotografía N°4. Mezcla cohesiva.



Fuente: Elaboración propia.

Fotografía N°5. Mezcla sin cohesividad.



Fuente: Elaboración propia.

El procedimiento es aplicable a hormigones preparados con áridos de tamaño máximo absoluto de 5cm. El cono de Abrams es un molde troncocónico que es rellenado 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.

b. Revenimiento

El equipo necesario consiste en un molde troncocónico de dimensiones 100x200x300mm de plancha de acero galvanizado con espesor mínimo de 1,5mm, soldadas al molde se encuentran 2 asas en el tercio superior de la altura y dos pisaderas en su parte inferior para que el operador pueda afirmar el cono contra la plancha de apoyo durante el llenado.

Fotografía N°6. Equipo para realizar el ensayo de Revenimiento.



Fuente: Elaboración propia.

Para compactar el concreto se utiliza una varilla pisón, la cual será una barra cilíndrica lisa de acero de 16mm de diámetro y 6mm de longitud con sus extremos semiesféricos.

c. Procedimiento.

El procedimiento para realizar el ensayo de revenimiento consiste en los siguientes pasos:

i. Extracción y preparación de las muestras.

Fotografía N°7. Hormigón homogéneo.



Fuente: Elaboración propia.

ii. Acondicionamiento del equipo.

- a) Antes de iniciar el ensayo se verifica que tanto el molde y sus accesorios se encuentren limpios y húmedos (solo con agua).
- b) Se coloca el molde sobre la plancha de apoyo horizontal.

iii. Tiempo de operación.

Las operaciones de llenado del molde, seguida de su retiro, levantándolo como se describe a continuación, deben efectuarse en un tiempo no superior a tres minutos.

iv. Llenado del molde.

- a) El operador debe pararse sobre las pisaderas, afirmando el molde contra la plancha de apoyo, de manera que evite cualquier movimiento durante el llenado.

- b) Se llena el hormigón por ensayar mediante tres capas de aproximadamente igual volumen.
- Se apisona cada capa con 25 golpes de la varilla pisón, distribuidos en toda la sección.
 - Se apisona la capa inferior en toda su profundidad, cuidando de no golpear la plancha de apoyo. Se da, aproximadamente, la mitad de los golpes alrededor del perímetro; con la varilla pisón ligeramente inclinado y luego se sigue dando golpes con la varilla vertical, acercándose al centro en forma espiral.
 - Se apisonan las capas media y superior en todo su espesor; de tal modo que la varilla pisón penetre apenas la capa subyacente. Durante el apisonado de la última capa, mantenga permanentemente un exceso de hormigón por sobre el borde superior del cono, sin sobrepasar el número de golpes estipulados.
- c) Terminada la compactación de la capa superior, enrasar la superficie con un movimiento de acerrado y rotación de la varilla pisón, apoyándola en el borde superior del molde.
- d) Se retira del área adyacente al molde, todo el hormigón que se hubiese derramado.
- e) Levantamiento del molde.
- Inmediatamente después de terminar el llenado del molde, levantarlo evitando cualquier perturbación o golpe, tanto al cono como a la base, a fin de no alterar la medida.
 - Para levantar, cargue las asas con la mano dejando libres las pisaderas.
 - Levante verticalmente el molde en forma suave, sin originar desplazamientos laterales ni movimientos de torsión.
- f) Medición del asentamiento.

Fotografía N°8. Medición del revenimiento.



Fuente: Elaboración propia.

- Una vez levantado del molde, colóquelo en posición invertida a un costado del hormigón moldeado.
 - Inmediatamente, se mide la disminución de altura que ha experimentado la cara superior del hormigón respecto del borde superior del molde colocado a su costado, con aproximación de 0,5[cm]. Con una regla graduada en [mm] mida aproximadamente, en el eje original de moldeo de la mezcla, con la visión del operador, en dirección perpendicular a la regla de medición.
- g) Si el hormigón moldeado se inclina decididamente hacia un lado o sufre desprendimientos parciales de su masa, repita el ensayo utilizando otra porción de hormigón de la misma muestra. En caso de que por segunda vez se presentan algunos fenómenos descritos, informe que el hormigón no es apto para el ensayo de asentamiento, por carecer de plasticidad y cohesión necesarias.

2.3.1.2. Homogeneidad.

La homogeneidad depende del tipo y tiempo de mezclado, del transporte, de la compactación, colocación adecuada, buen amasado, entre otros.

Fotografía N°9. Hormigón en estado fresco.



Fuente: Elaboración propia.

Homogeneidad es la cualidad por la que los diferentes componentes del hormigón aparecen regularmente distribuidos en toda la masa, de manera tal que dos muestras tomadas de distintos lugares de la misma resulten prácticamente iguales.

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

2.3.1.3. Peso específico.

Un dato de gran interés como índice de uniformidad en el transcurso de una obra, es el peso específico del hormigón.

Fotografía N°10. Moldes con hormigón fresco.



Fuente: Elaboración propia.

La variación de cualquiera de los componentes del hormigón repercute en la consistencia, también es indicador de alteración de la granulometría de áridos, del contenido de cemento o del agua de amasado, esto determina las correcciones necesarias. Asimismo, esta propiedad física depende principalmente de los agregados que lo caracterizan.

Como el peso específico o peso unitario es una característica importante, porque es índice de propiedades que influye decisivamente en el uso que se le da. Como es evidente, tal característica del hormigón depende principalmente del peso específico de los agregados que lo integran. En la siguiente tabla se presenta el nivel aproximado que ocupan en la escala de pesos unitarios y sus usos comunes.

Tabla N°2. Peso específico en estado fresco del hormigón.

CLASE DE CONCRETO	PESO ESPECÍFICO EN ESTADO FRESCO	USO COMÚN
	[kg/m ³]	
Baja densidad	300-800	Aislamiento térmico y acústico de muy baja resistencia (menos de 70 [kg/cm ²])
Ligero intermedio	800-1400	Uso no estructural, de baja resistencia de 70-175 [kg/cm ²], aproximadamente
Ligero estructural	1400-1900	Uso estructural de mediana y alta resistencia (175-500 [kg/cm ²]) aproximadamente
Peso normal	2200-2550	Uso no estructural y estructural, desde muy baja hasta muy alta resistencia (menos de 70 hasta 1200 [kg/cm ²]), inclusive más.
Pesado	2600-5500	Blindaje contra radiaciones, contrapesos para puentes levadizos y otras aplicaciones

		especiales, con diversos requisitos de resistencia.
--	--	---

Fuente: Comisión federal de electricidad (1994)

2.3.1.4. Trabajabilidad.

La trabajabilidad depende de la fluidez, la docilidad y del equipo de compactación con que se cuenta.

Fotografía N° 11. Molde en el que se encuentra un hormigón en estado fresco, completamente cerrado por el efecto de la vibración.



Fuente: Elaboración propia.

2.3.1.5. Docilidad.

La docilidad es la aptitud del hormigón de constituirse en una masa con trabazón y tener la facilidad para cerrarse; es decir, debe trabarse sin dejar espacios vacíos. La docilidad es una función de la relación arena-agregado y de la redondez del agregado. Sin embargo, es distinta la consistencia de la docilidad, ya que un hormigón puede ser muy consistente y cerrar con facilidad.

Por otro lado, la docilidad también es la cantidad necesaria para compactar al máximo una mezcla de hormigón. Es una propiedad vital de todo lo que se relaciona con el producto terminado, ya que el concreto debe contar con una trabajabilidad tal que

permita la compactación con densidad máxima, lograda con una energía potencial de acuerdo a lo requerido y en función al tipo de revenimiento.

2.3.1.6. Compacidad.

Se llama compacidad de un árido a la relación entre su volumen real y su volumen aparente. Es decir, cuanto mayor sea su compacidad, menor será el volumen de huecos que deja el árido. Por tanto, será menor la cantidad de pasta de cemento necesaria para rellenarlos.

En estas condiciones se obtendrá un hormigón muy denso, de gran resistencia y más impermeable; es decir muy estable cuando esté endurecido.

La densidad de un hormigón normal con una buena compacidad varía entre valores cercanos a $2300[\text{kg}/\text{m}^3]$ en hormigones frescos.

2.3.1.7. Exudación.

Se define como el ascenso de una parte del agua de mezcla hacia la superficie como consecuencia de la sedimentación de los sólidos. Este fenómeno se presenta momentos después de que el hormigón ha sido colocado en el encofrado. La exudación puede ser producto de una mala dosificación de la mezcla, de un exceso de agua en la misma, de la utilización de aditivos, de la vibración excesiva, o de la temperatura; porque a mayor temperatura, mayor es la velocidad de exudación.

Como una de sus debilidades, la exudación es perjudicial para el hormigón, pues como consecuencia de este fenómeno, la superficie del hormigón durante la colocación de una capa sobre la otra puede disminuir su resistencia, debido al incremento de la relación agua-cemento en esta zona. Debido a este fenómeno se obtiene hormigones porosos y poco durables.

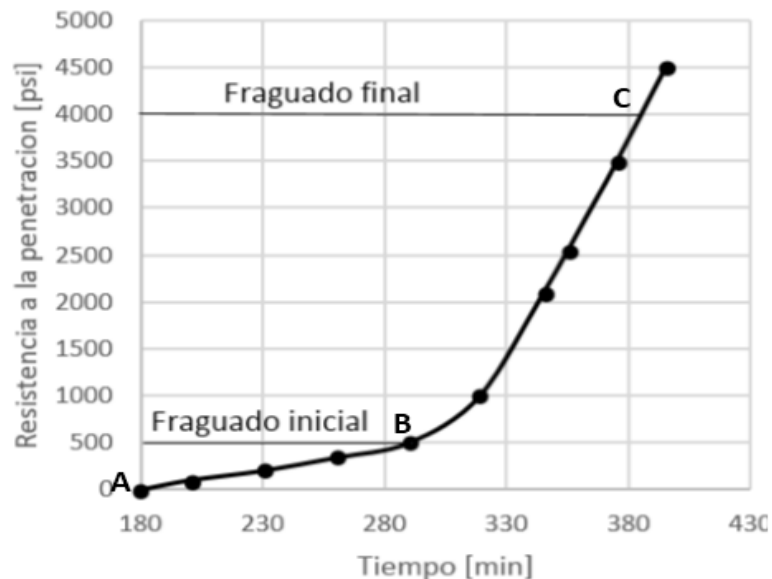
2.3.1.8. Tiempo de fraguado.

Al hormigón recién mezclado se lo considera en estado fresco, mientras conserva suficiente trabajabilidad para ser moldeado; en tanto que el hormigón ya colocado se lo considera como un material ya en curso de endurecimiento progresivo. Para dar el

uso y tratamiento adecuado al hormigón en ambos estados, es necesario conocer sus respectivas características y propiedades, y los factores que la modifican, a fin de poder ajustarlas según convenga. La etapa de fraguado que normalmente dura pocas horas, corresponde al cambio de estado en que el hormigón deja de ser material blando para convertirse en un cuerpo rígido pero frágil; es decir, el concreto recién fraguado es un material solidificado que prácticamente no posee resistencia mecánica. Se considera que la etapa del verdadero endurecimiento o de adquisición de resistencia mecánica, se inicia cuando termina el fraguado y se prolonga durante un lapso que dura meses e incluso años.

Si se presenta el avance del proceso de hidratación del cemento desde sus inicios, por medio de sus efectos de rigidización y endurecimiento del concreto, se obtiene una curva. Según la figura N°8 se marcan tres puntos (A,B,C) sobre la curva de evolución del fraguado, que son decisivos para definir el comportamiento en este aspecto de cada concreto en particular, en condiciones dadas.

Figura N° 8. Tiempo de fraguado.



Fuente: Elaboración propia.

El primer punto (A) define el tiempo de fraguado a partir del tiempo de mezclado en que el hormigón comienza a oponer resistencia a la penetración; es decir, empieza a

adquirir rigidez. El segundo punto (B) corresponde al tiempo en el que el hormigón alcanza una resistencia a la penetración igual a 35 [kg/cm²], valor representativo de rigidez, que por definición de la norma ASTM C403, se designó “fraguado inicial”. Finalmente, el tercer punto (C) marca el tiempo en que el hormigón manifiesta una resistencia igual a 280 [kg/cm²] que a su vez representa a un estado de rigidez identificado como “fraguado final”.

Normalmente, se considera que el hormigón puede ser **moldeado y re moldeado por vibración, en un estado que va más allá de la fase “durmiente”, siempre y cuando no exceda la rigidez que corresponda al fraguado inicial**, pues en este estado la incipiente rigidización se debe fundamentalmente a las películas gelatinosas que recubren los granos de cemento, las cuales se regeneran si son alteradas por un moldeo tardío del hormigón.

No sucede lo mismo cuando el moldeo del hormigón se intenta en un estado de rigidez que rebasa el fraguado inicial, pues en tal caso puede haberse iniciado la formación de filamentos en la costra gelatinosa cuya destrucción es irreversible y afecta al hormigón que se pretende moldear en un estado avanzado de rigidización.

De acuerdo con lo anterior, puede considerarse que el estado fresco del hormigón persiste hasta que se produce el fraguado inicial y que el lapso previo a este, es el tiempo máximo del que se dispone para realizar todas las operaciones correspondientes al mezclado, transporte, colocación y compactación del hormigón en los moldes. Por tanto, es necesario, al referirse al hormigón fresco, examinar los cambios de comportamiento que manifiesta en este lapso y los efectos que dichos cambios puede tener en la realización de estas operaciones.

2.3.2. Propiedades del hormigón endurecido.

Fotografía N°12. Probetas con dimensiones normadas.



Fuente: Elaboración propia.

En esta fotografía, el hormigón se amolda a cualquier forma que se requiera. Entonces, al ir realizando el trabajo de investigación, el hormigón en estado endurecido es consecuencia directa de lo que ocurrió en su estado fresco. Por lo tanto, si se cumplieron todas las normas vigentes, entonces no se tendrá dificultades en el momento de hacer la rotura. Las propiedades más importantes del hormigón endurecido son: peso específico, compacidad y resistencia al desgaste.

2.3.2.1. Peso específico.

El peso específico del hormigón endurecido está en función a los materiales que lo componen; por ejemplo, el tipo de granulometría de los áridos gruesos y finos, del peso específico del cemento usado y del tipo de compactación utilizado. Como en la presente investigación los hormigones fueron revibrados, el peso específico del hormigón subió de 2383 [kg/m³] que corresponde a un hormigón de control normal, hasta un peso específico de un hormigón revibrado de 2437 [kg/m³].

Fotografía N°13. Hormigón endurecido.



Fuente: Elaboración propia.

Se controló el peso de cada probeta que se sometía a la rotura, donde se controlaban las dimensiones del mismo diámetro y altura, para obtener su volumen aparente. El cálculo del peso específico del hormigón fue a través de la siguiente ecuación:

$$\gamma_{\text{hor}} = \frac{\text{PESO DESPUÉS DEL CURADO}}{\text{VOLUMEN}} \quad \text{Ec. (1)}$$

Fotografía N°14. Control de peso y dimensiones geométricas.



Fuente: Elaboración propia.

2.3.2.2. Compacidad.

La compacidad íntimamente ligada al peso específico, depende de los mismos factores que éste, sobre todo del método de consolidación empleado.

Estos métodos tienen por objeto introducir, en un volumen determinado, la mayor cantidad de áridos y al mismo tiempo que los huecos dejados por estos se rellenen con la pasta de cemento, eliminando por completo las burbujas de aire. En la investigación, en los ensayos realizados en el hormigón patrón y revibrado, los resultados de los vacíos fueron los siguientes:

Tabla N°3. Volumen de vacíos.

TIPO	Hormigón patrón	Hormigón revibrado
Volumen de vacíos	7,13%	5,71%

Fuente: Elaboración propia.

Como se aprecia, el porcentaje de vacíos disminuye, entonces también disminuye la porosidad. Pese a este incremento de vibración, la cantidad apreciada de porosidad en el hormigón endurecido no desaparece (ver fotografía). En esta se aprecia la porosidad en un hormigón vibrado y en un hormigón revibrado.

Fotografía N°15. Hormigón vibrado



Fuente: Elaboración propia.

La fotografía N°15 demuestra que un hormigón convencional contiene muchos espacios vacíos. Entonces, estos ocasionan puntos de debilidad a la resistencia mecánica frente a los esfuerzos, además provoca un deterioro más rápido debido a acciones agresivas debido a ataques químicos, porque al contener porosidades se genera vías de penetración de los agentes exteriores.

Fotografía N°16. Hormigón revibrado.



Fuente: Elaboración propia.

La fotografía N°16 demuestra que la porosidad de un hormigón revibrado disminuye. Entonces, una buena compactación no solo proporciona mayor resistencia mecánica frente a esfuerzos, impactos, desgastes, vibraciones; además una mayor resistencia física, como ser efectos de la helada y también resistencia química frente a las acciones agresivas, ya que al contener una cantidad mínima de huecos o porosidades, las vías de penetración de los agentes exteriores son también mínimas.

2.3.3. Características Mecánicas del hormigón.

Se denomina característica mecánica a la resistencia que opone el hormigón en estado endurecido, a toda fuerza externa que hace algún tipo de esfuerzo. Las propiedades mecánicas más importantes son: resistencia a la compresión y resistencia a la tracción.

2.3.3.1. Resistencia del hormigón a compresión.

La característica más importante y la principal medida de calidad estructural es su resistencia a la compresión. Tal característica está íntimamente ligada con el control de calidad de los materiales y el tipo de cemento que se usa.

Otro parámetro muy importante es la relación A/C que es la más significativa e influyente en el resultado del ensayo. Este ensayo fue realizado de acuerdo al método ASTM C-39; los moldes y la prensa para el ensayo son los siguientes.

Fotografía N°17. Prensa hidráulica para las roturas respectivas a compresión.



Fuente: Elaboración propia.

2.3.3.2. Control de calidad.

El control de calidad se refiere al estricto control que requiere la elaboración del hormigón en estado endurecido, ya que existen normas vigentes las cuales indican porcentajes de confiabilidad. De esta manera, se garantiza que los hormigones fabricados satisfagan los intervalos de confianza. A continuación, se presenta la nomenclatura más frecuente usada para el control de los hormigones:

f'_c Resistencia característica.

f'_{cr} Resistencia media.

S_g Desviación estándar.

a) Resistencia característica: f'_c

Medida estadística que tiene en cuenta no solo el valor de la media aritmética f'_{cr} de las roturas de las diversas probetas; sino también la desviación estándar del grupo de

valores. Se define como aquel valor que presenta un grado de confianza del 95%; es decir, que existe una probabilidad de 0.95 que se presenten valores individuales de resistencia de probetas más altos que f'_{cr} .

b) Resistencia media.

Es una medida de posición, la cual es la media aritmética de los n valores de rotura.

c) Desviación estándar.

Medida de dispersión que indica cuan separados están los datos; esta medida depende de las condiciones de ejecución, ya sea en obra o en laboratorio. Según Jiménez Montoya, este valor tiene que ser inferior al 15% y es inaceptable mayor al 25%.

Los cilindros que fueron sometidos al ensayo de compresión se curan en una piscina a temperatura aproximada de 20°C y saturadas con cal con una cantidad de 3[gr/lit] según norma y generalmente por 28 días. Posteriormente, se ensayan en el laboratorio a una tasa de carga especificada.

La resistencia a la compresión obtenida de tales ensayos se conoce como la resistencia del cilindro f'_c y es la principal propiedad especificada para propósitos de diseño. Para garantizar la seguridad estructural es necesario un control continuo que asegure que la resistencia del concreto suministrado coincida satisfactoriamente con el valor especificado por el ingeniero diseñador.

Tabla N° 4. Desviación estándar conocida en obra.

Resistencia especificada a la compresión [Mpa]	Resistencia promedio a la compresión [Mpa]
$f'_c \leq 35[Mpa]$	<p style="text-align: center;">Usar el mayor valor obtenido de las ecuaciones.</p> $f'_{cr} = f'_c + 1,34S_s \qquad \text{Ec. (2)}$

	$f'_{cr} = f'_c + 2,33S_s - 3,5$ Ec. (3)
$f'_c > 35[Mpa]$	<p>Usar el mayor valor obtenido de las ecuaciones.</p> $f'_{cr} = f'_c + 1,34S_s$ Ec. (4) $f'_{cr} = 0,90f'_c + 2,33S_s$ Ec. (5)

Fuente: ACI 318S-05 (2005)

Cuando una instalación productora de hormigón no tenga registros de ensayos de resistencia en obra, se calcula S_s como se aprecia en la siguiente tabla.

Tabla N° 5. Desviación estándar no conocida en obra.

Resistencia especificada a la compresión [Mpa]	Resistencia promedio a la compresión [Mpa]
$f'_c < 20[Mpa]$	$f'_{cr} = f'_c + 7,0$ Ec. (6)
$20 < f'_c < 35[Mpa]$	$f'_{cr} = f'_c + 8,5$ Ec. (7)
$f'_c > 35[Mpa]$	$f'_{cr} = 1,10f'_c + 5,0$ Ec. (8)

Fuente: ACI 318S-05 (2005)

Para asegurar la resistencia adecuada del hormigón, a pesar de esta dispersión, ACI estipula que la calidad del hormigón es satisfactoria (1) **si ningún resultado de un ensayo de resistencia individual** (el promedio de un par de ensayos sobre cilindro) **está por debajo del valor f'_c requerido en más de 3,5 [Mpa]** (35,7[kg/cm²]) y (2) **si**

el promedio de todos los conjuntos de tres ensayos de resistencia consecutivos es igual o mayor al valor requerido de f'_c .

Es evidente que si el concreto se dosificara de manera que su resistencia media fuera solamente igual a la resistencia requerida f'_c éste no cumplirá los requisitos de calidad, debido a que aproximadamente la mitad de los resultados de ensayos de resistencia estarían por debajo del valor requerido. Por tanto, es necesario dosificar el hormigón de manera que su resistencia media f'_{cr} usada como base para la selección de proposiciones satisfactorias y sobrepase la resistencia requerida f'_c en una cantidad suficiente, para garantizar el cumplimiento de los dos requisitos mencionados.

2.3.3.3. Resistencia del hormigón a tracción.

Aunque el hormigón se emplea de mejor manera cuando se utiliza su resistencia a la compresión, de la misma manera su resistencia a la tensión está comprobada y es valedera.

La formación y propagación de las grietas en el lado de la tensión de elementos de hormigón reforzado sometidos a flexión dependen, principalmente, de la resistencia a tensión. También ocurren esfuerzos de tensión en el hormigón como resultado del cortante, torsión, y otras acciones; y, en la mayoría de los casos, el comportamiento del elemento cambia después de ocurrido el agrietamiento. Por lo tanto, es de fundamental importancia una predicción suficientemente precisa de la resistencia a la tensión del hormigón.

La determinación de la resistencia a la tensión real del hormigón tiene dificultades experimentales considerables. Por lo que esa resistencia se ha medido en términos de **módulo de rotura f_r** ; es decir, el esfuerzo de tensión por flexión es calculado a partir de la carga de fractura de una viga de prueba en hormigón simple. Debido a que este esfuerzo nominal se calcula bajo la suposición de que el hormigón es un material elástico y dado que este esfuerzo de flexión está localizado en la superficie exterior, éste tiende a ser mayor que la resistencia del concreto en tensión axial uniforme. (Entonces, este esfuerzo es una medida de la resistencia de la tensión axial uniforme)

Entonces, este esfuerzo es una medida de la resistencia a la tensión axial real, pero no es idéntica a ella.

El módulo de rotura se calcula de la siguiente manera:

- a) Si la fractura de la probeta se produce en el tercio central de la luz de ensaye, calcule la resistencia a la tracción por flexión como la tensión de rotura según la siguiente fórmula.

$$f_r = \frac{P*L}{b*h^2} \quad \text{Ec.(9)}$$

Donde:

f_r = tensión de rotura [kg/cm²]

P = carga máxima aplicada [kN]

L = luz de ensaye de la probeta [cm]

b = ancho promedio de la probeta en la sección de rotura [cm]

h = altura promedio de la probeta en la sección de rotura [cm]

- b) Si la fractura se produce fuera del tercio central de la luz de ensaye, en la zona comprendida entre la línea de aplicación de carga y a una distancia de 0,05L de esa línea.

$$f_r = \frac{3*P*a}{b*h^2} \quad \text{Ec. (10)}$$

Donde:

f_r = tensión de rotura [kg/cm²]

P = carga máxima aplicada [kN]

a = distancia entre la sección de rotura y el apoyo más medida a lo largo de la línea central [cm]

b = ancho promedio de la probeta en la sección de rotura [cm]

h = altura promedio de la probeta en la sección de rotura [cm]

La resistencia a la tensión determinada no presenta una buena correlación con la resistencia a la compresión f'_c . En apariencia, la resistencia a la tensión para concretos de arena y grava depende principalmente de la resistencia de la unión entre la pasta de cemento endurecida y el agregado; mientras para los concretos livianos depende, principalmente, de la resistencia a la tensión de los agregados porosos. El código ACI recomienda un módulo de rotura para diferentes concretos:

Tabla N° 6. Módulo de rotura.

Para f'_c en [kg/cm ²]	Concreto de peso normal $f_r^i = 1,989 * \sqrt{f'_c}$ Ec. (11)
	Concreto con arenas livianas $f_r^i = 1,671 * \sqrt{f'_c}$ Ec. (12)
	Concreto con agregados livianos $f_r^i = 1,459 * \sqrt{f'_c}$ Ec. (13)

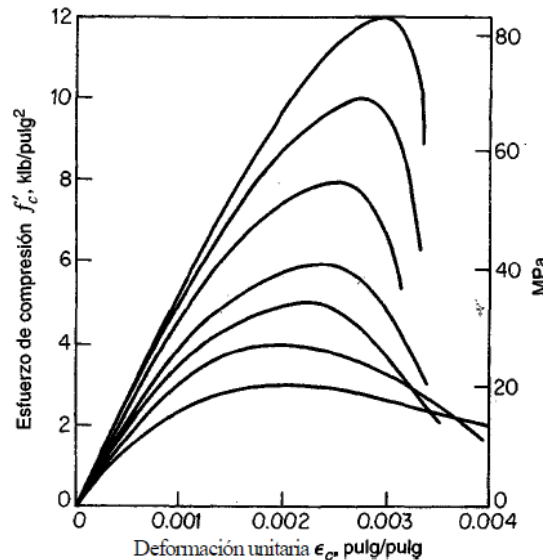
Fuente: Nilson, A.H. “Diseño de estructuras de concreto” (1999)

2.3.4. Características reológicas del hormigón.

La reología es la rama de la mecánica que estudia la evolución de las deformaciones de un material, producida por causas tensionales a lo largo del tiempo. Se ha definido con acierto al hormigón como un pseudosólido elasto-visco-plástico; con ello se hace referencia a su compleja reología, que participa de las características de los tres tipos de cuerpo mencionados: los elásticos, los viscosos, y los plásticos. Además, en el hormigón coexisten la fase sólida (áridos y cemento), la líquida (agua) y la gaseosa (aire incluido).

El comportamiento de una estructura bajo carga depende en alto grado de las relaciones esfuerzo-deformación del material con el cual está construida, para el tipo de esfuerzo al que está sometido el material dentro de la estructura. Debido a que el hormigón se utiliza principalmente en compresión, resulta de interés fundamental su curva esfuerzo-deformación unitaria a la compresión. Esta curva se obtiene mediante mediciones apropiadas de la deformación unitaria en ensayos cilíndricos o en la zona de compresión de las vigas.

Figura N°9. Curva esfuerzo-deformación unitario.



Fuente: Nilson, A.H. "Diseño de estructuras de concreto" (1999)

Curva esfuerzo-deformación unitaria a la compresión, para hormigón de densidad normal con $W_c=2300[\text{kg}/\text{cm}^2]$ (peso unitario del concreto endurecido).

Todas las curvas tienen características similares, pues todas tienen una porción inicial relativamente elástica y lineal, en la cual el esfuerzo y la deformación unitaria son proporcionales. Luego comienzan a inclinarse hacia la horizontal, alcanzando el esfuerzo máximo; es decir, la resistencia a la compresión, para una deformación unitaria que varía aproximadamente entre 0,002 a 0,003 para hormigones de densidad normal, y entre aproximadamente 0,003 y 0,0035 para hormigones livianos, donde los mayores valores en cada caso corresponden a las mayores resistencias. Todas las curvas muestran un tramo descendente, después de que se ha alcanzado el esfuerzo pico; sin embargo, las características de las curvas después del esfuerzo pico dependen del alto grado del método de ensayo.

El módulo de elasticidad se calcula bajo la suposición de que el hormigón es un material elástico. ACI 318-2005 recomienda calcular el módulo de elasticidad mediante la siguiente fórmula:

$$E_c = 0,043 * W_c^{1,5} * \sqrt{f'_c} \quad \text{Ec. (14)}$$

Donde:

f'_c = en [Mpa].

W_c = en [kg/m^3] comprendido entre 1500-2500.

E_c = pendiente de la secante trazada desde un esfuerzo nulo hasta un esfuerzo de compresión de $0,45 * f'_c$.

Es decir la pendiente del tramo recto inicial de la curva esfuerzo-deformación unitaria, aumenta con la resistencia del concreto. Además, es una constante física de cada material y es un coeficiente de proporcionalidad, obtenido experimentalmente.

2.3.4.1. Ley de Hook.

Esta ley establece la relación de proporcionalidad directa entre las tensiones y las deformaciones cuando se trata de alargamientos pequeños.

$$\sigma = E_C * \xi \quad \text{Ec. (15)}$$

Donde:

σ = tensión ejercida en el cuerpo de estudio [kg/cm²].

E_C = módulo de elasticidad del material [kg/cm²].

ξ = deformación del material.

Despejando de la Ec. (14) la deformación “ ξ ” y reemplazando en la Ec.(15) “ E_C ” se tiene.

$$\xi = \frac{\sigma}{0,043 * W^{1,5} * f_C'} \quad \text{Ec. (16)}$$

De esta manera, se calcula la deformación para cada edad t tensión del hormigón trabajado.

2.4. Cemento

El cemento es un conglomerante formado a partir de una mezcla de caliza y arcilla calcinadas y posteriormente molidas, que tiene la propiedad de endurecerse al contacto con el agua. Hasta este punto la molienda entre estas rocas es llamada Clinker, esta se convierte en cemento cuando se le agrega yeso, este le da la propiedad a esta mezcla para que pueda fraguar y endurecerse. Mezclado con agregados pétreos (grava y arena) y agua, crea una pasta uniforme, maleable y plástica que fragua y se endurece, adquiriendo consistencia pétrea, denominada hormigón (en España, parte de Suramérica y el Caribe hispano) o concreto (en México y parte de Suramérica). Su uso está muy generalizado en construcción e ingeniería civil.

Los cementos son productos que amasados con agua fraguan y endurecen formándose nuevos compuestos resultantes de reacciones de hidratación que son estables tanto al aire como sumergidos en agua

El cemento Portland es un [conglomerante](#) o [cemento](#) hidráulico que cuando se mezcla con [áridos](#), agua y fibras de acero discontinuas y discretas tiene la propiedad de conformar una masa pétreo resistente y duradera denominada [hormigón](#). Es el más usual en la [construcción](#) y es utilizado como aglomerante para la preparación del hormigón. Como cemento hidráulico tiene la propiedad de [fraguar](#) y endurecer en presencia de agua, al reaccionar químicamente con ella para formar un material de buenas propiedades aglutinantes.

En el presente trabajo se utilizó el cemento portland IP-30 que es el más aplicado en nuestro medio, que tiene como nombre cemento EL PUENTE.

Fotografía N°18. Cemento EL PUENTE IP-30



Fuente: Elaboración propia.

2.4.1. Características del cemento portland

Las propiedades más importantes del cemento son: Peso específico, finura de molido.

2.4.2. Peso específico

El peso específico de los cementos portland suelen variar muy poco de unos cementos a otros, oscilando entre 3 y 3.15 [gr/cm³], esta limitación está establecida también por algunas normas (igual o mayor a 3gr/cm³) esta limitación por lo general se cumple.

2.4.3. Finura de molido

Es una característica íntimamente ligada al valor hidráulico del cemento, ya que incluye decisivamente en la velocidad de las reacciones químicas que tienen lugar durante el fraguado y endurecimiento. Al entrar en contacto con el agua, los granos de cemento se hidratan solo en una profundidad de 0.01 [mm] por lo que, si estos granos fuesen muy grandes, su rendimiento sería muy pequeño al quedar en su interior un núcleo prácticamente inerte. Si el cemento posee una finura excesiva, su retracción y calor de fraguado son muy grandes (lo que resulta perjudicial), el conglomerante resulta ser más susceptible al envejecimiento tras un almacenamiento prolongado, y disminuye su resistencia a las aguas agresivas. Pero siendo así que las resistencias mecánicas aumentan con la finura, entonces se llega a lo siguiente: el cemento portland debe estar finamente molido, pero no en exceso.

2.5. Áridos

Se denomina árido al material granulado que se utiliza como materia prima en la construcción, principalmente.

Fotografía N°19. Planta seleccionadora de áridos.



Fuente: Elaboración propia.

Los agregados conforman el esqueleto granular del hormigón y son el elemento mayoritario ya que representan el 70% del peso total de concreto, por lo que son responsables de gran parte de las características del mismo. Los agregados son generalmente inertes y estables en sus dimensiones.

El árido se diferencia de otros materiales por su estabilidad química y su resistencia mecánica, y se caracteriza por su tamaño.

El árido que tiene mayor responsabilidad en el conjunto es la arena. Según Jiménez Montoya no es posible hacer un buen hormigón sin una buena arena. Las mejores arenas son las de río, que normalmente son cuarzo puro, por lo que aseguran su resistencia y durabilidad.

Con áridos naturales rodados, los hormigones son más trabajables y requieren menos agua de amasado que los áridos de machaqueo, teniéndose además la garantía de que son piedras duras y limpias. Los áridos machacados procedentes de trituración, al tener más caras de fractura cuesta más ponerlos en obra, pero se traban mejor y se refleja en una mayor resistencia.

En el presente trabajo se utilizó los áridos procedentes del río Tolomosa.

2.5.1. Propiedades de los agregados

2.5.1.1. Peso Unitario (PU)

Si el peso de una muestra de agregado, compuesto de varias partículas, se divide por el volumen que ocupan esas partículas agrupadas dentro de un recipiente unitario se obtiene lo que se denomina como peso unitario del agregado o peso volumétrico.

El peso unitario es una propiedad física importante porque indica el grado de acomodamiento de las partículas y mientras más diminuto sea éste, menor será el volumen de vacíos entre partículas que hace que la mezcla sea más económica, porque habrá pequeña cantidad de huecos a ser llenados con pasta de cemento. Asimismo, mientras mayor sea el peso unitario habrá gran cantidad de granos, la cual depende de la granulometría, forma, textura y tamaño de los mismos.

Existen dos tipos de pesos unitarios que dependen del grado de compactación del agregado y se definen de la siguiente forma.

2.5.1.1.1. Peso Unitario suelto (PUS)

Se denomina PUS cuando para determinar se coloca el material seco suavemente en el recipiente hasta el punto de derrame y a continuación se nivela al ras con un enrasador. El concepto de PUS es significativo cuando se trata de manejo, transporte y almacenamiento de los agregados debido a que éstos se hacen en estado suelto.

El procedimiento de palear el agregado para llenar el recipiente y aprovechar la compactación que alcance con la caída libre desde la pala, es aprovechado para especificar el peso unitario suelto de agregados que tengan un tamaño máximo de 100 mm (4 pulgadas) o menos. La operación consiste en llenar el recipiente hasta que rebose, manejando una pala o cucharón, descargándose el agregado desde una altura que no exceda de 50 mm (2 pulgadas) sobre el borde del recipiente. Téngase el cuidado de prevenir hasta donde sea posible la segregación de las partículas de distintos tamaños que componen la muestra.

2.5.1.1.2. Peso Unitario compactado (PUC)

Se denomina PUC 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 PUC es importante desde el punto de vista del diseño de mezclas ya que con el mismo se dispone el volumen absoluto de los agregados por cuanto estas van a estar sometidas a una compactación durante el proceso de colocación del hormigón.

Compactación por varillado en el llenado del recipiente. El procedimiento de varillado es aplicable a agregados que tienen un tamaño máximo de 40 mm (1½ pulgadas) o menos.

Procedimiento. Llene el recipiente hasta una tercera parte del total y nivele la superficie con los dedos. Varille la capa de agregado con 25 golpes igualmente distribuidos sobre la superficie. Siga llenando el recipiente hasta dos terceras partes del total y otra vez nivele y varille como en la capa inicial. Finalmente llene el recipiente hasta el rebosamiento y varille como en las anteriores capas. Nivele la superficie del agregado con los dedos o con un enrasador, procurando compensar las pequeñas salientes de las piezas de agregado con las depresiones debajo de la línea de enrase.

En el varillado de la primera capa, no permita que la barra golpee fuertemente el fondo del recipiente. En el varillado de la segunda y tercera capas use solamente la fuerza suficiente para que la varilla llegue hasta la capa anterior.

2.5.2. Granulometría de los agregados

2.5.2.1. Agregado grueso

La grava o agregado grueso es uno de los principales componentes del hormigón, por este motivo su calidad es sumamente importante para garantizar buenos resultados en la preparación de estructuras de hormigón.

Fotografía N°20. Agregado grueso.



Fuente: Elaboración propia.

El agregado grueso estará formado por roca o grava de canto rodado obtenida de las fuentes previamente seleccionadas y analizadas en laboratorio, para certificar su calidad. El tamaño mínimo será de 4,8 mm. El agregado grueso debe ser duro, resistente, limpio y sin recubrimiento de materiales extraños o de polvo, los cuales, en caso de presentarse, deberán ser eliminados mediante un procedimiento adecuado, como ser el lavado.

La forma de las partículas más pequeñas del agregado grueso de roca o grava deberá estar razonablemente libre de partículas delgadas, planas o alargadas en todos los tamaños.

En general, el agregado grueso deberá estar de acuerdo con la norma ASTM C 33 (El uso de la norma está sujeto de acuerdo al país en el cual se aplique la misma ya que las especificaciones de cada una de estas varían de acuerdo con la región o país).

Tabla N° 7. Requisitos para el agregado grueso.

Sustancia	Norma	Límite máximo (%)
Material que pasa por el tamiz No. 200	(ASTM C 117)	máx. 0.5
Materiales ligeros	(ASTM C 123)	máx. 1
Grumos de arcilla	(ASTM C 142)	máx. 0.5
Otras sustancias dañinas	-	máx. 1
Pérdida por intemperismo	(ASTM C 88, método Na ₂ SO ₄)	máx. 12
Pérdida por abrasión en la máquina de Los Ángeles	ASTM C 131 y C 535	máx. 40

Fuente: Norma ASTM

El agregado grueso debe estar bien graduado entre los límites fino y grueso y deben estar separados en tamaños normales cuyas granulometrías se indican a continuación:

Tabla N° 8. Granulometría para el agregado grueso.

Tamiz U.S.Standard	Dimensión de la malla (mm)	Porcentaje en peso que pasa por los tamices individuales
-	-	100
2"	50	100
1½"	38	95-100
1"	25	-
¾"	19	35-70

½"	13	-
3/8"	10	10-30
N° 4	4.8	0-5
N° 8	2.4	-

Fuente: Norma ASTM C-33

Módulo de finura

El módulo de finura del agregado grueso, es el índice aproximado que nos describe en forma rápida y breve la proporción de finos o de gruesos que se tiene en las partículas que lo constituyen.

El módulo de finura para el agregado grueso se calcula sumando los porcentajes acumulados de los tamices 1 1/2", ¾", 3/8", N°4 + 500 y dividiendo el total entre 100

Es un indicador de la finura de un agregado: Cuanto mayor sea el módulo de finura, más grueso es el agregado.

El rango del módulo de finura del agregado grueso es de 5.5 a 8.5

Tamaño máximo (TM)

Se define como la abertura del menor tamiz por el cual pasa el 100% de la muestra.

Tamaño Máximo Nominal (TMN)

El tamaño máximo nominal es otro parámetro que se deriva del análisis granulométrico y está definido como el siguiente tamiz que le sigue en abertura (mayor) a aquel cuyo porcentaje retenido acumulado es del 15% o más. La mayoría de los especificadores granulométricos se dan en función del tamaño máximo nominal y comúnmente se estipula de tal manera que el agregado cumpla con los siguientes requisitos.

- ✓ El TMN no debe ser superior que 1/5 de la dimensión menor de la estructura, comprendida entre los lados de una formaleta.
- ✓ El TMN no debe ser superior que 1/3 del espesor de una losa.

- ✓ El TMN no debe ser superior que $\frac{3}{4}$ del espaciamiento libre máximo entre las barras de refuerzo.

2.5.2.2. Agregado fino

La arena, agregado fino o árido fino se refiere a la parte del árido o material cerámico inerte que interviene en la composición del hormigón.

Fotografía N°21. Agregado fino.



Fuente: Elaboración propia.

El agregado fino consistirá en arena natural proveniente de canteras aluviales o de arena producida artificialmente. La forma de las partículas deberá ser generalmente cúbica o esférica y razonablemente libre de partículas delgadas, planas o alargadas. La arena natural estará constituida por fragmentos de roca limpios, duros, compactos, durables.

En general, el agregado fino o arena deberá cumplir con los requisitos instaurados en la norma ASTM C-33, es decir, no deberá contener cantidades dañinas de arcilla, limo, álcalis, mica, materiales orgánicos y otras sustancias perjudiciales.

Tabla N° 9. Requisitos para el agregado fino.

Sustancia	Norma	Límite máximo (%)
Material que pasa por el tamiz n° 200	(ASTM C 117)	3%
Materiales ligeros	(ASTM C 123)	1%

Grumos de arcilla	(ASTM C 142)	1%
Total de otras sustancias dañinas (como álcalis, mica, limo)	-	2%
Pérdida por meteorización	(ASTM C 88, método Na ₂ SO ₄)	10%

Fuente: Norma ASTM

El agregado fino deberá estar bien gradado entre los límites fino y grueso y deberá llegar tener la granulometría siguiente:

Tabla N° 10. Granulometría agregado fino.

Tamiz U.S.Standard	Dimensión de la malla (mm)	Porcentaje en peso que pasa
N° 3/8"	9,52	100
N° 4	4,75	95 - 100
N° 8	2,36	80 - 100
N° 16	1,18	50 - 85
N° 30	0,60	25 - 60
N° 50	0,30	10 - 30
N° 100	0,15	2 - 10

Fuente: Norma ASTM C-33

Módulo de Finura

El módulo de finura del agregado fino, es el índice aproximado que nos describe en forma rápida y breve la proporción de finos o de gruesos que se tiene en las partículas que lo constituyen.

El módulo de finura de la arena se calcula sumando los porcentajes acumulados en las mallas siguientes: Número 4, 8, 16, 30, 50 y 100 inclusive y dividiendo el total entre 100.

Es un indicador de la finura de un agregado: Cuanto superior sea el módulo de finura, más grueso es el agregado.

Es útil para estimar las proporciones de los agregados finos y gruesos en las mezclas de hormigón.

El rango del módulo de finura de la arena es de 2.3 a 3.1

Si el módulo de finura de una arena es de 2.3 se trata de una arena fina; y si el módulo se encuentra entre 2.3 a 3.1 se trata de una arena mediana. Y si el módulo es mayor de 3.1 se trata de una arena gruesa.

2.5.3. Peso específico

Se define en la dosificación de hormigón, como la relación del peso de la muestra de un material en el aire, al peso del agua desplazado por el mismo incluyendo sus poros permeables. Según sea que el peso en el aire se considera seco (en horno a peso constante) o en condición de saturado y superficie seca, el peso específico se refiere a una de esas condiciones.

El peso específico de los agregados, que expresa también como densidad al sistema Internacional de Unidades, adquiere importancia en la construcción, cuando se requiere que el concreto tenga un peso límite, sea máximo o mínimo. Además, el peso específico es un indicador de calidad, en cuanto que los valores elevados corresponden a materiales de buen comportamiento, mientras que el peso específico bajo generalmente corresponde a agregados absorbentes y débiles, caso en el que es aconsejable practicar pruebas adicionales.

2.5.4. Porcentaje de absorción

Es la cantidad de agua que un agregado necesita para pasar de la condición seca a de saturado superficialmente, se expresa generalmente en porcentaje:

$$\% \text{Absorción} = \frac{\text{Peso}_{\text{sss}} - \text{Peso}_{\text{seca}}}{\text{Peso}_{\text{seca}}} * 100 \quad \text{Ec. (17)}$$

La absorción de los agregados se obtiene esencialmente después de haber sometido al material a una saturación durante 24 horas, cuando ésta termina se procede a secar superficialmente el material, y por diferencias de masa se logra adquirir el porcentaje de absorción con relación a la masa seca del material.

La cantidad de agua absorbida estima la porosidad de las partículas de agregado. Conocer la cantidad de agua que puede ser alojada por el agregado siempre resulta de mucha utilidad, en ocasiones se emplea como un valor que se especifica para aprobar o rechazar el agregado en una cierta aplicación. Por ejemplo, cuando el agregado puede influir en el comportamiento del concreto para soportar heladas, se especifica un agregado con baja absorción (no mayor al 5 %), por el peligro de deterioro en el material debido al congelamiento del agua absorbida en el agregado. La fórmula de cálculo para la absorción de gravas es igualmente aplicable para las arenas.

2.5.5. Humedad superficial

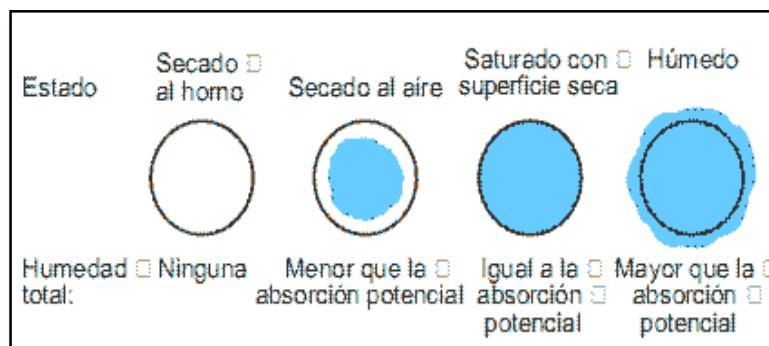
Es la cantidad de agua superficial retenida por la partícula, su influencia está en la mayor o menor cantidad de agua necesaria en la mezcla se expresa de la siguiente forma:

Las condiciones de humedad de los agregados se presentan en la Figura y se las puede definir como:

$$\% \text{humedad} = \frac{\text{Peso}_{\text{humedo}} - \text{Peso}_{\text{seco}}}{\text{Peso}_{\text{seco}}} * 100 \quad \text{Ec. (18)}$$

1. Secado al horno – Totalmente absorbente
2. Secado al aire – La superficie de las partículas está seca, pero su interior contiene humedad y, por lo tanto, aún es ligeramente absorbente
3. Saturado con superficie seca (SSS) – No absorben ni ceden agua al hormigón.
4. Húmedos – Contiene un exceso de humedad sobre la superficie (agua libre)

Figura N°10. Condiciones de humedad de los agregados.



Fuente: Elaboración propia.

La cantidad de agua que se adiciona en la planta de hormigón se debe ajustar para las condiciones de humedad de los agregados, a fin de que se atienda a la demanda de agua del diseño de la mezcla de manera precisa. Si el contenido de agua del hormigón no se mantiene constante, la relación agua-cemento variará de una amasada a la otra, resultando en la variación de otras propiedades, tales como la resistencia a compresión y la Trabajabilidad.

Los agregados grueso y fino generalmente tienen niveles de absorción (contenido de humedad a SSS) que varían del 0.2% al 4% y del 0.2% al 2%, respectivamente. Los contenidos de agua libre principalmente varían del 0.5% al 2% para el agregado grueso y del 2% al 6% para el agregado fino. El contenido máximo de humedad del agregado grueso drenado es normalmente menor que aquél del agregado fino. La mayoría de los agregados finos puede mantener un encerrado máximo de humedad drenada de cerca del 3% al 8%, mientras que el agregado grueso puede mantener del 1% al 6%.

2.6. Agua

El agua de amasado interviene en las reacciones de hidratación del cemento. La cantidad de la misma debe ser la estricta necesaria, pues la sobrante que no interviene en la hidratación del cemento se evaporará y creará huecos en el hormigón disminuyendo la resistencia del mismo. Puede estimarse que cada litro de agua de amasado de exceso supone anular dos kilos de cemento en la mezcla. Sin embargo una reducción excesiva de agua originaría una pasta seca, poco manejable y muy difícil de

colocar en obra. Por ello es un dato muy importante fijar adecuadamente la cantidad de agua.

Figura N°11. Agua de amasado.



Fuente: Elaboración propia.

Durante el fraguado y primer endurecimiento del hormigón se añade el agua de curado para evitar la desecación y mejorar la hidratación del cemento.

Ambas, el agua destinada al amasado, como la destinada al curado deben ser aptas para cumplir su función. El agua de curado es muy importante que sea apta pues puede afectar más negativamente a las reacciones químicas cuando se está endureciendo el hormigón. Normalmente el agua apta suele coincidir con la potable y están normalizados una serie de parámetros que debe cumplir. Así en la normativa está limitado el pH, el contenido en sulfatos, en ion cloro y los hidratos de carbono.

2.7. Dosificación ACI-211.1

El método del American Concrete Institute se basa en tablas empíricas mediante las cuáles se especifican las condiciones de partida y la dosificación.

Determinación de la razón Agua/Cemento

El cuadro 2.6. Define la razón agua/cemento en función de la resistencia media y especificada para el hormigón, respectivamente.

Tabla N° 11. Relación agua/cemento.

Relación entre la razón Agua /cemento y la resistencia promedio a compresión del hormigón (ACI 211,1)			
Resistencia promedio a compresión a 28 días		Razón agua/cemento (en masa)	
Mpa	Kg/cm ²	Sin aire incorporado	Con aire incorporado
45	450	0,38	-
42	420	0,41	-
40	400	0,43	-
35	350	0,48	0,4
30	300	0,55	0,46
28	280	0,57	0,48
25	250	0,62	0,53
21	210	0,68	0,59
20	200	0,7	0,61
15	150	0,8	0,71
14	40	0,82	0,74

Fuente: Norma ACI 211,1

Determinación de la fluidez

La fluidez que se desea otorgar al hormigón queda definida en este método en base al asentamiento de cono, el que se puede establecer usando como referencia el cuadro 2.7. Este cuadro define un rango aceptable de asentamientos para diversos tipos de elementos estructurales. Debe señalarse que esta definición es relativamente imprecisa, pues, por una parte, el rango señalado es bastante amplio y, por otra, la gama de elementos estructurales considerados es restringida y delimitada en forma poco precisa.

Tabla N° 12. Consistencia para diferentes tipos de construcción.

Asentamientos de cono recomendado para diferentes tipos de construcción (ACI 211,1)	
Tipo de construcción	Rango de asentamiento de cono [cm]
Fundaciones armadas y bases	2 – 8
Fundaciones y muros de sub-estructura simple	2 – 8
Vigas y muros armados	2 – 10
Columnas de edificios	2 – 10
Pavimentos y losas	2 – 8
Hormigón masivo	2 – 8

Fuente: Norma ACI 211,1

Determinación de la dosis de agua

Se emplea la tabla N° 11, que establece la cantidad de agua expresada en l/m³ de hormigón colocado y compactado, en función del asentamiento de cono definido y del tamaño máximo nominal especificado anteriormente.

Se debe distinguir el caso del empleo de aire incorporado, ya que éste permite una reducción de la dosis de agua por su efecto plastificador. Esta misma parte de la tabla puede emplearse en el caso de haber previsto el uso de un aditivo plastificador.

Tabla N° 13. Requerimiento de dosis de agua.

Requerimientos aproximados para dosis de agua (l/m^3) y contenido de aire (%) para diferentes trabajabilidades y tamaños máximos nominales de áridos (ACI 211,1)								
Trabajabilidad (cm)	Tamaño máximo nominal del árido (mm)							
	10	12,5	20	25	40	50	70	150
Hormigón sin aire incorporado								
3 – 5	205	200	185	180	160	155	145	125
8 – 10	225	215	200	195	175	170	160	140
15 – 18	240	230	210	205	185	180	170	-
Cantidad de aire atrapado aproximado (%)	3	2,5	2	1,5	1	0,5	0,3	0,2
Hormigón con aire incorporado								
3 – 5	180	175	165	160	145	140	135	120
8 – 10	200	190	180	175	160	155	150	135
15 – 18	215	205	190	185	170	165	160	-
Cantidad de aire total promedio recomendada (%)								
Exposición suave	4,5	4	3,5	3	2,5	2	1,5	1
Exposición moderada	6	5,5	5	4,5	4,5	4	3,5	3
Exposición extrema	7,5	7	6	6	5,5	5	4,5	4

Fuente: Norma ACI 211,1.

Determinación de la dosis de cemento

La dosis de cemento se determina en base al coeficiente entre la dosis de agua determinada y la razón agua/cemento definida.

En el caso de haberse previsto el empleo de un incorporador de aire, la cantidad de aire incorporado debe sumarse a la dosis de agua para el efecto del cálculo de la dosis de cemento.

$$C \left[\text{kg/m}^3 \right] = \frac{(W + a)}{W/C} \quad \text{Ec. (19)}$$

Determinación de la dosis de grava

Se especifica a partir de la tabla N12, en función del módulo de finura de la arena y al tamaño máximo nominal.

Tabla N°14. Requerimiento de dosis de grava.

Volumen aparente de árido grueso seco por metro cubico de hormigón (ACI 211,1)				
Tamaño máximo nominal del árido [mm]	Volumen aparente seco compactado de árido grueso para distintos Módulos de finura de la arena.			
	2,4	2,6	2,8	3
10	0,50	0,48	0,46	0,44
12,5	0,59	0,57	0,55	0,53
20	0,66	0,64	0,62	0,60
25	0,71	0,69	0,67	0,65
40	0,75	0,73	0,71	0,69
50	0,78	0,76	0,74	0,72
75	0,82	0,80	0,78	0,76
150	0,87	0,85	0,83	0,81

Fuente: Norma ACI 211,1.

Determinación de la dosis de arena

Método Volumétrico:

Se dispone partiendo del hecho que la suma de los volúmenes absolutos de agua, cemento, aire incorporado (o atrapado), grava y arena debe ser igual a un metro cúbico. Ello permite definir el volumen absoluto de arena, el cual, multiplicado por la densidad real (peso específico) de la arena, conduce al valor de la dosis de arena, expresada en kilos por metro cúbico.

La masa de árido fino o arena, Af, está dada por:

$$A_f \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] = \gamma_f \left[1000 - \left(W + \frac{C}{\gamma} + \frac{A_g}{\gamma_G} + 10a \right) \right] \quad \text{Ec. (20)}$$

Donde:

γ_f = densidad real o peso específico del árido fino (gr/cm^3).

γ_g = densidad real o peso específico del árido grueso (gr/cm^3).

γ = peso específico del cemento (gr/cm^3).

A_g = dosis de árido grueso o grava (kg/m^3).

a = dosis de aire (%)

C = dosis de cemento (kg/m^3)

W = dosis de agua (kg/m^3)

En el presente trabajo se eligió el método de la dosificación ACI 211.1 porque este método American Concrete Institute es más aplicado en el diseño de mezclas para edificaciones debido a que toma más en cuenta las propiedades de los agregados, con referencia al método de dosificación AASHTO que es más utilizado en el diseño de mezclas para la construcción de carreteras.

2.8. Elaboración de probetas.

Para la elaboración de probetas cilíndricas de control de resistencia a compresión del hormigón, una vez realizado el cono de Abrams se coloca la pasta en 2 capas cada capa con una vibración de 10 segundos en moldes cilíndricos de diámetro 15 [cm] y de altura 30 [cm] tal como se especifica en la norma para ensayos de rotura.

Pasada las 24 horas se procederá a quitar los moldes cilíndricos y realizar el curado de las probetas en agua.

Figura N°12. Modelo de probeta cilíndrica.



Fuente: Elaboración propia.

Luego del proceso de fraguado del concreto es necesario mantener el hormigón tan saturado de agua como sea posible con el fin de terminar de hidratar al cemento y conseguir así su máxima eficiencia.

Una vez desmoldadas las probetas, se transportan a un estanque lleno de agua evitando golpes a la probeta y así comenzar el proceso de curado mediante sumersión, se debe procurar que las probetas no estén en contacto entre sí para un mejor proceso. Las probetas permanecerán en la cámara húmeda hasta el momento de realizar su correspondiente ensayo.

**MARCO
PRÁCTICO**

3. MARCO PRÁCTICO.

El presente capítulo muestra el proceso para la producción del hormigón, de comparación que técnicamente llamaremos Hormigón Patrón y el Hormigón Revibrado, con la finalidad de estudiar cómo se mejora la resistencia de los hormigones, debido a una nueva vibración (revibrado).

3.1. Ubicación del área de extracción de áridos

El área de estudio es la cuenca del Río Tolomosa, está ubicada en el departamento de Tarija, al sur de Bolivia y cubre una superficie aproximada de 1300 km², la cuenca corresponde a la sección municipal de Tarija, su punto más alto se encuentra en la comunidad de Calderillas a una altitud de 3112 metros sobre el nivel del mar, mientras que su punto más bajo se encuentra en la comunidad de Tolomosa a una altitud de 1887 metros sobre el nivel del mar.

Figura N° 13. Cuenca del río Tolomosa.

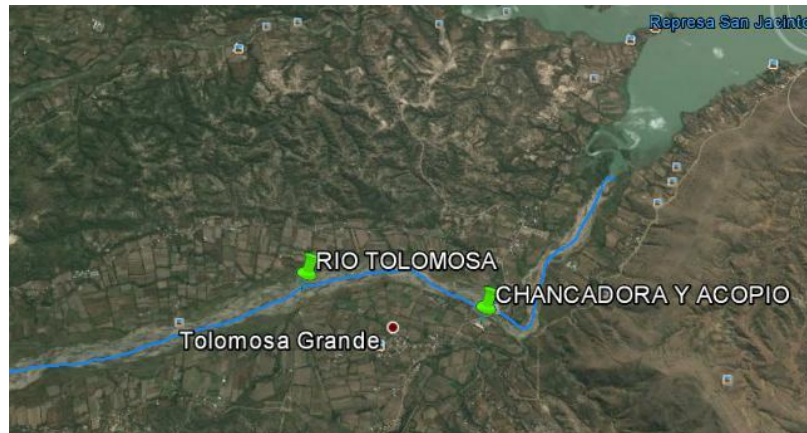


Fuente: Elaboración propia.

3.2. Características generales del área de estudio.

Se trata de materiales de la orillas del río, por lo tanto los áridos son de canto rodado.

Figura N° 14. Ubicación de la planta clasificadora.



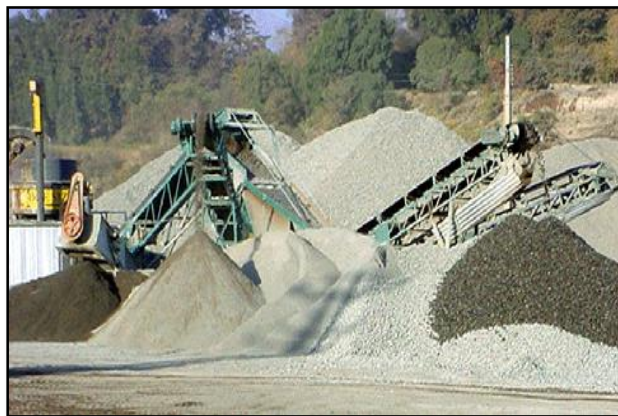
Fuente: Elaboración propia.

3.3. Ubicación del área de extracción de áridos

3.3.1. Muestreo de grava y arena

Se lo realizó mediante una clasificadora de áridos que está ubicada a orillas del río Tolomosa en la comunidad de Tolomosa. Perteneciente a una empresa que está realizando obras civiles en la provincia Cercado. De la cual logramos conseguir una cantidad representativa de material para realizar la investigación.

Figura N° 15. Muestreo de los materiales pétreos



Fuente: Elaboración propia.

3.3.2. Muestreo del cemento

El cemento “EL PUENTE” es conseguido de las agencias situadas en nuestra ciudad.

3.4. Propiedades de los agregados para el hormigón

3.4.1. Grava

3.4.1.1. Granulometría de la grava y contenido de humedad.

- **Granulometría** La granulometría de la grava se lo realizó utilizando los tamices especificados por la norma ASTM C136.

Fotografía N° 22. Juego de tamices



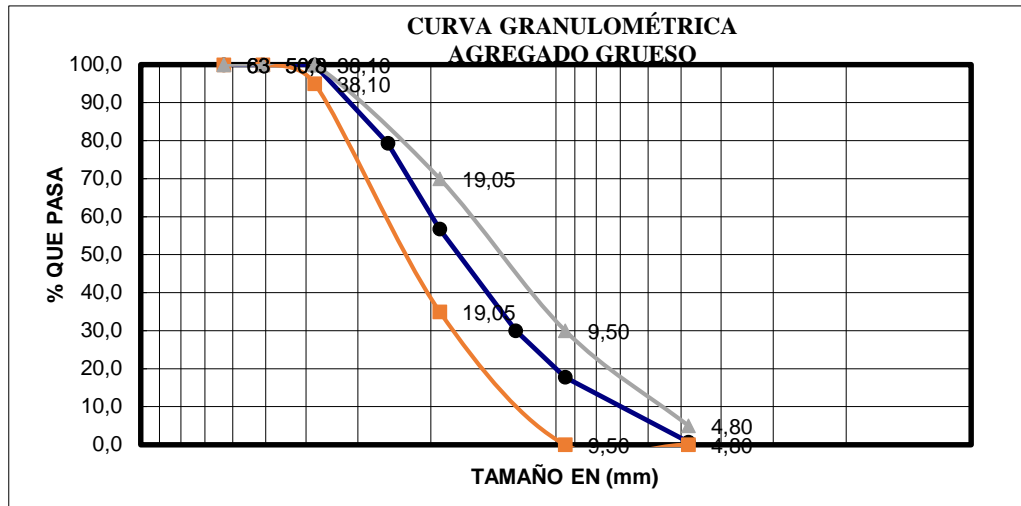
Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 15. Granulometría de la grava.

Tamices	Tamaño (mm)	Peso Retenido	Retenido Acumulado		% Que pasa del total
			(gr)	(%)	
2 1/2"	63	0,00	0,00	0,00	100,0
2	50,8	0,00	0,00	0,00	100,0
1 1/2	38,10	0,00	0,00	0,00	100,0
1	25,40	3101,60	3101,60	20,68	79,3
3/4	19,05	3387,90	6489,50	43,26	56,7
1/2	12,50	4009,90	10499,40	70,00	30,0
3/8	9,50	1838,50	12337,90	82,25	17,7
N°4	4,80	2551,80	14889,70	99,26	0,7
BASE	0	106,80	14996,50	99,98	0,0

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico N° 1. Curva granulométrica de la grava



Fuente: Elaboración propia.

Las series granulométricas normadas por ASTM C136 que determinan la granulometría adecuada del agregado grueso, en el caso de nuestra muestra se cumplen, ya que como se puede apreciar en el gráfico se encuentran entre los límites establecidos por la norma.

De lo analizado se puede definir que estamos frente a una grava bien graduada, y que cumple con todas las especificaciones establecidas por la norma ASTM C136.

Tamaño máximo de la grava

$$TM = 1 \frac{1}{2}''$$

Tamaño máximo nominal de la grava

$$TMN = 1''$$

- **Contenido de humedad.** Se lo realizó de acuerdo a la norma ASTM D2216

Tabla N° 16. Contenido de humedad.

HUMEDAD	
DATO	gr
Peso Muestra Húmeda	1000,00
Peso Muestra seca	970,30
Peso Agua	29,70
% de Humedad	3,06

Fuente: Elaboración propia.

$$\% \text{ Humedad} = 3,06$$

Como la humedad de nuestro agregado es mayor a cero, aporta agua en la elaboración de nuestra mezcla de hormigón.

3.4.1.2. Peso unitario de la grava

Este ensayo fue realizado de acuerdo a la norma ASTM E30 y ASTM C29

- **Método de golpeado (peso unitario compactado)**

Se realizó en un molde 14 lt. de volumen y se apisonó en 3 capas, cada una con 25 golpes con la varilla tal como especifican las normas ASTM.

Fotografía N° 23. Molde cilíndrico para el ensayo de peso unitario.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 17. Peso unitario de la grava (compactado).

MUESTRA N°	PESO UNITARIO COMPACTADO (gr/cm ³)
1	1,549
2	1,549
3	1,550
	1,549

Fuente: Elaboración propia.

$$\text{P. U. C} = 1,549 \text{ gr/cm}^3$$

- **Método de traspaleo (peso unitario suelto)**

Se realizó dejando caer la grava desde una altura de 5cm por encima del molde.

Tabla N° 18. Peso unitario de la grava (suelto).

MUESTRA N°	PESO UNITARIO SUELTO (gr/cm ³)
1	1,419
2	1,418
3	1,420
	1,419

Fuente: Elaboración propia.

$$\text{P. U. S} = 1,419 \text{ gr/cm}^3$$

Se recomienda una variación del 20% en la relación de peso unitario suelto con el peso unitario compactado según ASTM C29-especificaciones técnicas. En nuestro caso la grava presenta características similares, con una aproximación al porcentaje de variación que se describe.

3.4.1.3. Módulo de finura de la grava

El módulo de finura se encuentra dentro del rango especificado por la norma ACI. (5.5 – 8.5)

$$MF = \frac{(\%)Ret.Acum.(1\frac{1}{2}+3\frac{3}{4}+3\frac{3}{8}+N^{\circ}4+500)}{100} \quad \text{Ec. (24)}$$

$$MF = 7,2$$

3.4.1.4. Peso específico y absorción de la grava

Se lo realizó como se explica en la norma ASTM C128.

Fotografía N° 24. Equipo para peso específico grava.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 19. Peso específico de la grava

MUESTRA N°	PESO ESPECÍFICO A GRANEL (gr/cm ³)	PESO ESPECÍFICO S.S.S. (gr/cm ³)	PESO ESPECÍFICO APARENTE (gr/cm ³)	% DE ABS.
1	2,65	2,68	2,74	1,25
2	2,65	2,68	2,73	1,11
3	2,65	2,68	2,74	1,20
Promedio	2,65	2,68	2,73	1,19

Fuente: Elaboración propia.

$$P. E. A = 2.73 \text{ gr/cm}^3$$

El peso específico aparente está dentro del rango especificado por la norma ASTM C128, que recomienda para hormigón estructural un rango de 2,3 a 2,9; lo que clasifica a nuestro agregado grueso de peso normal y recomendado para su uso en la fabricación de hormigón de peso normal.

$$\text{Absorción (\%)} = 1.19$$

La absorción de la grava está dentro del rango especificado por la norma ACI. (0.2 - 4 %).

3.4.1.5. Desgaste de los ángeles

Se lo realizo como se explica en la norma ASTM C131.

Tabla N° 20. Desgaste de los ángeles.

% DE DESGASTE	ESPECIFICACION ASTM
19,74	35% MAX

Fuente: Elaboración propia.

$$\% \text{ de desgaste} = 19,74$$

El desgaste de la grava está dentro del rango especificado en la norma ASTM (<35%) Por lo tanto, los agregados en estudio cuentan con una dureza suficiente, ya que presenta una pérdida del 19,74 % de desgaste ante la abrasión de la Maquina de los Ángeles. Por lo que tenemos con estos agregados la dureza suficiente para poder fabricar un hormigón de buena resistencia a la abrasión.

3.4.2. Arena.

La arena usada para el presente proyecto cumple con las especificaciones técnicas requeridas según ASTM, en los siguientes subtítulos se hará el desglose respectivo.

3.4.2.1. Granulometría de la arena y contenido de humedad.

- **Granulometría.**

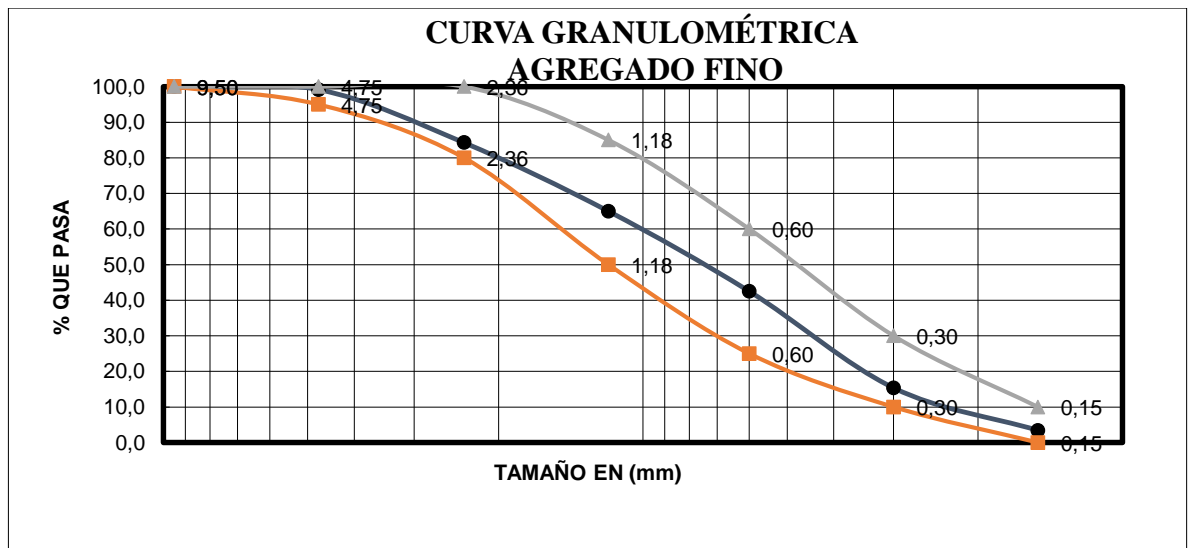
Este ensayo fue realizado de acuerdo a la norma ASTM C13

Tabla N° 21. Granulometría de la arena.

Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret.	Retenido Acumulado		% Que pasa del total
			(gr)	(%)	
2 1/2"	63	0,00	0,00	0,00	100,0
2	50,8	0,00	0,00	0,00	100,0
1 1/2	38,10	0,00	0,00	0,00	100,0
1	25,40	3101,60	3101,60	20,68	79,3
3/4	19,05	3387,90	6489,50	43,26	56,7
1/2	12,50	4009,90	10499,40	70,00	30,0
3/8	9,50	1838,50	12337,90	82,25	17,7
N°4	4,80	2551,80	14889,70	99,26	0,7
BASE	0	106,80	14996,50	99,98	0,0

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico N° 2. Curva granulométrica de la arena.



Fuente: Elaboración propia.

La norma ASTM C136 establece los parámetros granulométricos para el agregado fino, con el cual realizamos la comparación de los resultados obtenidos.

Los porcentajes retenidos del material en estudio se encuentran dentro de lo especificado por norma, como se puede observar en la curva granulométrica del agregado fino, por lo tanto el desarrollo del proyecto se desarrollara con este material.

- **Contenido de humedad.**

Tabla N° 22. Contenido de humedad.

DATO	gr
Peso Muestra Húmeda	408,40
Peso Muestra seca	400,10
Peso Agua	8,30
% de Humedad	2,07

Fuente: Elaboración propia.

$$\%humedad = 2,07$$

3.4.2.2. Peso unitario de la arena

- **Método de golpeado (peso unitario compactado)**

Se realizó en un molde 3 lt de volumen y se apisonó en 3 capas, cada una con 25 golpes con la varilla tal como especifican las normas ASTM.

Fotografía N° 25. Equipo para peso unitario de la arena (3 litros).



Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 23. Peso unitario compactado.

MUESTRA N°	PESO UNITARIO COMPACTADO (gr/cm³)
1	1,794
2	1,794
3	1,796
Promedio	1,795

Fuente: Elaboración propia.

$$\text{P. U. C} = 1.795 \text{ gr/cm}^3$$

- **Método de traspaleo (peso unitario suelto)**

Se realizó dejando caer la arena desde una altura de 5cm por encima del molde.

Tabla N° 24. Peso unitario suelto.

MUESTRA N°	PESO UNITARIO SUELTO (gr/cm³)
1	1,539
2	1,529
3	1,536
Promedio	1,534

Fuente: Elaboración propia.

$$\text{P. U. S} = 1.534 \text{ gr/cm}^3$$

Se recomienda una variación del 20% en la relación de peso unitario suelto con el peso unitario compactado según ASTM C29-especificaciones técnicas. En nuestro caso la

arena presenta características similares, con una aproximación al porcentaje de variación que se describe.

3.4.2.3. Módulo de finura de la arena

Según la norma ACI se trata de una arena mediana.

$$MF = \frac{(\%)Ret.Acum.(\frac{3}{8}+N^{\circ}4+N^{\circ}8+N^{\circ}16+N^{\circ}30+N^{\circ}50+N^{\circ}100)}{100} \quad \text{Ec. (25)}$$

$$MF = 2.90$$

El módulo de finura, también llamado módulo granulométrico, no es un índice de granulometría, ya que un número infinito de tamizados da el mismo valor para el módulo de finura. Sin embargo, da una idea del grosor o finura del agregado, por este motivo se prefiere manejar el término de módulo de finura. El módulo de finura se calcula sumando los porcentajes retenidos acumulados en los tamices estándar (nombrados más abajo) y dividiendo la suma entre 100. Cambios significativos en la granulometría de la arena tienen una repercusión importante en la demanda de agua y, en consecuencia, en la trabajabilidad del hormigón, por lo que si hubiese una variación significativa en la granulometría de la arena deben hacerse ajustes en el contenido de cemento y agua para conservar la resistencia del hormigón. Para no tener que recalcular la dosificación del hormigón el módulo de finura del agregado fino, entre envíos sucesivos, no debe variar en más de ± 0.2 . Los tamices especificados que deben usarse en la determinación del módulo de finura son:

No. 100, No. 50, No. 30, No. 16, No. 8, No. 4, $\frac{3}{8}$ ", $\frac{3}{4}$ ", $1\frac{1}{2}$ ", 3" y de 6"

- Los valores de Modulo de Finura de 2.40 a 3 son normales para el agregado fino; lo que indica que nuestro valor obtenido de la arena a usarse en el desarrollo del proyecto se encuentra dentro de los parámetros y en consecuencia tenemos un módulo de finura normal.

3.4.2.4. Peso específico y absorción de la arena

Se realizó siguiendo el procedimiento especificado por las normas ASTM C128.

Fotografía N° 26. Matraz graduado para el peso específico aparente de la arena.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 25. Peso específico de la arena.

MUESTRA N°	P. E. GRANEL (gr/cm³)	P. E. S.S.S. (gr/cm³)	P. E. APARENTE (gr/cm³)	% DE ABSORCION
1	2,34	2,38	2,44	1,66
2	2,34	2,38	2,44	1,78
3	2,35	2,39	2,45	1,72
Promedio	2,34	2,38	2,44	1,72

Fuente: Elaboración propia.

$$\text{P. E. A} = 2,44 \text{ gr/cm}^3$$

El peso específico aparente está dentro del rango especificado por la norma ASTM C128, que recomienda para hormigón estructural un rango de 2,3 a 2,9; lo que clasifica a nuestro agregado grueso de peso normal y recomendado para su uso en la fabricación de hormigón de peso normal.

$$\text{Absorción (\%)} = 1,72$$

La absorción de la arena está dentro del rango especificado por la norma ACI. (0.2 - 2 %)

3.4.3. Cemento.

3.4.3.1. Peso específico del cemento

Este ensayo se lo realizó de acuerdo a la norma ASTM C188.

Figura N° 16. Cemento el puente IP-30.



Fuente: Elaboración propia.

El peso específico del cemento está dentro del rango especificado por la norma ACI.

Tabla N° 26. Peso específico del cemento.

MUESTRA N°	PESO UNITARIO SUELTO (gr/cm³)
1	3,048
2	3,200
3	2,909
	3,052

Fuente: Elaboración propia.

$$\text{P. E. C} = 3.052\text{gr/cm}^3$$

Generalmente el peso específico del cemento Potland se encuentra dentro del rango de 3,00 a 3,30 gr/cm³, por lo tanto el valor del peso específico de nuestro cemento está dentro del rango.

El peso específico de un cemento determinado con la norma ASTM C188 no es indicador de la calidad del cemento; su uso principal se tiene en los cálculos de proporcionamiento de mezclas.

3.4.3.2. Finura del cemento

Tabla N° 27. Finura del cemento.

Tamices	Peso Ret.	% Ret	% que pasa del total
N°40	0,10	0,20	99,8
N°200	1,90	4,00	96,0
BASE	47,80	99,60	0,4

Fuente: Elaboración propia.

$$\text{FC} = 4 (\%)$$

La superficie específica o finura de molido es una de las propiedades más importantes del cemento, puesto que la hidratación de los granos de cemento ocurre desde la superficie hacia el interior, el área superficial total de las partículas de cemento constituye el material de hidratación. El tamaño de los granos (finura del cemento) tiene una gran influencia sobre sus propiedades, especialmente sobre la velocidad de hidratación, desarrollo de calor, retracción y aumento de resistencia con la edad.

3.4.3.3. Tiempo de fraguado del cemento.

Al hormigón recién mezclado se lo considera en estado fresco, mientras conserva suficiente trabajabilidad para ser moldeado; en tanto que el hormigón ya colocado se lo considera como un material ya en curso de endurecimiento progresivo. Para dar el uso y tratamiento adecuado al hormigón en ambos estados, es necesario conocer sus respectivas características y propiedades, y los factores que la modifican, a fin de poder ajustarlas según convenga. La etapa de fraguado que normalmente dura pocas horas, corresponde al cambio de estado en que el hormigón deja de ser material blando para convertirse en un cuerpo rígido pero frágil; es decir, el hormigón recién fraguado es un material solidificado que prácticamente no posee resistencia mecánica. Se considera que la etapa del verdadero endurecimiento o de adquisición de resistencia mecánica, se inicia cuando termina el fraguado y se prolonga durante un lapso que dura meses e incluso años.

Se emplea el uso del aparato de Vicat para determinar el tiempo de fraguado del cemento, característica que influye en el tiempo en el cual el hormigón se puede manipular sin ser dañado estructuralmente.

El ensayo consiste en dejar caer la aguja de Vicat sobre una pasta de cemento amasada con agua, moldeada en un cilindro, para luego medir la penetración de esta en la pasta en intervalos de tiempo de 15[*min*], los puntos críticos de la penetración de la aguja marcan los tiempos de fraguado, es decir cuando penetra 25 [*mm*] quiere decir que es el tiempo inicial de fraguado y cuando la penetración es nula o cero marca el tiempo final del fraguado.

Tabla N° 28. Tiempo de fraguado.

Tiempo [min]	Penetración [mm]	Observaciones
210	25	Tiempo de fraguado inicial
450	0	Tiempo de fraguado final

Fuente: Elaboración propia.

Para el cemento el puente IP-30 que se usa en nuestro proyecto se tiene un tiempo inicial de fraguado de 3,5 [hrs] y un tiempo de fraguado final de 7,5 [hrs]

3.5. Dosificación ACI-211.1

Los métodos habitualmente empleados en la dosificación de hormigones tradicionales abarcan un campo amplio de posibilidades. Uno de los exponentes más significativos entre estas posibilidades lo constituye, sin duda, el conjunto de recomendaciones de comité 211 del A.C.I. (American Concrete Institute), que es aplicable a hormigones cuyas características más significativas corresponden a las que se definen a continuación.

- Resistencia a compresión $13 \leq f_c \leq 40,6$ [Mpa]
- Relación agua/cemento $0,41 \leq a/c \leq 0,82$
- Asiento de cono $25 \leq D \leq 175$ [mm]
- Tamaño máximo del árido $9 \leq D \leq 75$ [mm]
- Módulo de finura del árido fino $2,4 \leq MF \leq 3,0$

3.5.1. Características de los agregados.

Tabla N° 29. Característica de los agregados.

ENSAYO	Unidad	Valor
1.- Módulo de finura de la arena (MF)	s/u	2,90
2.- Peso unitario Compactado de la grava (PUC)	kg/m ³	1549
3.- Peso específico de la arena (γ_f)	gr/cm ³	2,44
4.- Peso específico de la grava (γ_g)	gr/cm ³	2,73
5.- Absorción de la arena (Aa)	%	1,72
6.- Absorción de la Grava (Ag)	%	1,2
7.- Humedad de la Arena (Ha)	%	2,07
8.- Humedad de la Grava (Hg)	%	3,06
9.- Tamaño máximo Nominal (TMN)	pulg	1"
10.- Tamaño Máximo (TM)	pulg	1 1/2"
11.- Peso específico del cemento	gr/cm ³	3,052

Fuente: Elaboración propia.

Son valores obtenidos en laboratorio de los agregados seleccionados para el desarrollo del presente proyecto explicado anteriormente en el punto 3.4.

3.5.2. Características de diseño.

Tabla N° 30. Características de diseño.

Resistencia de diseño (fck´)	210	kg/cm ²
Resistencia Característica (fck) (Tabla 11.12 ACI)	295	kg/cm ²
Asentamiento (S) (Tabla 11.4 ACI)	2	pulg
Relación Agua / Cemento (a/c) (Tabla 11,13 ACI)	0,48	s/u
Vol. Agr. Grueso / Vol. unitario concreto (b/bo) (Tabla 11.15 ACI)	0,7	s/u
Requerimiento de Agua (A) (Tabla 11.7 ACI)	170	kg/m ³

Fuente: Elaboración propia.

- **Resistencia característica**, es la resistencia de diseño cuando no hay datos que permitan determinar la desviación estándar, para una resistencia específica de 210 se debe aumentar 85 [Kg/cm^2] según la tabla 11.12 de ACI
- **Asentamiento**, es la deformación de la masa de hormigón realizada con el cono de Abrams. En el presente proyecto se eligió una consistencia seca y por ende el asentamiento es de 2 pulgadas o 5 centímetros, que también se especifican en la tabla 11.4 de ACI.
- **Relación agua/cemento**, se obtiene de dividir el peso del agua, entre el peso del cemento de la mezcla. A mayor relación menor resistencia mecánica y menor durabilidad del hormigón; entonces la correspondencia entre la resistencia a la compresión a los 28 días de edad y la relación agua/cemento según la tabla 11.13 de ACI es de 0,48.
- **Relación del volumen de agregado grueso y volumen unitario de concreto**, es el volumen de agregado grueso seco y compactado con varilla, por volumen de hormigón para diferentes módulos de finura de la arena; en nuestro caso el valor obtenido de la tabla 11.15 de ACI es de 0,7.
- **Requerimiento de agua**, es el requerimiento aproximado de agua de mezclado para diferentes tipos de asentamientos y tamaños máximos de agregados; según la tabla 11.7 de ACI a nuestro requerimiento de asentamiento y tamaño máximo de agregado le corresponde un valor de $170 \text{ Kg}/\text{m}^3$.

3.5.3. Cálculos.

Tabla N° 31. Cálculos de peso y volumen de los agregados.

Peso Agregado Grueso (Pag)	= (b/bo)xPUC 1084,3	Ec. (26) kg/m ³
Peso cemento (Pc)	= A / (a/c) 354,17	Ec. (27) kg/m ³
Volumen de Agregado Grueso (Vag)	= Pag/γg 397,18	Ec. (28) lt/m ³
Volumen del cemento (Vc)	= Pc/γc 116,04	Ec. (29) lt/m ³
Volumen de Arena (Vaf)	= 1000 - Vc - A - Vag 316,78	Ec. (30) lt/m ³
Peso del agregado fino (Paf)	= Vaf x γf 772,93	Ec. (31) kg/m ³

Fuente: Elaboración propia.

Los cálculos se realizan a partir de las características de los agregados y de las características de diseño, para obtener los pesos y volúmenes de los agregados.

Los cálculos se encuentran explicados en la tabla N° 26.

- A continuación se presenta un resumen de los pesos secos y volúmenes por metro cubico de hormigón.

Tabla N° 32. Pesos y volúmenes por metro cubico [m³] de hormigón.

Ingrediente	Peso Seco kg/m³	Volumen Absoluto lt/m³	Peso especifico gr/cm³
Cemento	354,17	116,04	3,052
Agua	170	170	1
Grava	1084,3	397,18	2,73
Arena	772,93	316,78	2,44
TOTAL	2381,40	1000,00	

Fuente: Elaboración propia.

- En la tabla N° 29 se realiza la corrección de los pesos debidos a la humedad de los agregados, además de la corrección de agua de amasado del hormigón, explicados en cada caso.

Tabla N° 33. Corrección de pesos y volúmenes debido a la humedad de los agregados.

Peso Húmedo de la arena (Pha)	= Paf x (1 + Ha)	Ec. (32)
	788,93	kg/m ³
Peso Húmedo de la Grava (Phg)	= Pag x (1 + Hg)	Ec. (33)
	1117,48	kg/m ³
Agua corregida a la grava (Acg)	= Pag x (Ag - Hg)	Ec. (34)
	-20,28	lt/m ³
Agua corregida a la Arena (Acf)	= Paf x (Aa - Ha)	Ec. (35)
	-2,71	lt/m ³
Total Agua Corregida (Atc)	= Acg + Acf	Ec. (36)
	-22,98	lt/m ³

Fuente: Elaboración propia.

- En la tabla 30 se hace un resumen de la dosificación resultante.

Tabla N° 34. Pesos y volúmenes por metro cubico [m³] de hormigón corregidos por humedad de los agregados.

Ingrediente	Peso Seco kg/m³	Peso Húmedo kg/m³
Cemento	354,17	354,17
Agua	170,00	147,02
Grava	1084,30	1117,48
Arena	772,93	788,93
TOTAL	2381,40	2407,60

Fuente: Elaboración propia.

- En la tabla 31 se presenta las proporciones de mezcla.

Tabla N° 35. Proporciones de mezcla.

Cemento	Arena	Grava	Agua
1,0	2,18	3,06	0,48

Fuente: Elaboración propia.

- En la tabla N° 32 se presenta la resistencia lograda con esta dosificación.

Tabla N° 36. Resistencia a los 28 días.

Resistencia a los 28 días [Kg/cm²]	285,96
--	---------------

Fuente: Elaboración propia.

Debido a que se logró una resistencia de 285 Kg/cm² se debe realizar una corrección, ya que el método ACI 211.1 es un método empírico.

- Se redujo 40 Kg por metro cúbico para lograr una resistencia que se muestra en la tabla N°33

Tabla N° 37. Resistencia a los 28 días corregida.

Resistencia a los 28 días [Kg/cm²]	217,88
--	---------------

Fuente: Elaboración propia.

Se trabajara el presente proyecto con este valor como resistencia patrón.

- En la tabla N° 34 se hace un resumen de la dosificación corregida.

Tabla N° 38. Pesos y volúmenes de dosificación corregida.

Ingrediente	Peso Seco kg/m³	Peso Húmedo kg/m³
Cemento	314,17	354,17
Agua	170,00	147,02
Grava	1084,30	1117,48
Arena	772,93	788,93
TOTAL	2381,40	2407,60

Fuente: Elaboración propia.

- En la tabla N° 35 se presenta las proporciones de dosificación corregida.

Tabla N° 39. Proporciones de dosificación corregida.

Cemento	Arena	Grava	Agua
1,0	2,46	3,45	0,54

Fuente: Elaboración propia.

3.6. Producción del hormigón

Una vez determinada la dosificación más conveniente, se procede a la fabricación del hormigón. Para ello es necesario, en primer lugar, almacenar las materias primas y disponer de unas instalaciones de dosificación adecuado, así como del correspondiente equipo de amasado.

3.6.1. Preparación del equipo y lugar de colocación

La preparación previa a la colocación del concreto debe incluir lo siguiente:

- a) La limpieza de todo equipo de mezclado y transporte del hormigón.
- b) La humedad de las unidades de albañilería de relleno de contacto con el hormigón.

El agua se dosifica en volumen; el cemento y los áridos en peso. Según la norma ASTM C172, las materias primas deben amasarse de forma que se consiga una mezcla íntima y homogénea, debiendo resultar el árido bien recubierto de pasta de cemento. La forma de mezclado es mecanizada a través de una mezcladora, la norma indica que el recipiente para el muestreo debe ser una tina de lámina metálica gruesa o superficie limpia no absorbente. La secuencia de carga de los ingredientes en la mezcladora representa un papel importante en la uniformidad del producto terminado.

Primeramente se debe introducir la arena, luego el cemento (estos dos elementos se mezclan de una forma homogénea), seguidamente se introduce la grava (se mezcla hasta que cada partícula de grava quede completamente rodeada de material agua cemento), se añade el agua en un 80%, se mezcla todo el hormigón y al final se introduce el restante 20% de agua con lo que mezclamos completamente hasta que todo el hormigón quede completamente homogéneo. El tiempo mínimo de mezclado es de 1 minuto y 15 segundos.

Fotografía N° 27. Máquina mezcladora.



Fuente: Elaboración propia.

3.7. Control de la consistencia

Este control fue realizado de acuerdo a la norma ASTM C143 donde el revenimiento elegido para un hormigón de consistencia seca es de $SLUM=5\pm 2$ centímetros. Si el hormigón fresco no cumple con este revenimiento, el material tendrá que desecharse y corregir el contenido de agua.

Fotografía N° 28. Ensayo de cono de Abrams.



Fuente: Elaboración propia.

3.8. Llenado y compactado de los moldes con hormigón fresco (T=0)

El llenado en los moldes estandarizados se lo realiza según la norma ASTM C31. Donde la norma indica que el número de capas está en función del tipo de compactación que se va a utilizar.

Tabla N° 40. Método de compactación según el revenimiento.

Descenso de cono [cm]	Método de compactación
$Slum \leq 5$	vibrado
$5 \leq Slum \leq 10$	vibrado (apisonado)
$Slum > 10$	apisonado

Fuente: ASTM C-31.

- Como el revenimiento trabajado es de **Slum= 5** centímetros y está compactado por vibración el número de capas será según la tabla N° 36

Tabla N° 41. Tipo de compactación.

Tipo y tamaño de probeta	Número de capas	N° inserciones del vibrador por capa	Espesor aprox. de la capa, pulg (mm)
Cilindros: Diám, pulg (mm)			
4 (100)	2	1	mitad de la profundidad de la probeta
6 (150)	2	2	mitad de la profundidad de la probeta
9 (225)	2	4	mitad de la profundidad de la probeta
Vigas: Ancho, pulg (mm)			
6 (150) a 8 (200)	1	Ver 9.4.2	Profundidad de la probeta
> 8 (200)	2 ó más	Ver 9.4.2	8 (200) lo más cerca posible

Fuente: ASTM C-31.

En la vibración mantenga un periodo uniforme de vibrado para cada tipo de hormigón, vibrador y tipo de probeta. La duración requerida depende de la trabajabilidad del hormigón y de la efectividad del vibrador. **Usualmente, se ha vibrado lo suficiente cuando la superficie del hormigón comienza a volverse suave y se observa una superficie lechosa,** el tiempo recomendado por la norma ASTM varía entre los 5 y 15 segundos.

- Para el desarrollo del presente trabajo se **usó una vibración = 10 segundos** en la mesa vibradora en 2 capas para el llenado de la probeta.

Vibradores.

- **Vibradores internos**, tienen un amplio campo de aplicación y son en general muy utilizados (siempre que la naturaleza del trabajo lo permita) por su mayor rendimiento y facilidad de operación. Dentro de los vibradores externos, los superficiales son mayormente empleados en pavimentos; entre ellos los llamados “de plataforma” y las “reglas vibratorias” que al mismo tiempo que compactan, permiten enrasar la superficie.
Se deben emplear aquellos con una frecuencia de vibración de al menos 7000 vibraciones por minuto (150 Hz), también Jiménez Montoya recomienda desde 6000 – 12000 [rpm], mientras se encuentre funcionando dentro del hormigón. El diámetro de un vibrador circular no debe ser superior a una cuarta parte del diámetro del molde cilíndrico.
- **Los vibradores adosados a la cimbra**, son menos eficaces que los anteriores, ya que una parte de la energía aplicada es absorbida por los moldes o cimbras; en general estos resultan muy útiles para el vibrado en ciertos elementos estructurales, como son los muros poco peraltados y las columnas muy reforzadas, en los que se imposibilita o resulta muy difícil el empleo de vibradores de inmersión.
- **Las mesas vibratorias**, por su parte son utilizadas de forma extensiva en la industria de la prefabricación, debido a que este procedimiento de vibrado es el

que mejor se adapta a las exigencias de la producción en serie. Generalmente las mesas vibratorias se encuentran montadas sobre resortes excéntricos ajustables, y encima de la mesa se aseguran los moldes.

Fotografía N°29. Equipo usado para realizar el vibrado de los moldes cilíndricos



Fuente: Elaboración propia.

3.8.1. Equipo usado.

Tabla N° 42. Características del equipo de vibrado.

CARACTERISTICAS DEL EQUIPO USADO (S238 KIT)	
Frecuencia de vibración del equipo	Variable 1000 a 10000 [rpm]
Frecuencia de vibración usada	9000 [rpm]
Capacidad de carga	250 [kg]
Área de la plataforma	762x762 [mm]

Fuente: Corimex LTDA. “Instrumentos para ensayos de materiales”

3.8.2. Curado inicial.

Después de terminar la faena de compactación, la probeta debe ser resguardada en un lugar lejos de vibraciones externas, golpes o pisos desnivelados. La probeta tiene que estar en ambiente húmedo con una temperatura aproximada de $20 \pm 3[^\circ\text{C}]$, si no cumple con los requisitos, se crean condiciones de un ambiente húmedo, envolviendo con plásticos de colores claros.

Fotografía N°30. Recubrimiento de moldes con plástico.



Fuente: Elaboración propia.

3.9. Desencofrado de las probetas y posterior curado

El curado inicial debe mantener el hormigón húmedo durante 24 horas las cuales son contadas a partir del acabado de las muestras. Según la ASTM C192, las muestras deben ser removidas de sus moldes en un tiempo no menor de 20 horas, ni mayor de 48 horas después de su elaboración. El curado como mínimo es de 7 días, pudiendo prolongarse en función a la edad de cada probeta, las probetas se encuentran inmersas en la piscina de curado el cual está saturada con cal para que se realice una reacción química entre los álcalis del hormigón y el oxidrilo de calcio (cal viva u óxido de calcio).

3.10. Hormigón revibrado con intervalos de 30 [min] a partir de $T = 0$ [hrs] hasta el tiempo de fraguado inicial.

Esta es la etapa más importante del proyecto, se toma como punto de inicio a la etapa 3.8. Entonces, esta etapa es considerada como el tiempo de inicio $T = 0$ [hrs], desde

aquí se realizó con **intervalos de 30 [min]** hasta que el hormigón llegue a la etapa de rigidización, con un **tiempo de revibrado = 10 segundos**.

En el presente proyecto de investigación, se realizaron 10 probetas de estudio por cada intervalo de tiempo, donde el resultado será la media de 8 probetas, despreciando el valor de 2 probetas, una del extremo inferior y otra del extremo superior o en su defecto las 2 más dispersas.

La tabla N° 39 indica el proceso que se realizó para cada intervalo de tiempo, a los que se le realizo un control de calidad.

Tabla N° 43. Intervalos de tiempo empleados.

N°	NÚMERO DE PROBETAS	EDAD	INTERVALO DE REVIBRADO	HORA DE REVIBRADO
		Días	[min]	[hrs]
1	10	28	30	00:30
2	10	28	30	01:00
3	10	28	30	01.30
4	10	28	30	02:00
5	10	28	30	02:30
6	10	28	30	03:00
7	10	28	30	03:30
8	10	28	30	04:00

Fuente: Elaboración propia.

3.11. Ensayos de control del hormigón patrón y hormigón revibrado.

A continuación se presentarán tres ensayos de control del hormigón, en los cuales se podrá apreciar las propiedades del hormigón patrón (contenido de vacíos, peso

específico y resistencia a la compresión del hormigón) y la evolución de estas propiedades con la inclusión del revibrado en el hormigón.

3.11.1. Contenido de vacíos en el hormigón.

El hormigón presenta una cierta cantidad de vacíos cuando está endurecido, tales vacíos son consecuencia del aire que en su debido momento (hormigón fresco) no se pudo disminuir, por este motivo se realizó un revibrado para eliminar la mayor cantidad de estos espacios.

El control de vacíos se basa en la diferencia de peso de un hormigón saturado en agua y un hormigón secado en el horno, es decir en el contenido de agua, que se lo realizó como se describe a continuación:

- Después de 28 días de la elaboración del hormigón, se debe tomar las dimensiones de las probetas para poder obtener sus dimensiones y volumen.
 - Se pesan las probetas de hormigón saturado y se las llevan al horno 24 horas para su secado a 40° centígrados evitando daño en su estructura.
 - Transcurrido el tiempo de secado se extraen las probetas para pesarlas nuevamente y obtener el peso de un hormigón seco.
 - Una vez obtenidas las dimensiones, peso saturado y peso seco se procede a los cálculos que permitirán determinar el porcentaje de cantidad de vacíos, que se detalla a continuación.
- 1) Se determina la diferencia de pesos entre un hormigón saturado y un hormigón seco, es decir:

$$\Delta W = W1 - W2 \qquad \text{Ec. (37)}$$

Donde:

ΔW = diferencia de peso [gr]

$W1$ = peso saturado [gr]

$W2$ = peso seco [gr]

- 2) Como se obtuvo la diferencia de pesos y esto es debido al contenido de agua en la probeta debido a la saturación, entonces la diferencia de peso es debido al contenido de agua que tiene como peso específico 1 [gr/cm³] lo que nos indica a través de esta relación peso-volumen del agua, se obtiene la diferencia de volumen, que es el contenido de vacíos y restando este volumen de vacíos al volumen medido geométricamente se obtiene el volumen del hormigón.
- 3) Teniendo los volúmenes de hormigón saturado, volumen del hormigón y el volumen de vacíos, se obtiene el porcentaje de vacíos en el hormigón.

$$(\%)vacios = \frac{volumen\ vacios}{volumen\ hormigon} * 100 \quad \text{Ec. (38)}$$

En la tabla N°40 se presenta el contenido de vacíos en el hormigón patrón y en el hormigón revibrado para cada intervalo de tiempo, además el decremento de vacíos en relación al hormigón patrón.

Tabla N° 44. Porcentaje de vacíos en el hormigón patrón y hormigón revibrado.

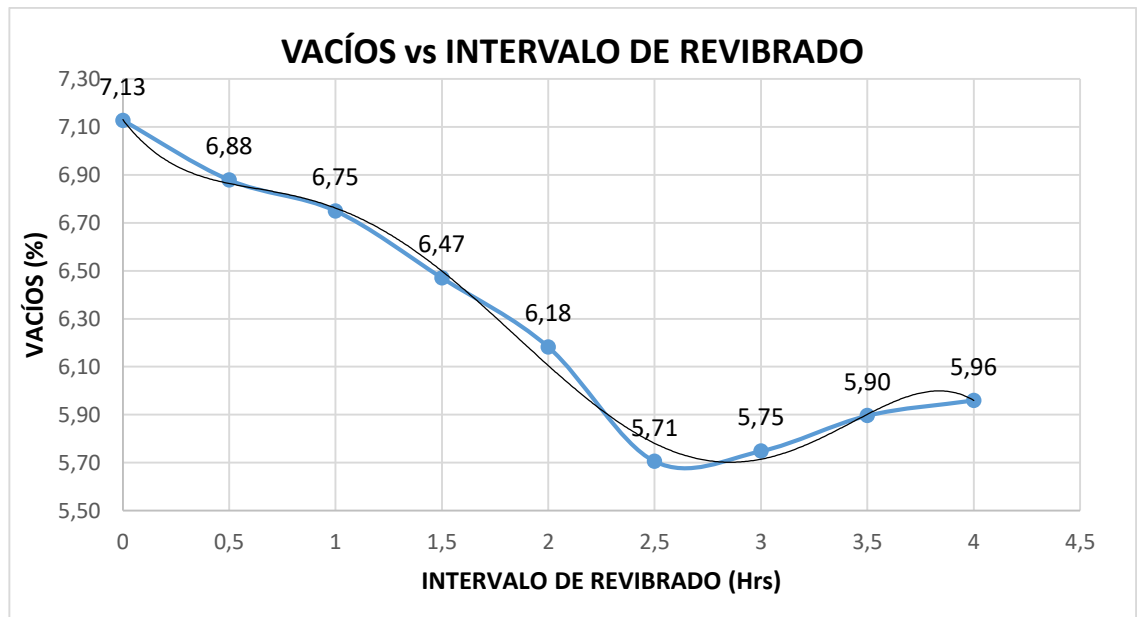
Intervalo de revibrado (hrs)	Identificación	Vacíos (%)	Decremento de vacíos (%)
PATRON	H-21	7,13	0
0,5	H-21	6,88	3,61
1	H-21	6,75	5,60
1,5	H-21	6,47	10,15
2	H-21	6,18	15,28
2,5	H-21	5,71	24,91
3	H-21	5,75	23,99

3,5	H-21	5,90	20,88
4	H-21	5,96	19,59

Fuente: Elaboración propia.

Para su mayor observación se presenta a continuación un gráfico y su respectiva ecuación.

Gráfico N°3. Vacíos en función a los intervalos de tiempo de revibrado.



Fuente: Elaboración propia.

$$V_h = -0,0487T^5 + 0,4793T^4 - 1,566T^3 + 1,9291T^2 - 1,1623T + 7,1303 \quad \text{Ec. (39)}$$

$$R^2 = 0,9937$$

Donde:

V_h = Vacíos del hormigón [%]

T = Intervalo de revibrado [hrs]

Como se puede observar el hormigón revibrado tiene menor contenido de vacíos, por ende más impermeable y también debido a que se ha disminuido las zonas de fractura por vacíos se aumenta su resistencia que se mostrará en el punto 3.11.3. El hormigón convencional presenta una cierta cantidad de porosidad cuando ha endurecido, tal porosidad es consecuencia del aire que no se pudo eliminar con el vibrado, pero que con el hormigón revibrado se pudo disminuir de una manera más efectiva, con la nueva vibración aplicada en el intervalo de tiempo más recomendado.

A continuación se presenta una tabla donde se presenta el contenido de vacíos en el hormigón convencional y el contenido de vacíos en el hormigón revibrado en el intervalo de tiempo más recomendado para su aplicación.

Tabla N°45. Porcentaje de vacíos.

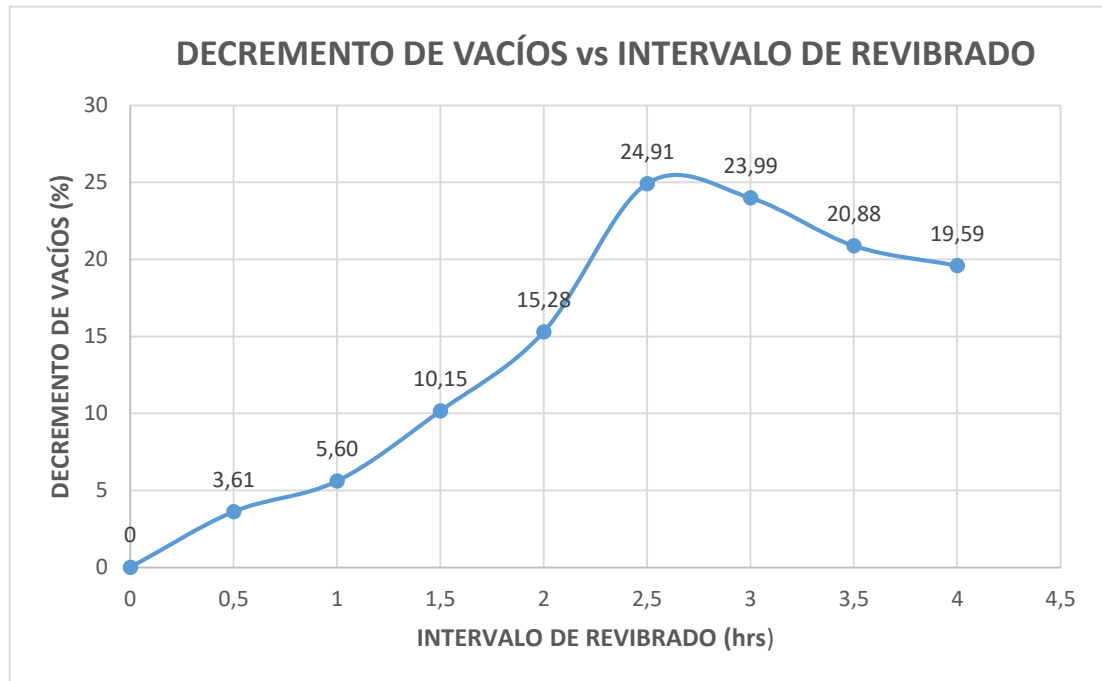
Intervalo de revibrado (hrs)	Identificación	Vacíos (%)	Decremento de vacíos (%)
PATRON	H-21	7,13	0
2,5	H-21	5,71	24,91

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla N° 40 se puede apreciar que se ha disminuido los vacíos con el revibrado, en comparación con el hormigón convencional, además de recomendar su revibrado en un intervalo de 2,5 horas para este fin.

La eliminación de vacíos provocado por el revibrado, nos ha permitido realizar una relación entre vacíos en el hormigón patrón y vacíos en el hormigón revibrado, de esta manera podemos observar porcentualmente cuánto hemos disminuido los vacíos en relación a los espacios vacíos del hormigón patrón.

Gráfico N°4. Decremento de vacíos.



Fuente: Elaboración propia.

3.11.2. Peso específico.

El peso específico del hormigón endurecido está en función a los materiales que lo componen; por ejemplo, el tipo de granulometría de los áridos gruesos y finos, del peso específico del cemento usado y del contenido de vacíos en el mismo.

El peso específico del hormigón es igual al peso en relación al volumen del mismo; para la obtención del peso específico del hormigón patrón y hormigón revibrado se realizó de la siguiente manera.

- Primeramente se debe tomar las dimensiones de las probetas de hormigón, después de los 28 días de su elaboración, para poder obtener sus dimensiones y volumen.

- Las probetas se las llevan al horno 24 horas para su secado a 40° centígrados evitando daño en su estructura.
- Transcurrido el tiempo de secado se extraen las probetas para pesarlas nuevamente y obtener el peso de un hormigón seco.

Una vez obtenidas las dimensiones y peso seco se procede a los cálculos que permitirán determinar el peso específico del hormigón, con la siguiente relación:

$$\gamma_{hor} = \frac{\text{PESO DEL HORMIGON}}{\text{VOLUMEN DEL HORMIGON}} \quad \text{Ec. (40)}$$

En la tabla N°42 se presenta el peso específico del hormigón patrón y del hormigón revibrado para cada intervalo de tiempo.

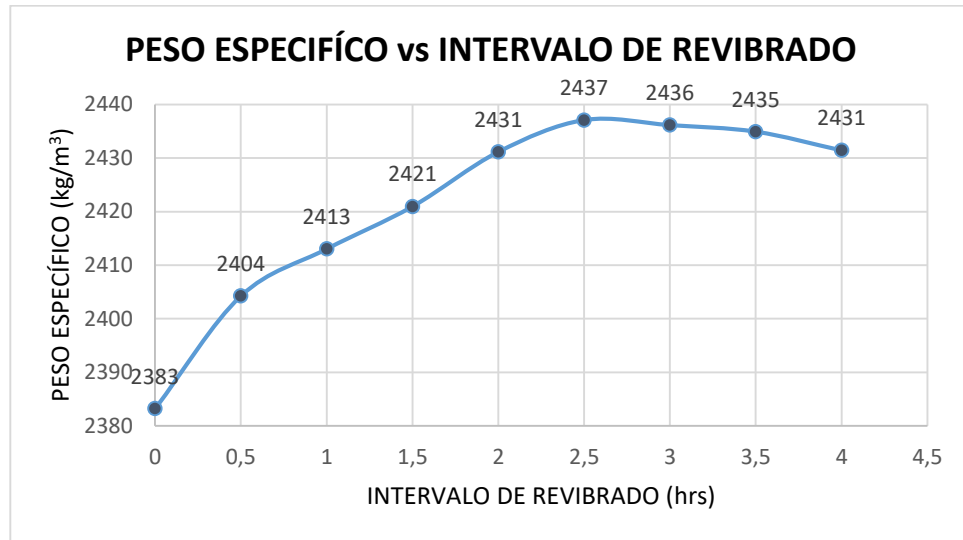
Tabla N° 46. Peso específico del hormigón patrón y hormigón revibrado.

Intervalo de revibrado (hrs)	Identificación	Peso esp (Kg/m³)
PATRON	H-21	2383
0,5	H-21	2404
1	H-21	2413
1,5	H-21	2421
2	H-21	2431
2,5	H-21	2437
3	H-21	2436
3,5	H-21	2435
4	H-22	2431

Fuente: Elaboración propia.

Para su mayor observación se presenta a continuación un gráfico.

Gráfico N°5. Peso específico en función a los intervalos de tiempo de revibrado.



Fuente: Propia.

Como se puede observar el hormigón revibrado tiene mayor peso específico que el hormigón convencional, debido a la eliminación de vacíos que éste sufrió, como consecuencia del revibrado. El hormigón convencional presenta una cierta cantidad de porosidad cuando ha endurecido, tal porosidad es consecuencia del aire que no se pudo eliminar con el vibrado, pero que con el hormigón revibrado se pudo disminuir de una manera más efectiva, con la nueva vibración aplicada en el intervalo de tiempo más recomendado.

A continuación se presenta una tabla donde se presenta el peso específico del hormigón convencional y del hormigón revibrado en el intervalo de tiempo más recomendado para su aplicación.

Tabla N°47. Peso específico.

Intervalo de revibrado (hrs)	Identificación	Peso esp (Kg/m³)
PATRON	H-21	2383
2,5	H-21	2437

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla N° 43 se puede apreciar que se ha aumentado el peso específico con el revibrado, en comparación con el hormigón convencional, además de recomendar su revibrado en un intervalo de 2,5 horas para lograr una mayor compactación en el hormigón, dando como resultado un mayor peso específico.

3.11.3. Resistencia a la compresión en el hormigón.

La resistencia a la compresión del hormigón es la medida más común de desempeño para diseñar estructuras de este material. La resistencia a la compresión se mide rompiendo probetas cilíndricas de hormigón en una máquina de ensayos de compresión, en tanto la resistencia a la compresión se calcula a partir de la carga de ruptura dividida entre el área de la sección que resiste la carga.

Para determinar la resistencia del hormigón, la norma ASTM C39 explica el método de ensayo normalizado para resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto.

La tabla N°44, presenta la resistencia a la compresión del hormigón convencional y hormigón revibrado, en el cual se puede observar que con la inclusión del revibrado se ha mejorado esta propiedad y que también ha perjudicado cuando se lo realiza pasado el tiempo inicial de fraguado en nuestro hormigón a las 3 horas y media, además también se muestra el porcentaje en que se ha mejorado o perjudicado esta propiedad en comparación con el hormigón patrón.

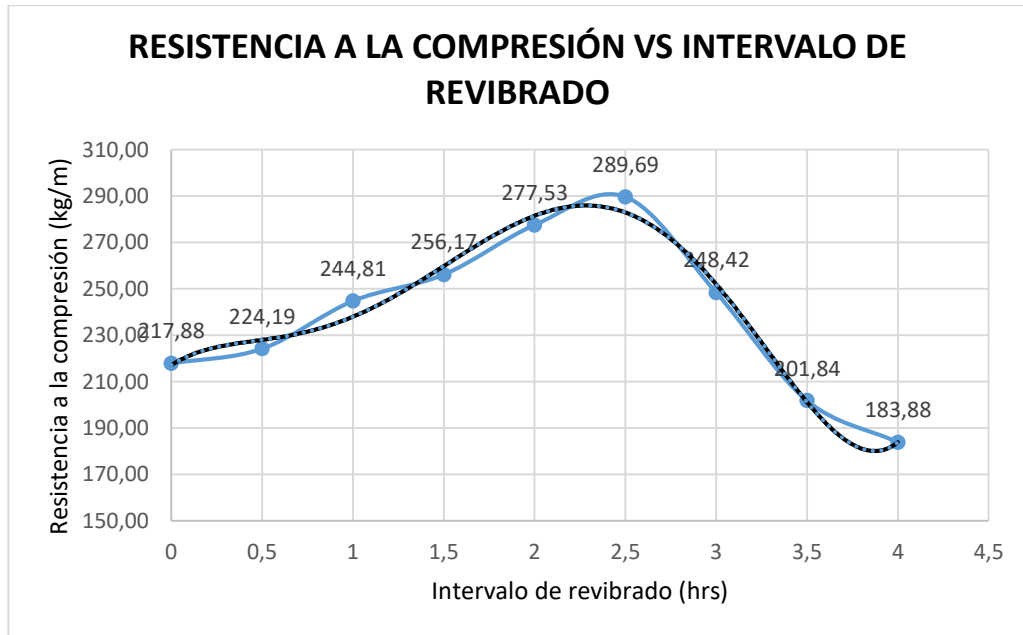
Tabla N° 48. Resistencia a compresión del hormigón patrón y hormigón revibrado.

Intervalo de revibrado (hrs)	Identificación	Resistencia 28 días kg/cm²	Incremento de resistencia (%)
PATRÓN	H-21	217,88	0
0,5	H-21	224,19	2,90
1	H-21	244,81	12,36
1,5	H-21	256,17	17,58
2	H-21	277,53	27,38
2,5	H-21	289,69	32,96
3	H-21	248,42	14,02
3,5	H-21	201,84	-7,36
4	H-21	183,88	-15,60

Fuente: Elaboración propia.

Para su mejor observación se presenta un gráfico y su respectiva ecuación, en el cual se observa cómo los intervalos de revibrado van favoreciendo y también perjudicando al hormigón cuando éste se lo realiza pasado el tiempo inicial del fraguado.

Gráfico N°6. Resistencia a la compresión en función a los intervalos de tiempo de revibrado.



Fuente: Elaboración propia.

$$R = 4,3684T^5 - 38,272T^4 + 104,5T^3 - 99,813T^2 + 50,118T + 217,1 \quad \text{Ec. (41)}$$

$$R^2 = 0,9843$$

R = Resistencia del hormigón a compresión simple [Kg/cm²]

T = Intervalo de revibrado [hrs]

A continuación se presenta una tabla donde se presenta la resistencia del hormigón convencional y del hormigón revibrado en el intervalo de tiempo más recomendado para su aplicación.

Tabla N° 49. Resistencia a compresión del hormigón.

Intervalo de revibrado (hrs)	Identificación	Resistencia 28 días kg/cm ²	Incremento de resistencia (%)
PATRÓN	H-21	217,88	0
2,5	H-21	289,69	32,96

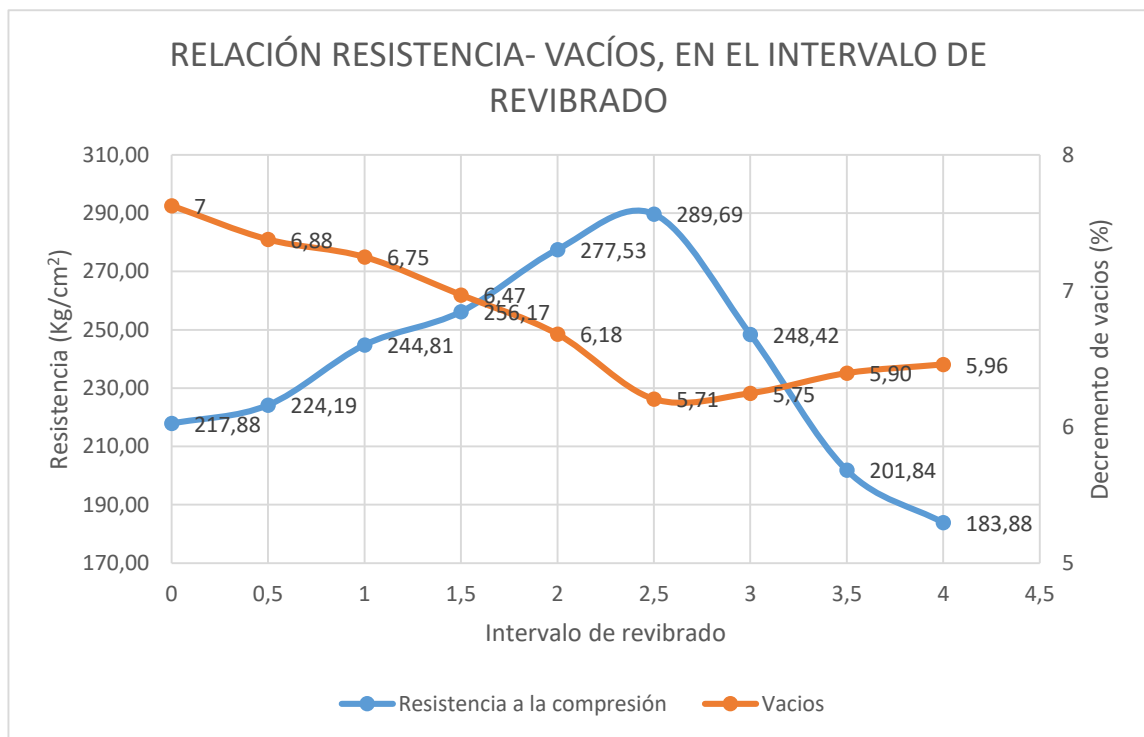
Fuente: Elaboración propia.

En la tabla N° 45 se puede apreciar que se ha aumentado la resistencia a compresión con el revibrado, en comparación con el hormigón patrón, además de recomendar su revibrado en un intervalo de 2,5 horas para lograr una mayor resistencia en el hormigón.

3.11.4. Relación de vacíos, peso específico y resistencia a la compresión.

Como se pudo observar en los puntos 3.11.1., 3.11.2., y 3.11.3., las condiciones del hormigón a través de la aplicación del revibrado han cambiado, pero todas están relacionadas con sus nuevas propiedades, para su mejor entendimiento a continuación se presentan los siguientes gráficos.

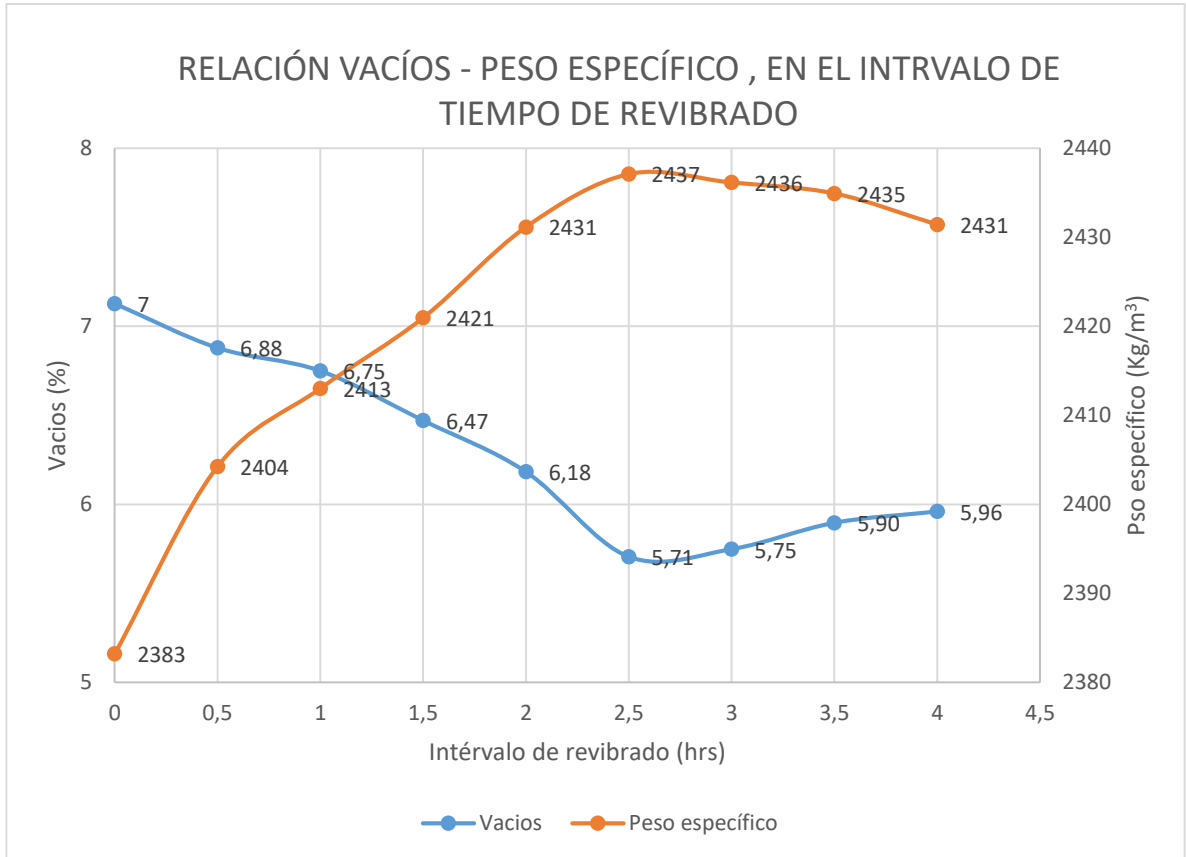
Gráfico N°7. Relación resistencia – vacíos, en el intervalo de revibrado.



Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico N° 5 se puede apreciar que la eliminación de vacíos a través del revibrado ha provocado un aumento de resistencia a la compresión del hormigón, hasta el tiempo de fraguado inicial (3,5 hrs), después de este tiempo se sigue eliminando los vacíos, pero la aplicación del revibrado afecta las uniones entre partículas, desfavoreciendo la resistencia a la compresión del hormigón.

Gráfico N°8. Relación vacíos – peso específico, en el intervalo de revibrado.



Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico N°6 se puede apreciar que a menos vacíos en el hormigón, mayor será el peso específico del mismo, ya que en el mismo volumen se introduce mayor masa de hormigón.

CONCLUSIONES
Y
RECOMENDACIONES

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

Las conclusiones se presentan de acuerdo al cumplimiento de cada uno de los objetivos y las hipótesis de investigación.

- En los ensayos realizados se encontró que el tiempo más eficaz para realizar el revibrado e incrementar la resistencia del hormigón a compresión simple a través de la eliminación de vacíos en una mesa vibradora es a las 2,5 horas.
- La eliminación de vacíos ha provocado en nuestro hormigón patrón que las partículas se encuentren mejor compactadas, mejorando la unión entre sí, en el tiempo de revibrado más recomendado provocando que su resistencia a compresión simple aumentase en un 32,96 (%) y su peso específico aumentará en un 2,2 (%).
- Con la aplicación del revibrado se ha provocado una mejor compactación aumentando de esta manera el peso específico del hormigón de 2383 Kg/m³ a 2437 Kg/m³ en el intervalo de tiempo recomendado para la eliminación de vacíos, que coincide con el mayor peso específico obtenido en el desarrollo del proyecto.

Tabla N°50

Intérvalo de revibrado (hrs)	Identificación	Peso seco (kg)	Peso esp (Kg/m³)	Incremento del P.E. (%)
Patrón	H-21	12,63	2383	0,0000
Revibrado	H-21	12,91	2437	2,2109

Fuente: Elaboración propia.

- La eliminación de vacíos en el hormigón convencional a través de la técnica del revibrado, ha permitido una mejor unión entre las partículas, aminorando puntos de debilitamiento, consiguiendo de esta manera aumentar la resistencia del hormigón.

Tabla N° 51

Intervalo de revibrado (hrs)	Resistencia 28 días kg/cm²
Patrón	217,88
Revibrado	289,69

Fuente: Elaboración propia.

- La aplicación del revibrado en el hormigón mejora su resistencia a la compresión simple a través de la eliminación de vacíos, hasta el tiempo de fraguado inicial, punto a partir del cual la perturbación del hormigón provoca un efecto desfavorable en la resistencia, debido a que el hormigón a partir de este punto comienza su cristalización y al perturbarlo estamos rompiendo las uniones que se están generando entre partículas. Este aumento en la resistencia en función al intervalo de revibrado ha permitido elaborar una ecuación empírica, E_c (41).
- La eliminación de vacíos con la aplicación del revibrado nos ha permitido generar la ecuación, E_c (39)
- En el presente proyecto se ha podido conocer y llevar a cabo la aplicación de la técnica del revibrado, además de evaluar su aplicación a favor y contra de la resistencia, contenido de vacíos y peso específico del hormigón revibrado.
- Si bien el revibrado data del año 1975 planteado por Neville A. M. en su libro “Tecnología del concreto”, actualmente no se usa en nuestro medio por el desconocimiento de la misma, ya que se cree que el hormigón una vez colocado en obra y compactado ya no se puede manipular, nada más falso. El hormigón

tiene un periodo de fraguado en el cual aún es manipulable; por tanto, conocer este tiempo es base para esta técnica.

- El presente estudio nos permitió contrarrestar la hipótesis planteada por Neville A. M. en su libro “Tecnología del concreto”, el cual nos planteaba un aumento de resistencia a la compresión del hormigón de un 14% y una decremento de vacíos de 30 % a partir de la aplicación del revibrado; ya que al desarrollar la aplicación del revibrado se consiguió un aumento de resistencia a la compresión de un 32,96% y un decremento de vacíos de 24,91% como se presenta en la tabla a continuación.

Tabla N° 52

Intervalo de revibrado (hrs)	Resistencia 28 días kg/cm²	Incremento de resistencia (%)	Vacíos (%)	decremento de vacíos (%)
Patrón	217,88	0,00	7,13	0,00
2,5	289,69	32,96	5,71	24,91

Fuente: Elaboración propia.

4.2. Recomendaciones

Como se pudo apreciar, el estudio de revibrado es amplio; por falta de tiempo no se pudo realizar con otros tipos de consistencias y formas de vibrado, pero el desafío está planteado para futuros estudios. Entonces, la culminación del presente proyecto es respaldo para plantear las siguientes recomendaciones.

- Se debe tener en cuenta que los resultados del presente trabajo de investigación responden a los agregados, cemento, dosificación, vibración y otros parámetros con los que se trabajó. Si éstos se cambian, los resultados pueden variar.
- Se debe tener muy en cuenta en la determinación del tiempo de fraguado inicial, porque es en este tiempo donde se aplica la técnica del revibrado a favor de la resistencia del hormigón, debido a que, llegado este tiempo, el hormigón

comienza a cristalizarse generando uniones entre sus partículas, perturbarlo en estas condiciones genera ruptura de las uniones.

- Existen varias formas de compactar un hormigón y eliminar vacíos, por ello conocer el buen funcionamiento y las recomendaciones necesarias que dan las normas es fundamental para el buen uso a favor de generar mejores condiciones en el hormigón.
- Se recomienda para su puesta en obra, un control estricto en el revibrado del hormigón.
- Se recomienda el uso de la técnica del revibrado en losas de pavimento rígido y estructuras prefabricadas, donde la aplicación del revibrado, no dañe el encofrado poniendo en riesgo de que ésta colapsara en su elaboración.

Por otro lado, también se plantean recomendaciones mínimas referidas a la confección de hormigones, control de calidad y otros en el laboratorio.

- Los agregados que son manipulados en el laboratorio deben tener un estricto control de calidad, desde la toma de muestras para llevar al laboratorio, hasta el uso mismo del banco, una vez certificada su calidad.
- Se debe tener un control cuidadoso del curado, tanto en el laboratorio como en el campo de aplicación del hormigón.
- Se recomienda tener en cuenta la edad del cemento, pues este parámetro es fundamental porque influye en el tiempo de fraguado.
- Se debe tener cuidado con el % de humedad que tienen los insumos (grava y arena), porque la humedad del agregado varía. No será la misma humedad para el agregado que esté en la parte superior y otro que esté en la parte inferior.
- Las herramientas como carretilla, cono de Abrams y sus complementos tienen que estar totalmente limpios.
- La dosificación tiene que ser por peso, entonces se requiere utilizar envases que estén en buen estado.
- Se debe tener cuidado con la intensidad y el tiempo de vibrado, porque se podría causar segregación.

- Realizar el control estricto de calidad del hormigón mediante el cono de Abrams, si éste no cumple el revenimiento, entonces se debe desechar la mezcla.
- Verificar la homogeneidad de la mezcla, para así no tener errores cuando se someta a controles de calidad.
- Al realizar la producción del hormigón tener cuidado con la cantidad de agua a utilizar, pues de esto dependerá el ensayo de consistencia.
- El material de hormigón con el que se va rellenar, deberá estar protegido en una superficie impermeable para no perder humedad y no alterar las propiedades iniciales.