

I. INTRODUCCIÓN.

I.1. Introducción.

En ingeniería civil es necesario tener en cuenta los datos, parámetros y propiedades de los materiales, ya sea para conocer el comportamiento que tendrán estos materiales al someterse a diferentes tipos de esfuerzos, estudiar los fenómenos que se presentan en éstos al exponerse a ciertas condiciones climatológicas o geográficas, si el uso que se les va dar es apropiado para la función que se pretende asignarle, o si su obtención y utilización es conveniente si se pretende ahorrar en gastos.

Uno de los materiales más utilizados en este rubro es el hormigón el cual se utiliza en la construcción de elementos estructurales como vigas, columnas, fundaciones, muros, cubiertas, etc., ya sea utilizando hormigón simple o en conjunto con otros materiales como el acero. El hormigón a su vez se encuentra conformado por cemento, agua, aditivos y agregados finos y gruesos, agregados los cuales se extraen de fuentes naturales y son depositados, procesados y almacenados, formando los llamados “bancos de materiales”.

Para esta investigación, se pretende determinar la variación de valores del módulo de elasticidad a compresión del hormigón H-25, al utilizar agregados finos y gruesos provenientes de diferentes bancos de materiales ubicados en Santa Ana, Bella Vista y Sella, localizados en el interior del Valle Central de Tarija, con el propósito de verificar si cambia el valor de este parámetro al utilizar agregados de diferentes fuentes de material.

Para esto es necesario que se realicen pruebas de laboratorio, las cuales serán capaces de brindarnos los datos necesarios para estimar el valor del módulo de elasticidad a compresión del hormigón, como también la dosificación requerida para la elaboración de probetas cilíndricas a utilizar en los ensayos de laboratorio y la caracterización de los agregados que lo componen. Con estas probetas se realizará el ensayo para determinar el módulo de elasticidad a compresión del hormigón H-25 conformado por los agregados de los tres bancos de material ya mencionados.

I.2. Antecedentes.

El módulo de elasticidad de un material ayuda a determinar la facilidad que tiene éste para deformarse ante un esfuerzo al que se encuentra sometido, sea éste de tracción, compresión o cortante.

En el caso del módulo de elasticidad a compresión del hormigón, se han realizado pruebas y ensayos en diferentes partes del mundo (en países como Estados Unidos, Guatemala, España, Rusia, etc.) para obtener información de este parámetro para los profesionales y estudiantes de ingeniería civil.

Estas pruebas ayudaron a desarrollar fórmulas, tablas y gráficos que permiten encontrar el módulo de elasticidad en función de, principalmente, la resistencia a compresión media y/o la resistencia característica a compresión del hormigón; otros parámetros que influyen en este tipo de fuentes son el peso específico del hormigón, el tipo de roca utilizada en los agregados y la edad del hormigón hasta el día de su rotura.

La variación del módulo de elasticidad a compresión del hormigón H-25 utilizando agregados provenientes de diferentes bancos de material ubicados en el Valle Central de Tarija es un tema que no se ha analizado previamente, y hoy en día puede brindar información a profesionales y estudiantes de ingeniería civil para realizar hormigón en base al uso que se vea conveniente en la estructura o en su investigación.

I.3. Objetivos.

I.3.1. Objetivo general.

Determinar los valores de los módulos de elasticidad a compresión de las probetas de hormigón simple tipo H-25, conformadas por los agregados provenientes de cada uno los bancos de Santa Ana, Bella Vista y Sella, ubicados en el Valle Central de Tarija, mediante realización de ensayos de laboratorio normalizados.

I.3.2. Objetivos específicos.

- Obtener las propiedades mecánicas y físicas de los agregados de los tres bancos de materiales de Santa Ana, Bella Vista y Sella.
- Establecer la dosificación para elaborar las muestras de hormigón H-25 para cada uno de los tres bancos de material en base a las propiedades obtenidas.
- Determinar la deformación de las muestras de hormigón H-25 con 28 días de edad utilizando la máquina de rotura a compresión en laboratorio y un compresómetro.
- Comparar los resultados de módulo de elasticidad a compresión obtenidos de los cálculos realizados con datos de laboratorio con los resultados obtenidos de fórmulas de las normativas del hormigón.

I.4. Justificación.

En la ingeniería civil, el material más utilizado en diseños y construcción es el hormigón, debido a que el mismo es un material bastante resistente a los esfuerzos al ser combinado con el acero, además, los materiales que componen el hormigón son fáciles de obtener.

La determinación del valor del módulo de elasticidad a compresión del hormigón es importante para el diseño de una estructura de hormigón, permitiendo al profesional optar por una alternativa óptima dependiendo de la función de dicha estructura, o en el caso de un estudiante, saber si el material utilizado para la dosificación de la muestra de hormigón es la apropiada para la práctica y/o investigación que esté realizando.

Se pretende obtener el conocimiento apropiado sobre cómo puede afectar el valor de un parámetro importante en piezas de hormigón conformadas por agregados extraídos de diferentes lugares de la ciudad, para que profesionales, estudiantes y trabajadores que participan en construcción y diseño de obras puedan estar mejor informados al momento de elegir que agregados utilizar. Además, en los ensayos de laboratorio a realizar para este trabajo de investigación se aplicará todo lo aprendido durante la formación del profesional de la Carrera de Ingeniería Civil.

I.5. Alcance.

Entre el tipo de hormigón a utilizar se decidió utilizar el hormigón H-25 como objeto de estudio, debido a que, para la resistencia de este tipo de hormigón (es decir 250 kg/cm^2 o

25 MPa), se puede llegar a una mayor aplicación de carga al tener mayor resistencia, y con esto obtener fácilmente la deformación del hormigón, necesaria para determinar el módulo.

En lo referente a los ensayos a realizar, se optó por utilizar aquellos descritos en la Guía de Laboratorio de Hormigón que brinda la universidad, basada en las normas de la sociedad estadounidense ASTM (American Society for Testing and Materials o Sociedad Americana para Pruebas y Materiales). El ensayo para determinar el módulo de elasticidad a compresión del hormigón no se indica en la guía de laboratorio, el mismo se explica en las normas ASTM y el laboratorio cuenta con el equipo necesario para su adecuada realización de acuerdo a lo establecido en las mismas; este ensayo se realizará en probetas con una edad de 28 días.

Se pretende únicamente determinar los valores de los módulos de elasticidad a compresión de probetas de hormigón conformadas por los agregados de diferentes bancos, para verificar si existe una diferencia de valores en este parámetro al cambiar los agregados.

Los bancos que se tomaron en cuenta para realizar esta investigación son:

- Río Santa Ana. - Coordenadas: 21°35'59.9"S 64°38'15.1"O

Figura 1.1. – Vista satelital de banco de río Santa Ana.



Fuente: *Elaboración propia – Extraído de Google Maps.*

- Río Bella Vista. - Coordenadas: 21°39'05.3"S 64°50'16.5"O

Figura I.2. – Vista satelital de banco de río Bella Vista.



Fuente: Elaboración propia – Extraído de Google Maps.

- Río Sella. - Coordenadas: 21°25'19.2"S 64°42'39.5"O

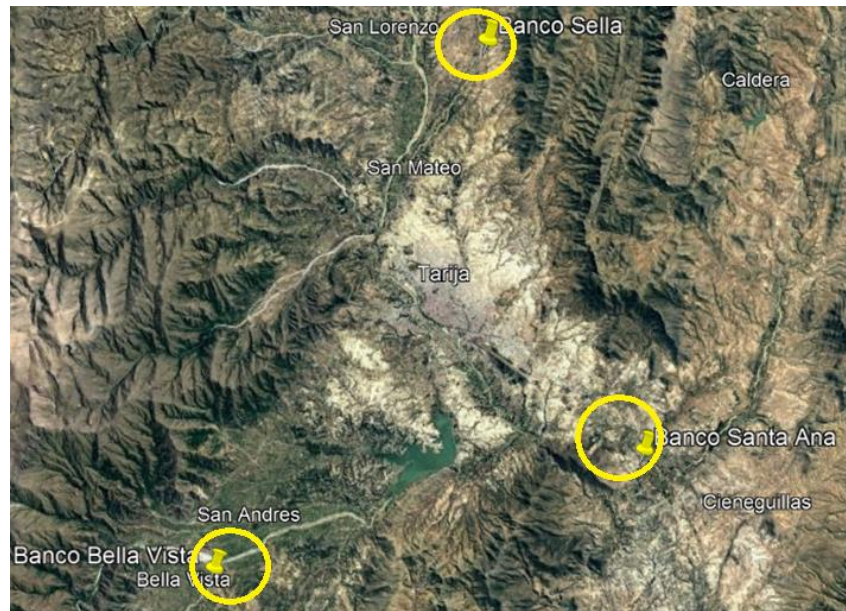
Figura I.3. – Vista satelital de banco de río Sella.



Fuente: Elaboración propia – Extraído de Google Maps.

Se observa en la Figura I.4 una vista satelital de la ubicación de los tres bancos de materiales mencionados con respecto a la ubicación de la ciudad de Tarija, localizada en el centro de la imagen.

Figura I.4. – Vista satelital de ubicación de los bancos de material.



Fuente: Elaboración propia – Extraído de Google Earth.

Los agregados de Santa Ana y Sella se caracterizan por tener forma redondeada y los de Bella Vista poseen forma angular, debido a que estos están triturados.

I.6. Metodología de la investigación.

En este trabajo de investigación se identifica un alcance de estudio descriptivo, esto se debe que se pretende determinar una propiedad o característica de un objeto, midiendo un valor para posteriormente describirla sin que sea necesario el determinar la relación entre otras propiedades ni determinar la razón de ser de dicha propiedad. En este caso, sería determinar el valor del módulo de elasticidad a compresión en el hormigón mediante pruebas de laboratorio en las que se utilizan equipos que miden este valor, considerando que las probetas de hormigón serán realizadas con agregados extraídos de diferentes bancos ubicados dentro de la zona correspondiente al Valle Central de Tarija, para describir dichos valores y verificar la diferencia o similitud que llegue a existir entre ellos.

La técnica de investigación a utilizar será el de observación dado a que se percibe lo que ocurre al realizar los ensayos y anotar los resultados que se obtienen de los mismos, para así obtener la información para cumplir el objetivo del proyecto, relacionado con proposiciones teóricas referidas al objeto de investigación.

La realización de esta investigación es producida mediante ensayos de laboratorio, estandarizados por la normativa estadounidense ASTM (American Society for Testing and Materials o Sociedad Americana para Pruebas y Materiales), en las instalaciones del Laboratorio de Hormigón de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

Para encontrar los módulos de elasticidad de las probetas cilíndricas de hormigón es necesario, en primer lugar, determinar la dosificación adecuada para cada tipo de agregado que se va a utilizar para realizar estas probetas. Para esto se debe realizar ensayos en los agregados de cada banco para determinar sus propiedades, como ser la granulometría, el peso específico y el peso unitario, para la parte fina y la parte gruesa, y con estos datos encontrar la dosificación adecuada para la realización de las probetas.

Una vez armadas las probetas, se debe realizar el ensayo de rotura a compresión en las mismas a los 28 días de su vaciado, esto para encontrar la resistencia compresión última, dato que será importante tener en cuenta para el ensayo del módulo de elasticidad.

El ensayo del módulo de elasticidad a compresión en cilindros de hormigón se realizará mediante el uso de un compresómetro y su dial, el cual nos ayudará a determinar la deformación axial de la probeta al aplicársele esfuerzo hasta un equivalente al 40% de la resistencia a compresión última. La razón por la cual toman los datos correspondientes a este porcentaje del esfuerzo último se debe a que la curva esfuerzo deformación se asemeja a una línea recta, cuya pendiente es el módulo de elasticidad; el valor de este módulo es válido hasta un esfuerzo de compresión menor que el 50% del esfuerzo último y generalmente se toma hasta el 40% es este valor.

I.7. Hipótesis.

Los valores del módulo de elasticidad a compresión del hormigón H-25 conformado por los agregados extraídos de diferentes bancos del Valle Central de Tarija tendrán entre sí una variación considerable, debido a que la caracterización de cada uno de los agregados es diferente.

I.8. Descripción de muestras a utilizar.

Las probetas de hormigón a utilizar en los ensayos de la resistencia a compresión y del módulo de elasticidad del hormigón, tendrán forma cilíndrica con medidas de diámetro igual a 6 pulgadas (15,24 cm.) y una altura igual a 12 pulgadas (30,48 cm.), dimensiones que mantienen entre sí una relación altura/diámetro igual a 2, como lo establecido en la normativa ASTM para este tipo de ensayos.

La dosificación de las mismas se obtendrá en función a los datos obtenidos de las pruebas aplicadas a los diferentes agregados en laboratorio; las dosificaciones de las probetas para cada banco de material deberán cumplir con lo establecido para un hormigón tipo H-25. Estarán conformadas por el cemento, agua y los agregados gruesos y finos extraídos de los bancos de Santa Ana, Bella Vista y Sella.

II. MARCO TEÓRICO.

II.1. Definición del hormigón.

Comúnmente también se le conoce como concreto, se define como un material de construcción conformado por la mezcla uniforme de cemento, agregado fino (arena), agregado grueso (grava) y agua, en algunos casos teniendo aire incluido intencionalmente (mediante el uso de cementos y/o aditivos especiales) y aditivos que modifican sus propiedades y características físicas y químicas (CEB-FIP, 1990). No se debe confundir con el mortero, ya que este material no posee agregado grueso en su mezcla a diferencia del hormigón.

El hormigón es producido por la hidratación de la pasta de cemento, proceso al cual se lo define como un conjunto de reacciones químicas producido por la mezcla entre el cemento y el agua para formar un material aglutinante que une al resto de los materiales que conforman el hormigón, lo solidifica y le proporciona la resistencia mecánica requerida (Neville, 1995).

Figura II.1.- Interior de una edificación compuesta por diferentes elementos estructurales de hormigón.

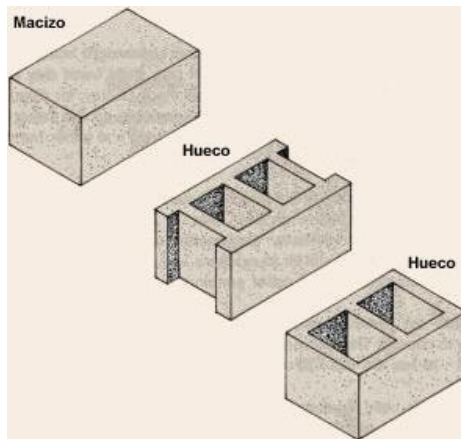


Fuente: Orazi, M. (1975) <https://www.flickr.com/photos/marcoorazi75/15760650802/>.

Este material se caracteriza principalmente por tener una buena resistencia a la compresión, pero a su vez una resistencia baja al resto de los esfuerzos, como los son tracción, cortante y torsión. Es ideal para utilizar en construcción de obras de arquitectura e ingeniería, especialmente al ser combinado con el acero, el cual ayuda a mejorar la

resistencia en el hormigón a los distintos tipos de esfuerzos en diferentes tipos de estructuras como puentes, edificios, túneles, muros de contención, etc. Con este material es posible crear estructuras prefabricadas como vigas pretensadas, bloques, pilares, pórticos, cerchas, entre otros.

Figura II.2.- Diferentes tipos de bloques de hormigón.



Fuente: [Tipos de bloques de hormigón] (s.f.)

https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6708s/x6708s03.htm.

Posee una elevada resistencia al fuego y a la penetración de agua, también la facilidad de colocarse en los encofrados de casi cualquier forma. Una vez endurecido, el hormigón no se debilita por la humedad, además, debido a que tiene la capacidad de reflejar la luz, no llega a absorber tanto calor.

II.1.1. Propiedades del hormigón.

Las propiedades del hormigón dependen en mayor medida de la calidad y proporciones de los componentes de la mezcla, al igual que de las condiciones de humedad y temperatura durante su realización y fraguado (García-Morán-Arroyo, 2009). Entre algunas de las principales propiedades del hormigón, tanto en estado fresco como endurecido, tenemos:

Consistencia.

Representa la facilidad o dificultad que tiene el hormigón en estado fresco para deformarse. Esta propiedad depende de factores como: tamaño máximo de agregado,

granulometría, cantidad de agua, forma de los áridos, etc. Una consistencia inadecuada puede provocar aparición de vacíos, porosidad y segregación.

Se puede determinar mediante algunos procedimientos como el Consistómetro Vebe, la Mesa de Sacudidas y el muy utilizado Cono de Abrams; se recomienda que para estos procedimientos se utilice un tamaño máximo de áridos de 40 milímetros.

Homogeneidad.

Es la cualidad por la cual los diferentes componentes del hormigón se distribuyen regularmente en toda la masa, de manera que la mezcla de los componentes en cualquier parte del material resulte prácticamente igual.

Esto se logra fácilmente mediante acción vibratoria utilizando una amasadora u hormigonera y puede verse afectada de mala manera por decantación y/o segregación ocasionada durante el transporte, el vertido y el compactado del material, siendo importante realizar estas actividades de forma adecuada y cuidadosa. También es preciso trabajar con una mínima cantidad de agua, mayor contenido de cemento y arenas con buen porcentaje de fino.

Docilidad.

Puede considerarse como la aptitud de un hormigón para ser manejado, colocado, transportado y compactado con los medios que se dispone, está relacionada con la consistencia y la homogeneidad.

Algunos de los factores de los que esta propiedad del hormigón depende son: La cantidad de agua de amasado, granulometría de los agregados, forma de los agregados, forma y tamaño del molde, el contenido y finura del cemento. Los plastificantes pueden incrementar la docilidad del hormigón.

La docilidad del hormigón se valora determinando su consistencia mediante cualquier ensayo normalizado en hormigones normales. En el caso de hormigón autocompactante se utilizan ensayos como: embudo en “V”, escurrimiento con anillo japonés y ensayos de la caja en “L”.

Peso específico.

Aquí se puede separar el peso específico del hormigón en sus dos estados, fresco y endurecido.

En el hormigón en estado fresco, compactado o no, el valor de este parámetro que repercute en la consistencia, indica una alteración de la granulometría de los áridos, del contenido en cemento o del agua de amasado, por lo que debe dar origen a las correcciones oportunas. El valor de este parámetro en Kgf/m^3 comparte el mismo valor que la densidad en Kg/m^3 .

Para el hormigón en estado endurecido depende de factores como la naturaleza de los áridos, de su granulometría y del método de compactación empleado. Mientras mayor sea el peso específico de los agregados, mayor la cantidad de agregados gruesos utilizados y la compactación, mayor será el peso específico del hormigón.

Permeabilidad.

Se refiere a la capacidad del agua de atravesar el hormigón sin modificar su estructura interna, siendo más permeable cuanto mayor sea esta capacidad y más impermeable al ser lo contrario, siendo este último el estado deseable en el hormigón cuando está seco. Es importante para resistir ataques químicos.

Más impermeable será el hormigón cuando:

- Más finamente molido esté el cemento.
- Menor sea la relación agua/cemento.
- Mejor sea la composición granulométrica del hormigón.
- Más largo sea el tiempo de curado.

La relación agua/cemento es el más influyente de estos factores, los cuales también hacen variar su red capilar.

Si bien existen métodos para determinar la permeabilidad del hormigón, ninguna de estas brinda una información garantizada, siendo incierta la concordancia entre medidas realizadas según distintos métodos sobre un mismo hormigón. Además, debe tenerse en

cuenta que estos métodos solo pueden realizarse en muestras *in situ* y no en probetas creadas en moldes.

II.1.2. Clasificación del hormigón.

El hormigón se clasifica de diferentes formas, entre las más importantes tenemos las siguientes.

II.1.2.1. Por su consistencia.

De acuerdo a su consistencia, obtenida mediante la medición del asentamiento del hormigón fresco con el ensayo del Cono de Abrams, el hormigón se clasifica como indica la Tabla II.1.

Tabla II.1. - Tipos de hormigón por su consistencia.

<i>TIPO DE HORMIGÓN POR CONSISTENCIA.</i>	<i>ASENTAMIENTO EN CONO DE ABRAMS [cm].</i>
Seca	0 – 2
Plástica	3 – 5
Blanda	6 – 9
Fluida	10 – 15
Líquida	16 o mayor

Fuente: “Jiménez Montoya Hormigón Armado” 15ta Edición; García, A., Morán, F. y Arroyo, J.C.

II.1.2.2. Por su peso unitario.

Esta clasificación es en función al peso que tiene un determinado volumen unitario de hormigón, la cual se indica en la Tabla II.2.

Tabla II.2. - Tipo de hormigón por su peso unitario.

<i>TIPO DE HORMIGÓN.</i>	<i>PESO UNITARIO [kgf/m³].</i>
Ligero	Menor a 2000
Normal	2000 - 2800
Pesado	Mayor a 2800

Fuente: “Jiménez Montoya Hormigón Armado” 15ta Edición; García, A., Morán, F. y Arroyo, J.C.

II.1.2.3. Por su uso estructural.

De acuerdo a sus aplicaciones, propiedades técnicas, método constructivo o estética, los hormigones se clasifican de la siguiente manera:

- Hormigón convencional.
- Hormigón de alta resistencia.
- Hormigón con fibras.
- Hormigón reciclado.
- Hormigón ligero estructural.
- Hormigón alta densidad.
- Hormigón autocompactante.
- Hormigón proyectado.

II.2. Componentes del hormigón.

II.2.1. Cemento.

El cemento es un material inorgánico de molido fino, que es utilizado como conglomerante hidráulico, es decir, es un material que al ser mezclado con agua se forma una pasta que fragua y endurece por reacciones químicas de hidratación, ya sea que esta mezcla se encuentre expuesta al aire o sumergida en agua, permaneciendo estable en ambos estados (García-Morán-Arroyo, 2009). Al ser combinados con otros materiales como grava, arena, cal, yeso, etc., puede formar productos o materiales de construcción con distintas funcionalidades, útiles en el ámbito de la construcción e ingeniería civil.

Los principales materiales por los cuales se fabrica el cemento Portland son la piedra caliza y la arcilla (Abanto, 2009), se caracteriza por ser un polvo de color gris, más o menos verdoso.

El cemento influye bastante en las propiedades que adopta el hormigón, ya que, si se quiere llegar a alcanzar altas resistencias, alcanzar resistencias mayores en un corto lapso de tiempo o brindar cierto tipo de propiedades especiales para estructuras especiales (muros para cuartos de radiografías, paredes para piscinas, estructuras sometidas a temperaturas extremas), es muy importante determinar el tipo de cemento que se debe utilizar. El cemento común, o cemento Portland, es el habitual a utilizar en construcciones y en realización de ensayos de investigación.

La calidad del cemento se determina por su resistencia a compresión, la cual es completamente diferente a la resistencia a compresión del hormigón. La resistencia a compresión del cemento se determina mediante un ensayo aplicado a un mortero normalizado el cual representa su resistencia mínima. Sin embargo, es necesario tomar en cuenta que la resistencia del cemento influye en la resistencia del hormigón, mientras mayor sea la resistencia del cemento, mayor será la del hormigón.

Entre los principales componentes químicos del cemento se encuentran: la cal, la sílice, la alúmina y el óxido férrico (hierro).

Estos componentes químicos se encuentran combinados en el cemento, formando aluminatos, silicatos y ferritos cálcicos, a estos se los conoce mejor bajo el nombre de “componentes potenciales”, los cuales se definen como los constituyentes hidráulicos del cemento (García-Morán-Arroyo, 2009), sus cantidades se indican en la Tabla II.3.

Tabla II.3. - Cantidad de componentes potenciales existentes en el hormigón.

Componente Potencial.	Cantidad en porcentaje.
Silicato tricálcico (SC_3)	40 – 50 %
Silicato bicálcico (SC_2)	20 – 30 %
Aluminato tricálcico (AC_3)	10 – 15 %
Aluminoferrito tetracálcico (AFC_4)	5 – 10 %

Fuente: “Jiménez Montoya Hormigón Armado” 15ta Edición; García, A., Morán, F. y Arroyo, J.C.

En la Tabla II.3 se utiliza una nomenclatura especial, que es habitual en lo referente a la química del cemento. De esta nomenclatura se indica su significado a continuación:

- Sílice (SiO_2).....S
- Cal (CaO).....C
- Alúmina (Al_2O_3).....A
- Hierro (Fe_2O_3).....F

II.2.2. Agregados.

En algunas bibliografías también se refieren a este material como “áridos”. Los agregados son los conjuntos de partículas minerales e inorgánicas, que se utilizan para la realización

del hormigón con el propósito de brindarle la resistencia para soportar todos los esfuerzos externos a los que se somete. Llegan a formar las $\frac{3}{4}$ partes de una mezcla de hormigón.

Tanto los agregados naturales como los artificiales, es decir, agregados que son extraídos de una fuente natural (canteras, terrenos) y agregados que son sometidos a procesos mecánicos de trituración luego de su extracción, pueden utilizarse para mezclas de hormigón.

Para el ámbito de la construcción, se clasifican por tamaño a los agregados, en este caso como: agregado grueso y agregado fino.

II.2.2.1. Agregado grueso.

Este tipo de agregado se refiere principalmente a la roca y/o grava, natural o triturada, cuyo tamaño máximo es de 50 mm. ó 2 plg., y el mínimo es de 4,76 mm. ó 0,187 plg. (Abanto, 2009), este último equivalente al tamaño de la abertura de una malla de tamiz N°4 según la norma estadounidense ASTM.

Este componente proporciona al hormigón un mayor volumen, con la particularidad que reduce el peso total en el hormigón en algunos casos hasta cuatro veces más su peso, debido a que reduce la cantidad de pasta de cemento y agregado fino a utilizar en la mezcla.

En caso de hormigones de hasta 250 kg /cm² de resistencia a compresión, se recomienda que el tamaño máximo del agregado grueso deba ser tan grande como sea posible, tomando en cuenta las consideraciones necesarias para el tipo de estructura a realizarse; mientras que en hormigones de resistencias superiores se recomienda reducir el tamaño máximo, ya que esto influye en la eficiencia del hormigón.

El uso del agregado triturado, o grava triturada, tiende a generar más vacíos en el hormigón que una grava natural.

II.2.2.2. Agregado fino.

Las partículas de este agregado son aquellas que pasan del tamiz N°4 y se retienen en el tamiz N°200 (0,075 mm. ó 0,003 plg.), este tipo de agregado constituye la mayor parte en peso del hormigón (Abanto, 2009), también se le conoce comúnmente como arena.

Una de las principales funciones es la de brindar mejor manejabilidad a la mezcla al actuar como un lubricante para los agregados gruesos, al igual que su utilización como relleno para el hormigón, esto debido a que ocupa los espacios vacíos que existen entre los agregados gruesos, ahorrando de paso el uso del cemento y el gasto económico que este supone, y le proporciona estabilidad manteniendo la distribución de sus materiales.

Es importante que las muestras de agregado fino estén libres de impurezas como limos o materias orgánicas, éstas eventualmente pueden debilitar al hormigón. Con esto se puede recalcar que “no es posible hacer un buen hormigón sin una buena arena” (García-Morán-Arroyo, 2009, p. 26). Se recomienda que la forma de las partículas sea cúbica o esférica, evitando en lo posible el uso de partículas delgadas, planas y/o alargadas. Este agregado ayuda indirectamente al incremento de la resistencia del hormigón

II.2.3. Agua.

El agua es una materia prima para el desarrollo de una estructura o pieza de hormigón, ayuda a la formación de la parte sólida de la pasta de cemento mediante reacción química al tener contacto con el cemento, y brinda una buena trabajabilidad en la mezcla.

El agua a utilizar en el hormigón debe cumplir con ciertas normas de calidad para garantizar el desarrollo óptimo del hormigón y evitar el deterioro del mismo al estar en servicio; el agua potable es recomendable al cumplir con los estándares mencionados en estas normativas. Por lo general, el agua debe estar limpia y libre de sustancias como ácidos, sulfatos, calcio y materias orgánicas (Abanto, 2009).

Un papel muy importante que tiene el agua es en el proceso de curado del hormigón, que es el de mantener la cantidad de agua ideal en el hormigón para que con el proceso de hidratación continuo pueda alcanzar la resistencia requerida.

Se recomienda que el agua a utilizar no contenga aceites, grasas o hidratos de carbono y controlar la cantidad de partículas en suspensión, esto último debido que puede afectar la adherencia entre la pasta de hormigón y los agregados. Asimismo, es recomendable realizar un análisis químico en caso de que se tuvieran dudas sobre la calidad de este material, y comparar los resultados obtenidos con los valores indicados en la Tabla II.4.

Tabla II.4. - Cantidad máxima de sustancias disueltas que deben existir en el agua.

Sustancias disueltas.	Valor máximo admisible en partes por millón (ppm).
Cloruros.	300 ppm
Sulfatos.	300 ppm
Sales de magnesio.	150 ppm
Sales solubles.	1.500 ppm
P.H.	Mayor de 7
Sólidos en suspensión.	1.500 ppm
Materia orgánica.	10 ppm

Fuente: "Tecnología del Concreto" 2da Edición; Flavio Abanto Castillo.

II.3. Resistencia a compresión en el hormigón.

La resistencia a la compresión simple del hormigón es una de las propiedades más importantes que presenta este material; esta propiedad determina si la dosificación aplicada en la mezcla del hormigón es factible para utilizar en una estructura de acuerdo a la función para la que fue construida.

Se representa como la capacidad del hormigón de soportar una carga de compresión por unidad de área, o esfuerzo a compresión. Esta resistencia a la compresión simple será mayor cuanto mayor sea la resistencia del cemento empleado para la mezcla de hormigón.

II.3.1. Relación agua/cemento.

La relación agua/cemento (a/c) es uno de los factores más importantes para determinar la resistencia mecánica de un hormigón, así como su durabilidad.

Representa la relación o razón que existe entre el peso del agua y el peso del cemento utilizados para formar la pasta cementicia (o pasta de cemento) que forma parte del hormigón.

Los valores recomendados para la hidratación completa del cemento se encuentran entre 0,42 y 0,60; el motivo por el que estos valores son tan bajos es debido a que siempre la cantidad de peso de agua a utilizar será menor que el peso del cemento.

II.3.2. Resistencia característica especificada (f_{ck}).

Es el valor que se adopta en el proyecto para la resistencia a compresión del hormigón a los 28 días, se utiliza como base de los cálculos, asociados a un nivel de confianza del

95%, es decir, que existe una probabilidad del 95% de que se presenten valores individuales de probetas más altos que f_{ck} (IBNORCA, 1987).

Debido a su uso como dato para la realización de proyectos, también se le conoce como “resistencia característica del proyecto”. Esta resistencia es la que se utiliza para tipificar la clase resistente de los hormigones según lo establecido en normativas de diferentes países.

II.3.3. Resistencia característica real de obra (f_{cr}).

Este valor corresponde al cuantil del 5 % en la curva de distribución de resistencias a compresión del hormigón colocado en obra. Es el valor de la resistencia por debajo del cual se puede esperar hallar un máximo del 5 % de la población de todas las medidas posibles de la resistencia del hormigón especificado (IBNORCA, 1987).

II.3.4. Resistencia característica estimada (f_{ce}).

Es el valor que estima o cuantifica la resistencia característica a compresión real de la obra, a partir de un número finito de resultados de ensayos normalizados de resistencia a compresión, sobre probetas tomadas en obra. De manera abreviada se le denomina simplemente como “resistencia característica” (IBNORCA, 1987).

II.3.5. Resistencia media a compresión (f_{cmj}).

Se refiere a la resistencia que se obtiene de media aritmética de un “n” número de roturas en ensayos a compresión del hormigón a una edad de “j” días (Varona – López – Bañón, 2012).

En un principio se utilizaba este valor, aplicado para probetas de 28 días de edad, como base de cálculo para el diseño de estructuras, pero debido a que este valor no refleja la verdadera calidad de obra al no tomar en cuenta la dispersión, se descartó su uso.

II.4. Módulo de elasticidad.

Antes de describir lo que es el módulo de elasticidad es importante esclarecer algunos conceptos importantes para comprender adecuadamente el tema.

II.4.1. Deformación y deformación unitaria.

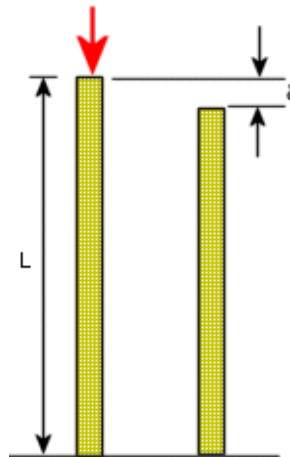
La *deformación* es el cambio de dimensión que sufre un cuerpo al aplicarse una fuerza o carga externa, alterando su forma y tamaño. Este cambio puede mantenerse únicamente mientras se aplique la carga o ser permanente cuando se deje de aplicar la misma. También puede originarse debido a cambios de temperatura y, en algunos casos, humedad.

La *deformación unitaria* o deformación longitudinal (ϵ) vendría a ser el cambio de dimensión por unidad de longitud, dicho de otro modo, es la relación entre la deformación total (δ) y la longitud inicial (L) de un elemento (Gere – Timoshenko, 1984). Se expresa mediante la ecuación (2.1).

$$\epsilon = \frac{\delta}{L} \quad (2.1)$$

Se puede observar en la Figura II.3 cómo una barra al ser sometida a compresión se llega a deformar.

Figura II.3 . – Objeto sometido a una deformación axial.



Fuente: Elaboración propia

II.4.2. Ley de Hooke.

Cuando la relación entre el esfuerzo y la deformación unitaria a que está sometido el material es lineal, constante y los esfuerzos aplicados no alcanzan el límite de proporcionalidad, el material tiene un comportamiento elástico que cumple con la Ley de Hooke, la cual establece que “*el alargamiento unitario que presenta un material es*

directamente proporcional a la fuerza aplicada sobre el mismo” (Hooke, 1678). Este concepto se expresa con la ecuación (2.2).

$$\sigma = E * \varepsilon \quad (2.2)$$

Donde:

σ = Esfuerzo a compresión.

ε = Deformación longitudinal.

E = Módulo de deformación.

Es necesario recalcar la diferencia entre el límite (elástico) de proporcionalidad y el límite elástico, el primero se refiere al mayor esfuerzo que soporta un material cumpliendo con lo establecido con la Ley de Hooke, mientras que el segundo se refiere al mayor esfuerzo que soporta el material sin que llegue a ocurrir una deformación permanente al momento de quitar el esfuerzo.

II.4.3. Definición de módulo de elasticidad.

El módulo de elasticidad de un material (E), también conocido como módulo de elasticidad longitudinal o módulo de Young, es una constante numérica descubierta mediante observaciones y estudios realizados por el científico inglés Thomas Young durante el siglo XIX, aunque el concepto fue desarrollado originalmente por Leonhard Euler en 1727, y los primeros experimentos que utilizan el concepto actual del módulo de elasticidad los realizó el italiano Giordano Riccati durante 1782.

Se le describe como la relación que existe entre el esfuerzo normal o axial (σ) al cual está sometido un material y la deformación unitaria axial (ε), sin que sobrepase el límite de proporcionalidad del material.

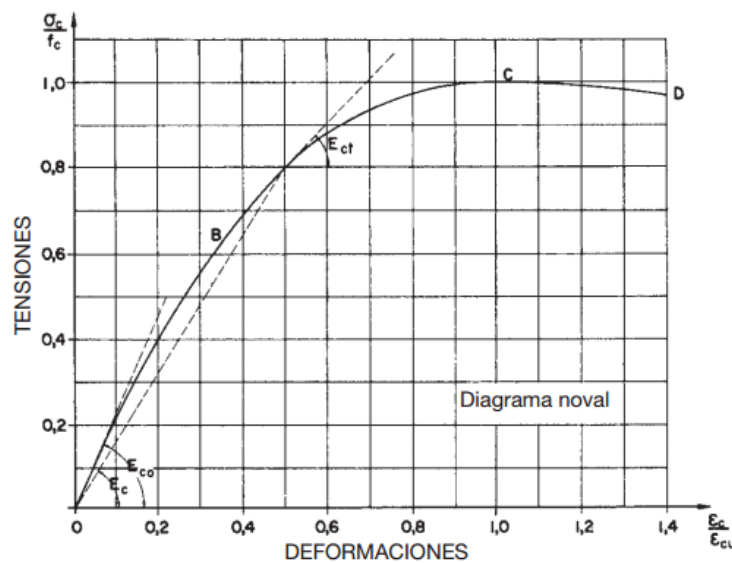
Este valor representa la rigidez o resistencia a la deformación elástica del material ante una carga axial impuesta sobre el mismo, puede obtenerse despejando la ecuación de la Ley de Hooke y es representada en la ecuación (2.3).

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.3)$$

II.4.4. Módulo de elasticidad en el hormigón.

Una de las características del diagrama esfuerzo-deformación del hormigón es que se manifiesta como una curvatura, tal y como se muestra en la Figura II.4, lo cual representa que el valor del módulo de este material no es constante, a diferencia de otros materiales como el acero o la madera, donde la relación entre el esfuerzo y la deformación unitaria es elástico-lineal, lo que se representa en el diagrama en forma de una recta y por ende el módulo es constante.

Figura II.4. –Diagrama esfuerzo-deformación del hormigón.



Fuente: "Jiménez Montoya Hormigón Armado" 15ta Edición; García, A., Morán, F. y Arroyo, J.C.

Por esta razón, en el caso del hormigón, se conoce al módulo de elasticidad como *módulo de deformación longitudinal del hormigón* (García-Morán-Arroyo, 2009).

Para poder simplificar el cálculo de este parámetro, generalmente se asume un comportamiento lineal en la curva esfuerzo-deformación del hormigón para niveles de carga que producen esfuerzos de hasta el 50% de la resistencia última y deformaciones longitudinales menores de 1000 millonésimas en compresión y 100 millonésimas en tracción (Weiss, 2006).

- Determina las deflexiones inmediatas de estructuras de hormigón preesforzado Clase U (elementos no fisurados), mediante cálculos por métodos o fórmulas usuales para deflexiones elásticas.
- Proporciona seguridad en cáscaras delgadas y losas plegadas de hormigón respecto al pandeo y para restringir deformaciones en estas estructuras.
- Bajo condiciones de carga lenta, este dato puede emplearse en futuras investigaciones acerca del módulo de elasticidad dinámico del hormigón, dato que se utiliza bajo cargas rápidas, e importante para conocer el comportamiento real del hormigón bajo la acción de un sismo.
- El hormigón armado, al ser un material cuyas propiedades dependen de la orientación del mismo, llega a ser anisotrópico, y el valor del módulo de deformación longitudinal varía al aplicarse la carga en diferentes ejes, siendo este valor mayor en el eje de mayor longitud. Esta particularidad se aprovecha para la creación de estructuras.

II.4.6. Variables que afectan al módulo de elasticidad del hormigón.

El módulo de elasticidad del hormigón se ve afectado por distintas variables entre las que se incluyen las siguientes:

- *Características del agregado utilizado:* Los agregados resisten los cambios volumétricos que se originan por las contracciones plásticas y por el secado, por lo que el módulo de elasticidad del hormigón se ve influenciado por el módulo de elasticidad del agregado y su resistencia a tracción.

La porosidad del agregado determina la rigidez de este último, por lo que influye significativamente en el módulo de elasticidad, mientras más baja sea la porosidad mayor será el módulo de elasticidad. Adicionalmente, mientras mayor sea la proporción del agregado, más alto será el valor del módulo.

- *Adherencia entre la pasta y el agregado:* La adherencia depende de la zona que se encuentra entre las partículas de los agregados y la pasta de cemento la cual se conoce como *zona de transición interfacial (ITZ)* o simplemente *zona de transición*, la cual posee una microestructura diferente al de las grandes cantidades

de cemento endurecido. El módulo de elasticidad disminuye a medida que la zona de transición se debilita debido a las grietas y poros existentes.

- *Edad del hormigón:* El valor del módulo de elasticidad aumenta a medida que el hormigón envejece.
- *Condición de humedad:* En una muestra húmeda, el módulo de elasticidad es mayor que en una muestra en estado seco en un 15 %, esto debido a que en esta condición genera más microgrietas en la zona de transición.
- *Régimen de curado:* El módulo de elasticidad del hormigón es ligeramente menor al utilizar curado con vapor en seco que con agua para una misma resistencia, debido a la generación de grietas en el hormigón con este tipo de curado.
- *Cantidad y características del cemento:* En una proporción de mezcla con mayor cantidad de cemento, es mayor el módulo de elasticidad. En lo que respecta a la pasta de cemento, el módulo de elasticidad del hormigón depende de la porosidad, la cual se puede controlar mediante relación agua-cemento, contenido de aire y grado de hidratación del cemento. Se debe tener en cuenta que, a menor porosidad, mayor módulo de elasticidad tanto en la pasta de cemento como en el hormigón.
- *Resistencia a compresión del hormigón:* Mayor va a ser el módulo de elasticidad en el hormigón si su resistencia a la compresión también es mayor, se debe tener en cuenta que ambos parámetros no son directamente proporcionales.
- *Químicos utilizados en mezcla:* Por sí solos no tienen influencia en el módulo de deformación longitudinal, sin embargo, algunos aditivos producen una mayor dispersión del cemento, generando una mayor resistencia a la compresión en el hormigón.

II.4.7. Tipos de módulo de elasticidad.

Existen distintos tipos de módulo de elasticidad en el hormigón, que se pueden obtener de la curva esfuerzo-deformación de este material mediante la determinación de pendientes en esta curva. A continuación, se nombran cada uno de ellos:

-Módulo tangente (E_{ct}). - Se mide por la inclinación de la tangente a la curva en cualquier punto determinado de ésta, por lo que tiene un valor diferente en cada punto de la curvatura.

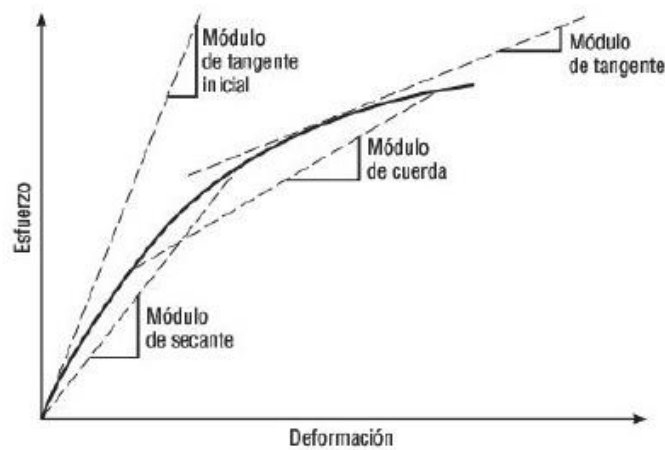
-Módulo secante (E_c). - Este módulo tiene valor variable a lo largo de la curva, se mide por la inclinación de la recta que une el origen con el punto de la curvatura del cual se quiere determinar este valor.

- Módulo inicial (E_{co}). - Viene medido por la inclinación de la tangente a la curva en el origen de la gráfica, también se le conoce como *módulo tangente inicial* o *módulo de elasticidad en el origen*, lo curioso es que en este punto los módulos tangente y secante tienen el mismo valor que el módulo inicial. Es válido para un nivel de esfuerzos pequeños.

-Módulo cuerda. - Este módulo de elasticidad se determina trazando una cuerda o línea entre dos puntos de la curva esfuerzo-deformación y calculando posteriormente la pendiente de esta recta, por lo que el valor obtenido es diferente de acuerdo a la posición de los puntos en la curvatura. Generalmente el punto más bajo que se toma en cuenta se encuentra cercano al origen.

En la Figura II.6 se puede apreciar gráficamente cada uno de los módulos de elasticidad descritos.

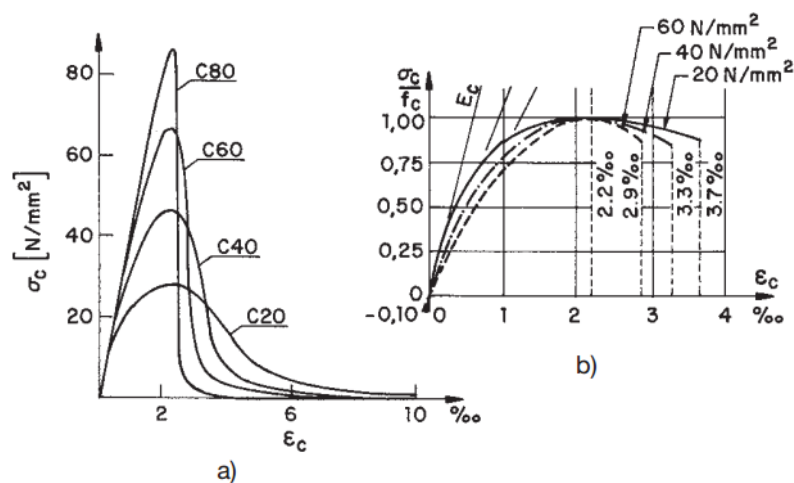
Figura II.6. –Diferentes tipos de módulo de elasticidad en diagrama esfuerzo-deformación del hormigón.



Fuente: “Determinación del Módulo de Elasticidad Estático de los concretos premezclados de mayor uso, en el área Metropolitana de la ciudad de Guatemala”; Pineda L.

En algunos libros tienen diagramas esfuerzo-deformación ya graficados, cuyas curvas pertenecen a distintos tipos de hormigón en función a su resistencia a compresión (por ejemplo, de acuerdo a la nomenclatura europea, para un hormigón de tipo C20 se tendrá una resistencia a la compresión igual a 20 N/mm^2) de las cuales puede obtenerse el módulo de elasticidad de cualquier punto de la curvatura utilizada. Se muestra un ejemplo de este tipo de diagramas en la Figura II.7.

Figura II.7. –Ejemplos de diagramas esfuerzo-deformación para diferentes tipos de hormigón de acuerdo a su resistencia a compresión.



Fuente: “Jiménez Montoya Hormigón Armado” 15ta Edición; García, A., Morán, F. y Arroyo, J.C.

Donde:

σ_c = Tensión en el hormigón.

f_c = Resistencia a compresión del hormigón.

ϵ_c = Deformación relativa del hormigón.

E_c = Módulo de deformación del hormigón.

II.4.8. Módulo de elasticidad en la norma CBH-87.

La normativa boliviana del hormigón armado CBH-87, aprobada actualmente por Decreto Supremo, proporciona la ecuación (2.4) para encontrar el valor del módulo de deformación longitudinal a compresión del hormigón a los 28 días de edad. Esta ecuación se puede utilizar igualmente para deducir el módulo de deformación longitudinal a

diferentes edades del hormigón a partir de la resistencia obtenida para la edad que se necesiten.

$$E_{cm} = 9.500 * \sqrt[3]{f_{ck} + 8} = 9.500 * \sqrt[3]{f_{cm}} \quad (2.4)$$

Donde:

E_{cm} = Módulo secante de la deformación longitudinal del hormigón (N/mm²).

f_{ck} = Resistencia característica del hormigón a compresión (N/mm²).

f_{cm} = Resistencia media a la compresión del hormigón (N/mm²).

Para utilizar apropiadamente la ecuación (2.4) en este trabajo de investigación, se utilizará la variante de la ecuación con la resistencia media “ f_{cm} ”, debido a que esa es la resistencia obtenida de los ensayos de laboratorio de la cual debe obtenerse el módulo de elasticidad.

Cuando se utilicen cargas duraderas o permanentes puede tomarse los dos tercios (2/3) del resultado obtenido en la ecuación (2.4) como el valor de “ E_{cm} ” para climas húmedos, y dos quintos (2/5) para climas secos.

II.4.9. Módulo de elasticidad en la norma NB 1225001.

De acuerdo a la Norma Boliviana del Hormigón Estructural NB 1225001, la cual actualmente cuenta con aprobación de Resolución Ministerial pero no con la del Decreto Supremo y se considera a ser aprobada en un futuro cercano, propone la ecuación (2.5) para determinar el módulo de elasticidad para hormigones de peso normal.

$$E_c = 4.700 * \sqrt{f'c} \quad (2.5)$$

Donde:

E_c = Módulo de elasticidad del hormigón (N/mm²).

$f'c$ = Resistencia especificada a la compresión del hormigón (N/mm²).

La normativa NB 1225001 está basada en la normativa ACI 318S, por lo que la ecuación (2.5) es igual a la ecuación brindada por esta última normativa.

II.4.10. Módulo de elasticidad en la norma ACI 318S.

De acuerdo a la norma estadounidense ACI 318S, se puede aplicar la ecuación (2.6) para un cálculo estimativo del módulo de elasticidad a compresión para hormigón normal. La ecuación no es aplicable para hormigones de alta resistencia (mayor a 56 N/mm²), hormigones livianos, hormigón auto nivelante ni mezclas con bajo volumen de agregado grueso.

$$E_c = 4.700 * \sqrt{f'_c} \quad (2.6)$$

Siendo:

E_c = Módulo de elasticidad del hormigón (N/mm²).

f'_c = Resistencia especificada a la compresión del hormigón (N/mm²).

Como dato adicional se tiene que, Adrian Pauw, la persona que dedujo esta ecuación, define el módulo de elasticidad como “*la pendiente de la línea trazada desde un esfuerzo nulo hasta un esfuerzo de compresión del 45% de la resistencia a la compresión utilizando la curva esfuerzo-deformación del hormigón*” (Pauw, 1960).

II.4.11. Módulo de elasticidad en la Instrucción del Hormigón Estructural EHE-08.

La Instrucción del Hormigón Estructural EHE-08, proveniente de España, adopta como módulo de elasticidad a compresión el valor obtenido de la ecuación (2.7), la cual se encuentra en función de la resistencia media a la compresión del hormigón, válida siempre que los esfuerzos en condiciones de servicio no sobrepasen el 40% de la resistencia media a compresión del hormigón a los 28 días de edad.

$$E_{cm} = 8.500 * \sqrt[3]{f_{cm}} \quad (2.7)$$

Siendo:

E_{cm} = Módulo de deformación longitudinal secante del hormigón (N/mm²).

f_{cm} = Resistencia media a la compresión del hormigón (N/mm²).

La ecuación (2.7), propuesta en esta instrucción, corresponde al hormigón compuesto por agregados o áridos de características medias de tipo cuarcítico (o cuarcitas), por lo que, si se desea obtener un valor más apropiado del módulo de deformación del hormigón en función del tipo de agregado utilizado en el hormigón, es necesario multiplicar el módulo “ E_{cm} ” obtenido en la fórmula por el coeficiente de corrección “ α ” extraído de la Tabla II.5.

Tabla II.5. - Coeficiente de corrección α de acuerdo al tipo de árido.

Tipo de árido		Factor
Cuarcita		1
Arenisca		0,7
Caliza	Normal	0,9
	Densa	1,2
Ofita, basalto y Otras rocas volcánicas	Porosa	0,9
	Normal	1,2
Granito y otras rocas plutónicas		1,1
Diabasas		1,3

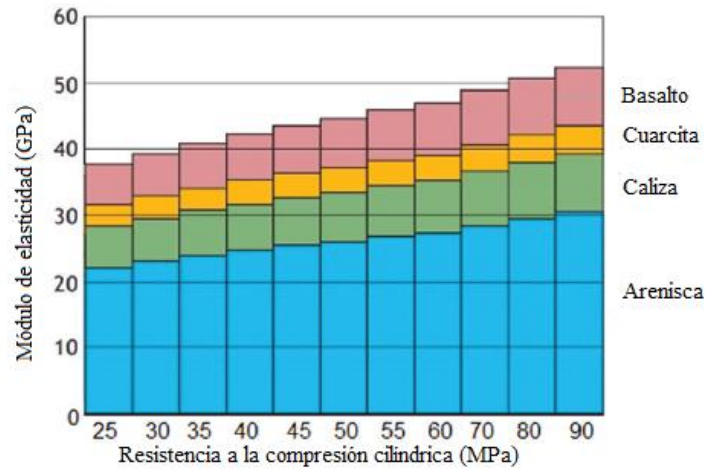
Fuente: “EHE-08 Instrucción de Hormigón Estructural”; Ministerio de Fomento.

En complemento a la Tabla II.5, tomar en cuenta los puntos descritos a continuación:

- Para hormigones compuestos por agregados silíceos (sílice) se puede utilizar el mismo factor de corrección de la cuarcita igual a 1.
- El grupo de “rocas volcánicas” incluye: Riolita, dacita, andesita, ofita.
- El grupo de “otras rocas plutónicas” incluye: Sienita, diorita.

A continuación, en la Figura II.8 se muestra un gráfico que, si bien no se extrajo de la instrucción española, indica los valores para el módulo de elasticidad a compresión para diferentes resistencias a compresión aplicada en cilindros para los tipos de agregados más usados en España de acuerdo a lo establecido en EHE-08.

Figura II.8. - Rango de valores del módulo de elasticidad a compresión del hormigón compuesto por diferentes materiales para diferentes resistencias.



Fuente: “Elastic Modulus of Concrete”; Subramanian, N. (Editado para la traducción al español).

II.4.12. Módulo de elasticidad en norma EN 1992 Eurocódigo 2.

La normativa europea EN 1992 Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón propone la ecuación (2.8) para el cálculo del módulo de deformación longitudinal a compresión del hormigón con una edad de 28 días, siendo este un módulo secante representado por la pendiente de una recta esfuerzo-deformación graficada entre el esfuerzo nulo y el esfuerzo al 40% de la resistencia media a compresión de hormigón.

$$E_{cm} = 22.000 * \left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{0,3} \quad (2.8)$$

Siendo:

E_{cm} = Módulo de deformación longitudinal secante del hormigón (N/mm²).

f_{cm} = Resistencia media a la compresión del hormigón (N/mm²).

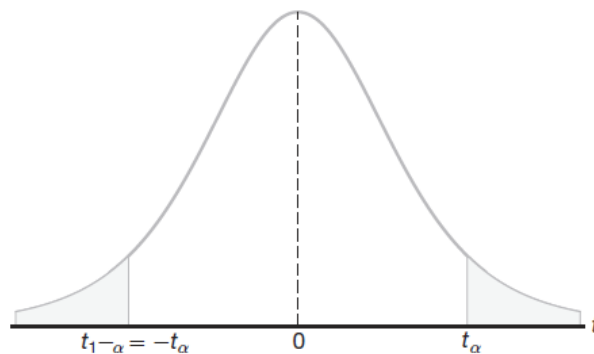
Esta ecuación es aplicable principalmente para hormigones que utilizan agregados de cuarzita y en el caso de utilizar agregados de caliza y arenisca, se debe reducir el valor obtenido en un 10% y 30% respectivamente, mientras que en agregados de basalto se incrementa el valor obtenido en un 20%.

II.5. Distribución t de Student.

La distribución t de Student, o simplemente distribución t, es una distribución de probabilidad que surge del problema de estimar la media de una población normalmente distribuida o diferenciar entre dos medias de población, cuando el tamaño de una muestra es pequeño, es decir, que el número de mediciones en una muestra es menor de 30.

La gráfica de la distribución t de Student es similar a la gráfica de la distribución normal (ver Figura II.9), diferenciándose en que sus colas son más amplias. Es necesario saber que la gráfica de la distribución t de Student se ve afectada por los grados de libertad asociados con la varianza estimada, la cual se representa como el número de mediciones o datos menos uno (como ecuación se expresa como: $v = n-1$). Esto se observa en la Figura II.10.

Figura II.9.- Gráfico modelo de distribución t.



Fuente: "Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias"; Walpole, Myers, Myers.

Cuando el valor del grado de libertad tiende a infinito, la forma de la gráfica se asemeja a la de una distribución normal.

Se aplica esta distribución para determinar la media poblacional para cada uno de los bancos de material en la presente investigación, utilizando la ecuación (2.10), la cual se obtiene despejando la media poblacional en la ecuación de la distribución t (2.9).

$$t = \frac{\bar{X} - \mu}{S/\sqrt{n}} \quad (2.9)$$

$$\mu = \bar{X} \pm t * \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (2.10)$$

Donde:

t = Valor de una medición en la distribución t

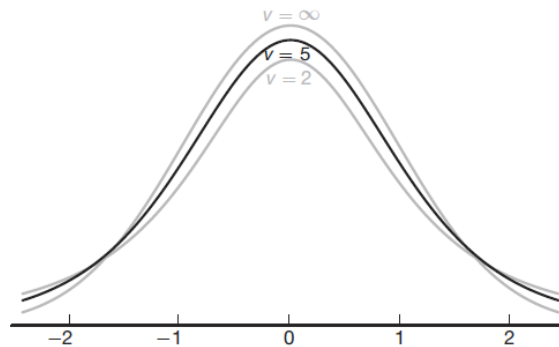
\bar{X} = Media muestral

μ = Media poblacional

S = Desviación estándar muestral

n = Número de mediciones o datos

Figura II.10.- Gráficos de distribución t de Student con diferentes grados de libertad.



Fuente: “Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias”; Walpole, Myers, Myers.

Para un determinado grado de libertad “v” y un determinado nivel de significancia “ α ”, se puede determinar el valor de t con ayuda de la Tabla II.6 y la Tabla II.7 y aplicarse en el eje horizontal de la gráfica de distribución t. En la Figura II.9 este valor de t se representa como “ t_α ” y puede ser positivo o negativo dependiendo de si se sitúa a la derecha o izquierda de cero, respectivamente, en el eje horizontal de la gráfica. El valor “ t_α ” se encarga de separar el área debajo de la curva en dos secciones de valores “ α ” y “ $1-\alpha$ ”, siendo la menor y mayor sección, respectivamente.

Tabla II.6.- Valores críticos de la distribución t (parte 1).

ν	α						
	0.40	0.30	0.20	0.15	0.10	0.05	0.025
1	0.325	0.727	1.376	1.963	3.078	6.314	12.706
2	0.289	0.617	1.061	1.386	1.886	2.920	4.303
3	0.277	0.584	0.978	1.250	1.638	2.353	3.182
4	0.271	0.569	0.941	1.190	1.533	2.132	2.776
5	0.267	0.559	0.920	1.156	1.476	2.015	2.571
6	0.265	0.553	0.906	1.134	1.440	1.943	2.447
7	0.263	0.549	0.896	1.119	1.415	1.895	2.365
8	0.262	0.546	0.889	1.108	1.397	1.860	2.306
9	0.261	0.543	0.883	1.100	1.383	1.833	2.262
10	0.260	0.542	0.879	1.093	1.372	1.812	2.228
11	0.260	0.540	0.876	1.088	1.363	1.796	2.201
12	0.259	0.539	0.873	1.083	1.356	1.782	2.179
13	0.259	0.538	0.870	1.079	1.350	1.771	2.160
14	0.258	0.537	0.868	1.076	1.345	1.761	2.145
15	0.258	0.536	0.866	1.074	1.341	1.753	2.131
16	0.258	0.535	0.865	1.071	1.337	1.746	2.120
17	0.257	0.534	0.863	1.069	1.333	1.740	2.110
18	0.257	0.534	0.862	1.067	1.330	1.734	2.101
19	0.257	0.533	0.861	1.066	1.328	1.729	2.093
20	0.257	0.533	0.860	1.064	1.325	1.725	2.086
21	0.257	0.532	0.859	1.063	1.323	1.721	2.080
22	0.256	0.532	0.858	1.061	1.321	1.717	2.074
23	0.256	0.532	0.858	1.060	1.319	1.714	2.069
24	0.256	0.531	0.857	1.059	1.318	1.711	2.064
25	0.256	0.531	0.856	1.058	1.316	1.708	2.060
26	0.256	0.531	0.856	1.058	1.315	1.706	2.056
27	0.256	0.531	0.855	1.057	1.314	1.703	2.052
28	0.256	0.530	0.855	1.056	1.313	1.701	2.048
29	0.256	0.530	0.854	1.055	1.311	1.699	2.045
30	0.256	0.530	0.854	1.055	1.310	1.697	2.042
40	0.255	0.529	0.851	1.050	1.303	1.684	2.021
60	0.254	0.527	0.848	1.045	1.296	1.671	2.000
120	0.254	0.526	0.845	1.041	1.289	1.658	1.980
∞	0.253	0.524	0.842	1.036	1.282	1.645	1.960

Fuente: "Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias"; Walpole, Myers, Myers.

Tabla II.7.- Valores críticos de la distribución t (parte 2).

ν	α						
	0.02	0.015	0.01	0.0075	0.005	0.0025	0.0005
1	15.894	21.205	31.821	42.433	63.656	127.321	636.578
2	4.849	5.643	6.965	8.073	9.925	14.089	31.600
3	3.482	3.896	4.541	5.047	5.841	7.453	12.924
4	2.999	3.298	3.747	4.088	4.604	5.598	8.610
5	2.757	3.003	3.365	3.634	4.032	4.773	6.869
6	2.612	2.829	3.143	3.372	3.707	4.317	5.959
7	2.517	2.715	2.998	3.203	3.499	4.029	5.408
8	2.449	2.634	2.896	3.085	3.355	3.833	5.041
9	2.398	2.574	2.821	2.998	3.250	3.690	4.781
10	2.359	2.527	2.764	2.932	3.169	3.581	4.587
11	2.328	2.491	2.718	2.879	3.106	3.497	4.437
12	2.303	2.461	2.681	2.836	3.055	3.428	4.318
13	2.282	2.436	2.650	2.801	3.012	3.372	4.221
14	2.264	2.415	2.624	2.771	2.977	3.326	4.140
15	2.249	2.397	2.602	2.746	2.947	3.286	4.073
16	2.235	2.382	2.583	2.724	2.921	3.252	4.015
17	2.224	2.368	2.567	2.706	2.898	3.222	3.965
18	2.214	2.356	2.552	2.689	2.878	3.197	3.922
19	2.205	2.346	2.539	2.674	2.861	3.174	3.883
20	2.197	2.336	2.528	2.661	2.845	3.153	3.850
21	2.189	2.328	2.518	2.649	2.831	3.135	3.819
22	2.183	2.320	2.508	2.639	2.819	3.119	3.792
23	2.177	2.313	2.500	2.629	2.807	3.104	3.768
24	2.172	2.307	2.492	2.620	2.797	3.091	3.745
25	2.167	2.301	2.485	2.612	2.787	3.078	3.725
26	2.162	2.296	2.479	2.605	2.779	3.067	3.707
27	2.158	2.291	2.473	2.598	2.771	3.057	3.689
28	2.154	2.286	2.467	2.592	2.763	3.047	3.674
29	2.150	2.282	2.462	2.586	2.756	3.038	3.660
30	2.147	2.278	2.457	2.581	2.750	3.030	3.646
40	2.123	2.250	2.423	2.542	2.704	2.971	3.551
60	2.099	2.223	2.390	2.504	2.660	2.915	3.460
120	2.076	2.196	2.358	2.468	2.617	2.860	3.373
∞	2.054	2.170	2.326	2.432	2.576	2.807	3.290

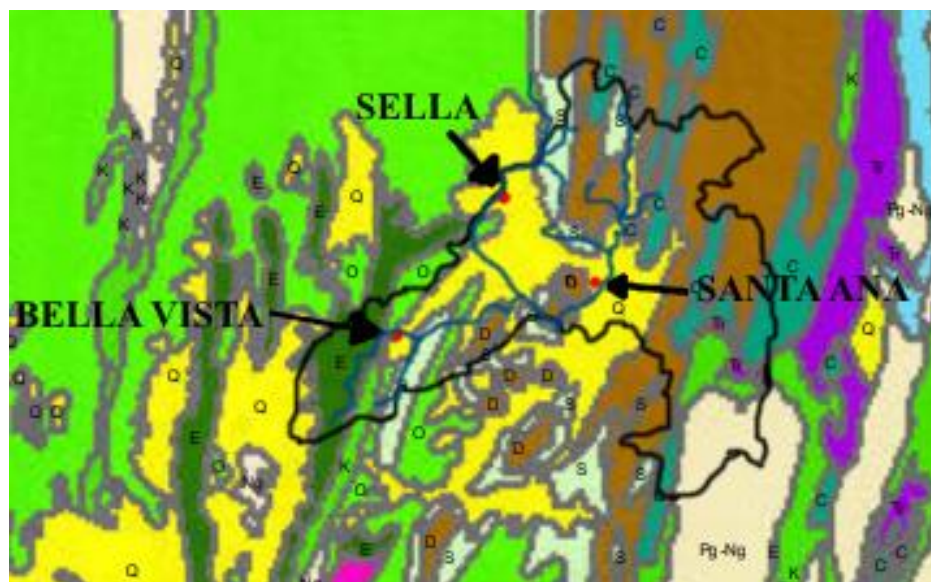
Fuente: "Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias"; Walpole, Myers, Myers.

III. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN.

III.1. Tipos de rocas de los áridos.

De acuerdo a lo que observa en el *Mapa Geológico de Bolivia del SERGEOMIN (Servicio Geológico Minero)*, los agregados de los tres bancos de material están compuestos por varios tipos de roca. En la Figura III.1, se muestra una parte de este mapa donde se muestran la ubicación de los bancos de material de Santa Ana, Bella Vista y Sella.

Figura III.1.- Parte del mapa geológico de Bolivia, con delimitación de la provincia Cercado con la ubicación de los bancos de material.



Fuente: “Mapa Geológico de Bolivia”; SERGEOMIN – Elaboración propia.

A continuación, se indica la descripción geológica de cada zona de colores del mapa mostrado que están próximas a los ríos donde se ubican los bancos de material, de acuerdo a lo establecido en el *Mapa Geológico de Bolivia*. Los tipos de rocas se mencionan desde el más predominante hasta el menos predominante.

- **Q**: Depósitos aluviales, fluvio-lacustres, coluviales, dunas.
- **D**: Areniscas, lutitas y limolitas.
- **E**: Limolitas, lutitas, areniscas y ortocuarcitas.
- **S**: Lutitas, limolitas, cuarcitas y diamictitas.

- **O**: Areniscas, limolitas, cuarcitas, pizarras, lutitas y lavas almohadilladas.
- **C**: Diamictitas, conglomerados, areniscas y lutitas.

Se observa que las ubicaciones de los tres bancos de material se encuentran dentro de la zona Q, esto, sumado al hecho de que los agregados fueron transportados y depositados por un río, demuestra que el material proviene de depósitos aluviales, compuesto de material detrítico o clástico, es decir, rocas sedimentarias compuestas de fragmentos o clastos de roca y minerales pre-existentes acumulados mecánicamente.

También se observa la ubicación de los ríos, gracias a esto sabemos el tipo de rocas se encuentra en cada banco de material, como se menciona a continuación.

Tabla III.1.- Descripción geológica de los bancos de material.

Banco	Zonas	Descripción geológica
Santa Ana	S, D y C	Areniscas, lutitas, limolitas, diamictitas, cuarcitas y conglomerados.
Bella Vista	E y S	Cuarcitas, limolitas, lutitas, areniscas, ortocuacitas y diamictitas.
Sella	S y O	Cuarcitas, lutitas, limolitas, diamictitas, areniscas, pizarras y lavas almohadilladas.

Fuente: Elaboración propia.

En la parte de descripción geológica se menciona en primer lugar el tipo de roca más predominante para cada banco, esto es sabido por las declaraciones descritas en el *Anexo A.12. Geología de los agregados.*

III.2. Ensayos de laboratorio de materia prima.

III.2.1. Ensayos para el agregado fino.

III.2.1.1. Análisis granulométrico del agregado fino.

Se realiza este ensayo para determinar la cantidad de partículas por tamaños en el agregado fino, mediante a lo establecido en la especificación normalizada ASTM C 136, de manera que cumpla con los límites establecidos en la norma ASTM C 33. Asimismo, este ensayo permite calcular el módulo de fineza de la arena.

El equipo necesario para realizar este ensayo se cita a continuación:

- Balanza.
- Juego de tamices.
- Brocha y cepillo.
- Horno de temperatura constante.
- Vibrador mecánico para tamices.

Para realizar este ensayo granulométrico se efectúan los pasos siguientes:

- En caso de ser necesario, realizar la limpieza de la muestra de agregado fino para dejarla libre de impurezas y/u otros materiales como limos, arcillas, etc.
- Se realiza el cuarteo de la muestra húmeda a utilizar hasta obtener la cantidad necesaria para el ensayo, determinada en peso con ayuda de una balanza, asegurándose que luego de que esa muestra pase a secarse en horno tenga al menos 500 gr.
- Seleccionar los tamices necesarios para la práctica, en este caso se utilizarán los tamaños: 3/8", N°4, N°8, N°16, N°30, N° 50, N°100 y N°200, además de una base para retener los tamaños más pequeños.
- Colocar el juego de tamices uno sobre otro y realizar el tamizado, agitándolos de manera manual o con ayuda de un agitador o vibrador mecánico. Para los tamaños de partículas más pequeños pueden realizarse tamizado con lavado.
- Pesar cuidadosamente las partículas retenidas en cada uno de los tamices con ayuda de recipientes, en caso de haberse realizado lavado realizar el secado de la muestra antes de pesarse.

En tablas más adelante, se aprecia la cantidad de material en porcentaje que pasa por los tamices de los ensayos granulométricos (incluyendo los límites de granulometría mínimo y máximo de granulometría para cada tamaño de malla) y el módulo de fineza de los bancos de Santa Ana, Bella Vista y Sella, (en la Tabla III.2, la Tabla III.3 y la Tabla III.4, respectivamente). Para mayor detalle de la granulometría del agregado fino se recomienda ver los informes de laboratorio en el *Anexo A.1. Análisis granulométrico del agregado fino*.

Tabla III.2. - Granulometría del agregado fino del banco de río Santa Ana.

MALLA		Cantidad de material que pasa [%]	Límites según ASTM C33
Designación	Tamaño [mm]		
3/8"	9,53	100,00	100
No. 4	4,75	94,57	95-100
No. 8	2,36	83,18	80-100
No. 16	1,18	74,94	50-85
No. 30	0,60	66,16	25-60
No. 50	0,30	33,63	10-30
No. 100	0,15	7,63	2-10
Base	-	0,00	-
Módulo de fineza (MF)			2,40

Fuente: Elaboración propia.

Tabla III.3. - Granulometría del agregado fino del banco de río Bella Vista.

MALLA		Cantidad de material que pasa [%]	Límites según ASTM C33
Designación	Tamaño [mm]		
3/8"	9,53	100,00	100
No. 4	4,75	99,71	95-100
No. 8	2,36	79,23	80-100
No. 16	1,18	60,31	50-85
No. 30	0,60	39,37	25-60
No. 50	0,30	16,30	10-30
No. 100	0,15	4,61	2-10
Base	-	0,00	-
Módulo de fineza (MF)			3,00

Fuente: Elaboración propia.

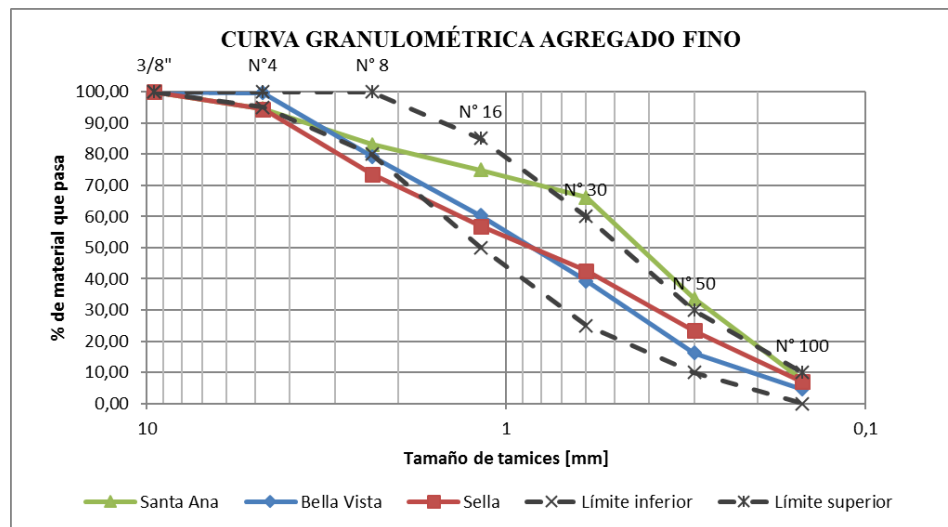
Tabla III.4. - Granulometría del agregado fino del banco de río Sella.

MALLA		Cantidad de material que pasa [%]	Límites según ASTM C33
Designación	Tamaño [mm]		
3/8"	9,53	100,00	100
No. 4	4,75	94,44	95-100
No. 8	2,36	73,53	80-100
No. 16	1,18	56,93	50-85
No. 30	0,60	42,57	25-60
No. 50	0,30	23,43	10-30
No. 100	0,15	7,01	2-10
Base	-	0,00	-
Módulo de fineza (MF)			3,02

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura III.2 se muestran las granulometrías de los tres bancos de material utilizados para esta investigación, indicando el porcentaje del material que pasa por los diferentes tamaños de malla de los tamices utilizados. También se muestran los límites mínimos y máximos de los agregados finos.

Figura III.2- Curva granulométrica del agregado fino de todos los bancos.



Fuente: Elaboración propia.

III.2.1.2. Peso específico del agregado fino.

En este ensayo se determina el peso específico a granel y aparente, al igual que la cantidad de agua que absorbe el agregado fino, de acuerdo a lo establecido en la normativa ASTM C 128, utilizando el equipo siguiente:

- Balanza.
- Matraz de 500 ml. de capacidad.
- Molde cónico.
- Pisón.
- Secadora.

Este ensayo de laboratorio, el cual también determina el peso específico saturado y superficialmente seco del agregado fino, debe realizarse de la siguiente manera:

- Realizar el cuarteo del agregado fino hasta obtener la muestra necesaria, la cual debe estar comprendida por un valor aproximado a 500 g. En caso de que la arena presente algún tipo de suciedad, realizar la limpieza previa al cuarteo.
- Se debe utilizar el tamiz N°4 (4,75 mm.) para separar la parte del agregado que es superior a este tamaño.
- Saturar la muestra sumergiéndola en agua a temperatura ambiente durante 24 horas, luego de esto se saca la muestra y se elimina el exceso de agua teniendo cuidado de evitar la pérdida de partículas.
- Secar la muestra con ayuda de una secadora hasta dejarlo con cierto grado de humedad.
- Colocar un molde cónico en una superficie lisa con el diámetro mayor hacia abajo y llenarlo con el agregado fino, compactar la muestra con un pistón o varilla golpeando 25 veces, dejándolo caer sobre la superficie de la muestra.
- Levantar el cono y verificar si la arena tiene exceso de humedad libre, si fue secada más de lo necesario o si tiene su condición de saturada, siendo esta última la condición adecuada para la realización de la práctica.
- Al retirar el cono, la arena debe deslizarse lentamente según su talud natural para alcanzar la condición saturada.
- En caso de tener humedad libre, la arena mantendrá la forma del cono. En caso de haberse secado más de lo necesario, la arena rodará libremente. Ambos casos no son deseados para la práctica y se deberá aumentar o reducir humedad hasta cumplir con la condición requerida.
- Extraer la cantidad necesaria en peso, colocarlo en un matraz y llenarlo con agua hasta $\frac{2}{3}$ del volumen del matraz, eliminar las burbujas que se generen en el interior del mismo golpeando suavemente la base del matraz con la palma de la mano.
- Dejar reposar el matraz a una temperatura constante de 20 °C, colocarlo sobre un baño María si es necesario, luego llenar con agua hasta a marca de calibración manteniendo esa temperatura y dejarlo reposar un momento.
- Registrar el peso del matraz con agua y la muestra con una balanza.

- Sacar la muestra del matraz evitando pérdidas de la misma, secarla en horno para después medir y registrar su peso en condición seca.
- Llenar el matraz con agua a una temperatura de 20 °C hasta la marca de calibración y registrar el peso en una balanza.

En el Anexo A.2. *Peso específico y absorción de humedad del agregado fino.*, se puede observar un registro completo de los cálculos para la obtención del peso específico a granel, peso específico saturado y superficialmente seco, peso específico aparente y el porcentaje de absorción del agua en el agregado fino de todos los bancos. En este capítulo se mostrarán únicamente los resultados obtenidos en la Tabla III.5 (Santa Ana), la Tabla III.6 (Bella Vista) y la Tabla III.7 (Sella).

Tabla III.5. - *Peso específico y absorción de agua del agregado fino del banco de río Santa Ana.*

Incógnita	Valor [gr/cm³]
Peso Específico a Granel	2,42
Peso Específico Saturado y Superficie Seca (SSS)	2,46
Peso Específico aparente	2,52
Porcentaje de absorción de agua	1,65 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla III.6. - *Peso específico y absorción de agua del agregado fino del banco de río Bella Vista.*

Incógnita	Valor [gr/cm³]
Peso Específico a Granel	2,42
Peso Específico Saturado y Superficie Seca (SSS)	2,47
Peso Específico aparente	2,54
Porcentaje de absorción de agua	1,96 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla III.7. - *Peso específico y absorción de agua del agregado fino del banco de río Sella.*

Incógnita	Valor [gr/cm³]
Peso Específico a Granel	2,45
Peso Específico Saturado y Superficie Seca (SSS)	2,50
Peso Específico aparente	2,58
Porcentaje de absorción de agua	2,12 %

Fuente: Elaboración propia.

III.2.1.3. Peso unitario del agregado fino.

De este ensayo de laboratorio se obtiene tanto el peso unitario compactado como el suelto de los agregados finos de todos los bancos, de acuerdo a lo establecido en la norma ASTM C 29.

Para la determinación del peso unitario se obtiene tanto el peso unitario compactado del material como el peso unitario suelto. Para esto se utiliza como equipo:

- Balanza.
- Varilla de 5/8 pulgadas de diámetro y 60 cm. de largo.
- Molde cilíndrico con 3 litros de capacidad.

Siempre deben pesarse los moldes que se van a utilizar y verificar que los mismos estén correctamente calibrados antes de su uso. El material a utilizarse debe ser secado previamente en horno durante 24 horas.

Los pasos a seguir para el *peso unitario compactado* se citan a continuación:

- Llenar el molde con agregado hasta la tercera parte de su capacidad, tratando de mantener el material a un mismo nivel. Luego se procede a compactar el material mediante una varilla apisonadora con 25 golpes uniformemente repartidos, evitando tocar el fondo del recipiente.
- Se repite el paso anterior dos veces hasta llenar el molde. Cuando se realice el compactado de estas nuevas capas de material, la varilla debe penetrar un poco la capa inferior.
- Eliminar el exceso de material en el molde utilizando la varilla como regla de enrase.
- Pesarse el molde con el material.

En el caso del *peso unitario suelto* los pasos son los siguientes:

- Llenar el molde con ayuda de una pala o cuchara, dejando caer el material desde una altura aproximada de 5 cm. sobre el borde superior de la medida.
- Durante el vaciado, distribuir el material uniformemente en el molde y enrasarlo.
- Pesarse el molde con el material.

En este punto se muestran los resultados de las prácticas de laboratorio para los agregados de Santa Ana (Tabla III.8 y Tabla III.9), Bella Vista (Tabla III.10 y Tabla III.11) y Sella (Tabla III.12 y Tabla III.13). Para ver más a detalle los datos obtenidos y cálculos realizados, consultar el *Anexo A.5. Peso unitario de los agregados*.

Tabla III.8. - *Peso unitario suelto del agregado fino del banco de río Santa Ana.*

Peso Unitario Suelto	Valor [gr/cm³]
Muestra 1	1,55
Muestra 2	1,55
Muestra 3	1,57
<i>Promedio</i>	1,56

Fuente: Elaboración propia.

Tabla III.9. - *Peso unitario compactado del agregado fino del banco de río Santa Ana.*

Peso Unitario Compactado	Valor [gr/cm³]
Muestra 1	1,60
Muestra 2	1,65
Muestra 3	1,65
<i>Promedio</i>	1,63

Fuente: Elaboración propia.

Tabla III.10. - *Peso unitario suelto del agregado fino del banco de río Bella Vista.*

Peso Unitario Suelto	Valor [gr/cm³]
Muestra 1	1,57
Muestra 2	1,57
Muestra 3	1,59
<i>Promedio</i>	1,57

Fuente: Elaboración propia.

Tabla III.11. - *Peso unitario compactado del agregado fino del banco de río Bella Vista.*

Peso Unitario Compactado	Valor [gr/cm³]
Muestra 1	1,70
Muestra 2	1,68
Muestra 3	1,69
<i>Promedio</i>	1,69

Fuente: Elaboración propia.

Tabla III.12. - Peso unitario suelto del agregado fino del banco de río Sella.

Peso Unitario Suelto	Valor [gr/cm³]
Muestra 1	1,65
Muestra 2	1,64
Muestra 3	1,65
<i>Promedio</i>	1,65

Fuente: Elaboración propia.

Tabla III.13. - Peso unitario compactado del agregado fino del banco de río Sella.

Peso Unitario Compactado	Valor [gr/cm³]
Muestra 1	1,70
Muestra 2	1,71
Muestra 3	1,74
<i>Promedio</i>	1,71

Fuente: Elaboración propia.

III.2.2. Ensayos para el agregado grueso.

III.2.2.1. Análisis granulométrico del agregado grueso.

Al igual que con el agregado fino, se realiza este ensayo para determinar la cantidad de partículas por tamaños, cumpliendo con lo establecido en las normativas ASTM C 136 y ASTM C 33. El equipo que se utiliza para este ensayo es el mismo que se menciona en el punto *III.2.1.1*, con la única diferencia que el juego de tamices utilizado es de mayor diámetro y sus mallas tienen mayor tamaño de aberturas, comprendiendo desde las 2 pulgadas hasta los 3/8 de pulgada.

El ensayo de granulometría del agregado grueso debe realizarse siguiendo los pasos citados a continuación:

- Realizar la limpieza de la muestra a utilizar en caso de ser necesario.
- Se realiza el cuarteo de la muestra a utilizar hasta obtener la cantidad necesaria en peso para el ensayo, la cual varía de acuerdo al tamaño máximo del agregado. Mientras mayor sea el tamaño del agregado, mayor la cantidad de muestra a usar en la práctica.
- Seleccionar los tamices necesarios para la práctica, en este caso se utilizarán los tamaños: 2", 1 1/2", 1", 3/4", 1/2" y 3/8".

- Colocar el juego de tamices uno sobre otro, incluyendo una base debajo del tamaño menor, y realizar el tamizado, agitando los tamices de manera manual o con ayuda de un agitador o vibrador mecánico, por un tiempo aproximado de 15 minutos. No se debe forzar a pasar a las partículas atascadas en las mallas.
- Desprender las partículas de agregados de cada una de las mallas, colocarlas en recipientes y con ayuda de una balanza, pesar estas muestras por tamaño y anotar el peso que se registra.

Se pueden observar en la Tabla III.15, la Tabla III.16 y Tabla III.17 la cantidad de agregados en porcentaje que pasan por cada uno de los tamices, para los agregados de Santa Ana, Bella Vista y Sella, respectivamente. En la tabla de Sella se observa que los límites granulométricos máximo y mínimos son diferentes al de los otros bancos, esto es debido a que el tamaño máximo nominal de su granulometría es mayor, por lo que se le asigna los límites para el tamaño 57 de acuerdo a lo establecido en la Tabla III.14, mientras que a los bancos de Santa Ana y Bella Vista se les asigna el tamaño 67.

Tabla III.14.- Límites establecidos por la norma ASTM C 33 para la cantidad de material que pasa por diferentes tamaños de tamices para agregado grueso.

Número de tamaño	Tamaño máximo nominal	Cantidades más finas que pasan por un tamiz en porcentaje de masa.													
		100 mm (4 in.)	90 mm (3 1/2 in.)	75 mm (3 in.)	63 mm (2 1/2 in.)	50 mm (2 in.)	37,5 mm (1 1/2 in.)	25 mm (1 in.)	19 mm (3/4 in.)	12,5 mm (1/2 in.)	9,5 mm (3/8 in.)	4,75 mm (N°4)	2,36 mm (N°8)	1,18 mm (N° 16)	300 µm (N° 50)
1	90 mm a 37,5 mm (3 1/2 a 1 1/2 in)	100	90 a 100	-	25 a 60	-	0 a 15	-	0 a 5	-	-	-	-	-	-
2	63 mm a 37,5 mm (2 1/2 a 1 1/2 in)	-	-	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	-	0 a 5	-	-	-	-	-	-
3	50 mm a 25 mm (2 a 1 in)	-	-	-	100	90 a 100	35 a 70	-	-	-	-	-	-	-	-
357	50 mm a 4,75 mm (2 in a N° 4)	-	-	-	100	95 a 100	-	35 a 70	-	10 a 30	0 a 5	-	-	-	-
4	37,5 mm a 25 mm (1 1/2 a 3/4 in)	-	-	-	-	100	95 a 100	20 a 55	0 a 15	-	0 a 5	-	-	-	-
467	37,5 mm a 4,75 mm (1 1/2 in a N° 4)	-	-	-	-	100	95 a 100	-	35 a 70	-	10 a 30	0 a 5	-	-	-
5	25 mm a 12,5 mm (1 a 1/2 in)	-	-	-	-	-	100	90 a 100	20 a 55	0 a 10	0 a 5	-	-	-	-
56	25 mm a 9,5 mm (1 a 3/8 in)	-	-	-	-	-	100	90 a 100	40 a 85	10 a 40	0 a 15	0 a 5	-	-	-
57	25 mm a 4,75 mm (1 in a N° 4)	-	-	-	-	-	100	95 a 100	-	25 a 60	0 a 10	0 a 5	-	-	-
6	19 mm a 9,5 mm (3/4 a 3/8 in)	-	-	-	-	-	-	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	0 a 5	-	-	-
67	19 mm a 4,75 mm (3/4 in a N° 4)	-	-	-	-	-	-	100	90 a 100	-	20 a 55	0 a 10	0 a 5	-	-
7	12,5 mm a 4,75 mm (1/2 in a N° 4)	-	-	-	-	-	-	-	100	90 a 100	40 a 70	0 a 15	0 a 5	-	-
8	9,5 mm a 2,56 mm (3/8 in a N° 8)	-	-	-	-	-	-	-	-	100	85 a 100	10 a 30	0 a 10	0 a 5	-
89	9,5 mm a 1,18 mm (3/8 in a N° 16)	-	-	-	-	-	-	-	-	100	90 a 100	20 a 55	5 a 30	0 a 10	0 a 5
9	4,75 mm a 1,16 mm (N° 4 a N° 16)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	100	85 a 100	10 a 40	0 a 10	0 a 5

Fuente: Norma Técnica Guatemalteca NTG-41007 – Inspirada en la norma ASTM C 33.

Tabla III.15. - Granulometría del agregado grueso del banco de río Santa Ana.

MALLA		Cantidad de material que pasa [%]	Límites según ASTM C33 (tamaño 67) [%]
Designación	Tamaño [mm]		
2"	50,80	100,00	-
1 ½"	38,10	100,00	-
1"	25,40	100,00	100
¾"	19,05	98,78	90-100
½"	12,70	54,89	-
⅜"	9,53	32,11	20-55
N°4	4,75	0,47	0-10
Base	-	0,00	-
Módulo de fineza (MF)			6,69

Fuente: Elaboración propia.

Tabla III.16. - Granulometría del agregado grueso del banco de río Bella Vista.

MALLA		Cantidad de material que pasa [%]	Límites según ASTM C33 (tamaño 67) [%]
Designación	Tamaño [mm]		
2"	50,80	100,00	-
1 ½"	38,10	100,00	-
1"	25,40	100,00	100
¾"	19,05	99,59	90-100
½"	12,70	39,46	-
⅜"	9,53	13,95	20-55
N°4	4,75	1,28	0-10
Base	-	0,00	-
Módulo de fineza (MF)			6,85

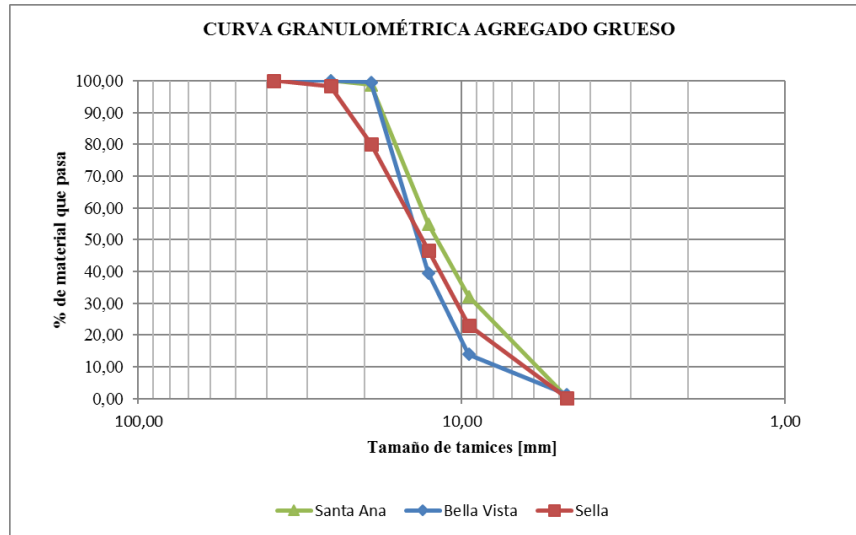
Fuente: Elaboración propia.

Tabla III.17. - Granulometría del agregado grueso del banco de río Sella.

MALLA		Cantidad de material que pasa [%]	Límites según ASTM C33 (tamaño 57) [%]
Designación	Tamaño [mm]		
2"	50,80	100,00	-
1 ½"	38,10	100,00	100
1"	25,40	98,31	95-100
¾"	19,05	80,09	-
½"	12,70	46,69	25-60
⅜"	9,53	23,05	-
N°4	4,75	0,24	0-10
Base	-	0,00	-
Módulo de fineza (MF)			6,97

Fuente: Elaboración propia.

Figura III.3.- Curva granulométrica del agregado grueso de todos los bancos (sin límites).

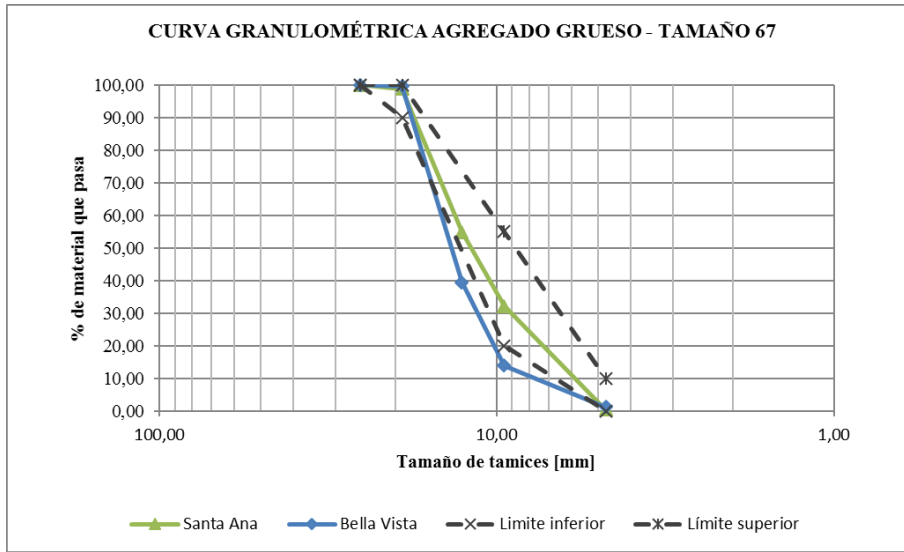


Fuente: Elaboración propia.

En la Figura III.3, se muestra la granulometría del agregado grueso de todos los bancos de material, sin embargo no se muestran los límites de granulometría debido a que estos son diferentes de acuerdo al tamaño de las partículas que posee el agregado grueso, por lo que no es apropiado compararlos en un mismo gráfico. Para ver las granulometrías de los bancos con sus correspondientes límites establecidos por la normativa ASTM C 33, se tienen la Figura III.4 y la Figura III.5, en la primera se muestran los bancos de Santa Ana y Bella Vista (al tener el mismo tipo de granulometría se pueden colocar en un mismo gráfico) y en el segundo el banco de Sella.

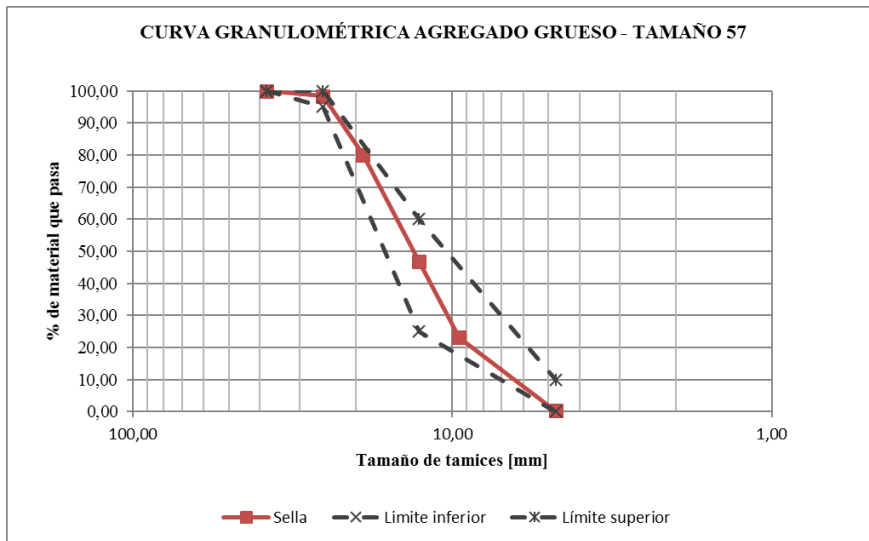
En el Anexo A.3. *Análisis granulométrico del agregado grueso.*, se pueden observar los datos obtenidos a mayor detalle para la granulometría del agregado grueso de todos los bancos.

Figura III.4.- Curva granulométrica de para Santa Ana y Bella Vista con límites de granulometría.



Fuente: Elaboración propia.

Figura III.5.- Curva granulométrica de para Sella con límites de granulometría.



Fuente: Elaboración propia.

III.2.2.2. Peso específico del agregado grueso.

Siguiendo lo establecido en la normativa ASTM C 127, se determina el peso específico del agregado grueso mediante pruebas de laboratorio. El equipo que se utiliza en este ensayo es:

- Cesto cilíndrico de tela metálica.
- Balanza.
- Recipiente para sostener y sumergir el cesto en agua para obtener el peso de la muestra sumergida.
- Toalla o paño.
- Taras o recipientes.

En este ensayo se determina los siguientes parámetros de agregado grueso: el peso específico aparente, el peso específico saturado superficialmente seco (SSS), el peso específico a granel y la cantidad de agua que puede absorber. Se siguen los pasos citados a continuación:

- Realizar cuarteo del material hasta obtener la muestra necesaria. La cantidad mínima de muestra, expresada en peso, varía de acuerdo al tamaño máximo nominal del agregado (ver Tabla III.18).

Tabla III.18. - Cantidad mínima de muestra de agregado grueso necesaria para realizar el ensayo de peso específico.

Tamaño máximo nominal		Cantidad mínima de muestra [g]
[mm]	[pulg]	
12,5	1/2	2.000
19,0	3/4	3.000
25,0	1	4.000
37,5	1 1/2	5.000
50,0	2	8.000

Fuente: “Manual de Carreteras Volumen 4: Manual de Ensayos de Suelos y Materiales”;
Administradora Boliviana de Carreteras.

- Lavar la muestra para remover el polvo superficial y/o cualquier otro material adherido en las partículas.

- Sumergir la muestra en agua durante 24 horas, después secar superficialmente las partículas con ayuda de una toalla o un paño absorbente hasta que la humedad superficial desaparezca. Realizar el pesado en el menor tiempo posible para evitar la evaporación de la humedad en los poros del agregado.
- Determinar el peso de las partículas secas superficialmente con ayuda de una balanza.
- Se vuelve a sumergir la muestra dentro de un canastillo o cesta de alambre durante un tiempo de al menos tres minutos y luego determinar el peso de esa muestra mientras se mantiene sumergida.
- Vaciar la muestra en un recipiente y secarla en el horno, asegurándose de que no se produzcan pérdidas de la muestra.
- Enfriar la muestra a temperatura ambiente, en lo posible dentro de un recipiente que evite la absorción de la humedad y determinar el peso de la muestra seca.

En este punto se muestran los resultados de los ensayos realizados para los bancos de material de Santa Ana, Bella Vista y Sella (ver Tabla III.19, Tabla III.20 y Tabla III.21). Se puede observar los cálculos de los datos obtenidos en este ensayo en mayor detalle en el Anexo A.4. *Peso específico y absorción de humedad del agregado grueso.*

Tabla III.19. - Peso específico y absorción de agua del agregado grueso del banco de río Santa Ana.

Incógnita	Valor [gr/cm³]
Peso Específico a Granel	2,56
Peso Específico Saturado y Superficie Seca (SSS)	2,60
Peso Específico aparente	2,68
Porcentaje de absorción de agua	1,66 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla III.20. - Peso específico y absorción de agua del agregado grueso del banco de río Bella Vista.

Incógnita	Valor [gr/cm³]
Peso Específico a Granel	2,60
Peso Específico Saturado y Superficie Seca (SSS)	2,63
Peso Específico aparente	2,68
Porcentaje de absorción de agua	1,09 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla III.21. - Peso específico y absorción de agua del agregado grueso del banco de río Sella.

Incógnita	Valor [gr/cm³]
Peso Específico a Granel	2,62
Peso Específico Saturado y Superficie Seca (SSS)	2,66
Peso Específico aparente	2,73
Porcentaje de absorción de agua	1,61 %

Fuente: Elaboración propia.

III.2.2.3. Peso unitario del agregado grueso.

Del mismo modo en el que se realizó el ensayo para el agregado fino, se obtiene el peso unitario compactado y el peso unitario suelto de los agregados gruesos de todos los bancos, siguiendo lo que se indica en la norma ASTM C 29.

Se utilizan los mismos materiales y se realizan los mismos procedimientos indicados en el punto III.2.1.3, siendo la única excepción el molde a utilizar, el cual deberá tener una capacidad volumétrica de 10 litros.

Se tienen los resultados de las muestras y el promedio del peso unitario de los agregados gruesos de los tres bancos de material tanto en estado compactado como suelto: para el banco de Santa Ana (Tabla III.22 y Tabla III.23), el banco de Bella Vista (Tabla III.24 y Tabla III.25), y para el banco de Sella (Tabla III.26 y Tabla III.27).

En el Anexo A.5. *Peso unitario de los agregados.*, se pueden ver en detalle todos los datos obtenidos y cálculos realizados del peso unitario del agregado grueso de los tres bancos de material.

Tabla III.22. - Peso unitario suelto del agregado grueso del banco de río Santa Ana.

Peso Unitario Suelto	Valor [gr/cm³]
Muestra 1	1,52
Muestra 2	1,52
Muestra 3	1,52
<i>Promedio</i>	1,52

Fuente: Elaboración propia.

Tabla III.23. - Peso unitario compactado del agregado grueso del banco de río Santa Ana.

Peso Unitario Compactado	Valor [gr/cm³]
Muestra 1	1,59
Muestra 2	1,60
Muestra 3	1,59
<i>Promedio</i>	1,59

Fuente: Elaboración propia.

Tabla III.24. - Peso unitario suelto del agregado grueso del banco de río Bella Vista.

Peso Unitario Suelto	Valor [gr/cm³]
Muestra 1	1,39
Muestra 2	1,39
Muestra 3	1,38
<i>Promedio</i>	1,39

Fuente: Elaboración propia.

Tabla III.25. - Peso unitario compactado del agregado grueso del banco de río Bella Vista.

Peso Unitario Compactado	Valor [gr/cm³]
Muestra 1	1,46
Muestra 2	1,46
Muestra 3	1,47
<i>Promedio</i>	1,46

Fuente: Elaboración propia.

Tabla III.26. - Peso unitario suelto del agregado grueso del banco de río Sella.

Peso Unitario Suelto	Valor [gr/cm³]
Muestra 1	1,55
Muestra 2	1,55
Muestra 3	1,53
<i>Promedio</i>	1,54

Fuente: Elaboración propia.

Tabla III.27. - Peso unitario compactado del agregado grueso del banco de río Sella.

Peso Unitario Compactado	Valor [gr/cm³]
Muestra 1	1,61
Muestra 2	1,61
Muestra 3	1,63
<i>Promedio</i>	1,62

Fuente: Elaboración propia.

III.2.3. Ensayos para el cemento.

III.2.3.1. Peso específico.

Mediante lo establecido en la norma ASTM C 188, con variantes en su aplicación debido a las limitaciones materiales de laboratorio al utilizar matraz normal en lugar de picnómetro, se realizó el ensayo de laboratorio correspondiente para muestras de cemento Portland tipo I. Para esto se utilizan los siguientes materiales:

- Matraz (en reemplazo de picnómetro)
- Gasolina
- Balanza
- Regla

Para realizar este ensayo se siguen los pasos citados a continuación:

- Llenar el matriz con gasolina hasta llegar a la graduación de 300 ml.
- Colocar el matriz en baño maría a temperatura ambiente hasta que tenga una temperatura constate y tomar la medida de la gradación, utilizar una regla en caso de ser necesario.
- Tomar 64 gr. de la muestra de cemento e introducirla en el matraz evitando que la gasolina salpique.
- Inclinar y hacer rodar el matraz cuidadosamente para eliminar las burbujas de aire atrapadas en el cemento.
- Introduce nuevamente el matraz en baño maría, con la muestra de cemento incluida, hasta alcanzar la temperatura ambiente.
- Leer la medida de gradación del líquido desplazado por la muestra.

Se realizó el ensayo con tres muestras de cemento de 64 gr., para obtener los resultados mostrados en la Tabla III.28 y con esto obtener su promedio que será igual al peso específico del cemento. Para ver el informe de laboratorio de esta práctica, consultar el *Anexo A.7. Peso específico del cemento.*

Tabla III.28. - Peso específico del cemento.

Peso Específico	Valor [gr/cm³]
Muestra 1	3,14
Muestra 2	3,15
Muestra 3	3,12
<i>Promedio</i>	3,14

Fuente: Elaboración propia.

III.2.3.2. Módulo de finura.

Para la realización de esta práctica se optó por seguir lo establecido en la norma ASTM C 184, utilizando tres muestras de cemento Portland tipo I, cuyos resultados y promedio se indican en la Tabla III.29. Para el ensayo se utilizaron los siguientes materiales:

- Tamices N°40 y N°200, incluyendo tapa y base
- Brocha
- Balanza

La realización de esta práctica fue posible siguiendo los pasos que se muestran a continuación:

- Pesar una muestra de cemento igual a 50 gr.
- Utilizando los tamices con su base y tapa, agitar la muestra manualmente durante 15 minutos. De ser posible, utilizar un vibrador mecánico para este procedimiento.
- Vaciar la muestra retenida en el tamiz N°40 sobre un papel limpio, utilizar la brocha en caso de que las partículas de cemento se atranquen en la malla. Pesar cuidadosamente la muestra retenida en la balanza.
- Pesar las muestras retenidas en la malla N°200 y en la base.

Los datos recolectados de la práctica y los cálculos realizados para la obtención del módulo de finura del cemento se pueden observar en el *Anexo A.6. Finura del cemento.*

Tabla III.29. - Finura del cemento.

Finura del cemento	Valor [%]
Muestra 1	97,88
Muestra 2	98,14
Muestra 3	98,02
<i>Promedio</i>	98,01

Fuente: Elaboración propia.

III.3. Dosificación del hormigón.

La dosificación del hormigón es la medida de cantidad de material necesario para la realizar la mezcla de hormigón (cemento, arena, grava, y agua) que pueda otorgarle la consistencia, resistencia y durabilidad necesarias para utilizarlo en obra. Se determina la cantidad de material, en peso o volumen, para un metro cúbico de hormigón, lo cual es útil para determinar la cantidad de material que se necesita para cualquier cantidad de hormigón.

Después se divide la cantidad de cada material entre la cantidad de cemento obtenida como se muestra a continuación, para obtener la proporción de material necesaria para la mezcla:

$$\frac{\text{cemento}}{\text{cemento}} : \frac{\text{arena}}{\text{cemento}} : \frac{\text{grava}}{\text{cemento}}$$

Para realizar la dosificación de las probetas de hormigón H-25 compuestas por agregados provenientes de los bancos de material de Santa Ana, Bella Vista y Sella, se aplica el método de dosificación establecido por la ACI (American Concrete Institute o Instituto Americano de Concreto), desarrollado en Estados Unidos y nombrado como el método ACI-211.

Se optó por utilizar este método porque es uno de los más confiables y utilizados por universitarios y profesionales en el departamento de Tarija, como es el caso en el Laboratorio de Hormigón de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, lugar donde se realizaron los ensayos para obtener los datos para dosificar y elaborar las probetas de hormigón H-25 necesarios para esta investigación.

Los datos característicos necesarios para la dosificación mediante ACI -211, obtenidos de los ensayos de laboratorio son:

- Tamaño máximo y tamaño máximo nominal del agregado grueso.
- Módulo de finura del agregado fino.
- Humedad de los agregados fino y grueso.
- Peso específico y absorción de la humedad de los agregados fino y grueso.
- Peso específico del cemento.
- Peso unitario compactado del agregado grueso.

De igual manera son necesarios otros parámetros, obtenidos de tablas propuestas en este método, los cuales dependen de los datos anteriormente mencionados, así como también de datos de diseño como la resistencia de diseño (resistencia que se pretende alcanzar), la resistencia característica (obtenible de la resistencia antes mencionada), y el tipo de estructura para el cual se quiere diseñar. Entre estos datos se encuentran:

- Asentamiento.
- Relación agua-cemento.
- Porcentaje de aire atrapado.
- Volumen de agua y agregado grueso necesarios para el mezclado por volumen unitario, o un metro cúbico de hormigón.

Los pasos para obtener la dosificación necesaria se indican en los puntos que se indican a continuación.

III.3.1. Paso 1: Selección del asentamiento.

En caso de no estar definido el asentamiento que debe tener la mezcla, se pueden utilizar los valores de la Tabla III.30 en función al tipo de construcción para el que se diseña.

Tabla III.30. - Revenimientos (asentamientos) recomendados para diversos tipos de construcción.

Tipo de construcción	Revenimiento (cm)	
	Máximo*	Mínimo
Muros de subestructura sencillos, zapatas, muros y cajones de cimentación.	7.5	2.5
Vigas y muros reforzados	10	2.5
Columnas para edificios	10	2.5
Pavimentos y losas	7.5	2.5
Concreto masivo	7.5	2.5

Fuente: Instituto Mexicano del Concreto y Cemento – basado en la ACI 211.1-91.

Los asentamientos máximos pueden incrementarse en 2,5 cm. cuando los métodos de compactación no son mediante vibrado.

III.3.2. Paso 2: Selección del tamaño máximo de agregado.

Se debe tener en cuenta tanto el tamaño máximo como el tamaño máximo nominal del agregado grueso obtenidos de los ensayos de granulometría.

Además, bajo ninguna circunstancia, el tamaño máximo debe exceder de:

- La quinta parte (1/5) de la menor dimensión entre los lados de los encofrados.
- La tercera parte (1/3) del espesor de las losas.
- Las tres cuartas partes (3/4) del espaciamiento libre entre varillas individuales de refuerzo.

III.3.3. Paso 3: Estimación del agua de mezclado y el contenido de aire.

Determinar la cantidad de agua por volumen de hormigón necesaria para la mezcla depende de algunas características de los agregados como su tamaño máximo nominal, forma de las partículas y granulometría, además del aire incluido. En la Tabla III.31 se estima la cantidad aproximada de agua requerida que es bastante precisa para una primera estimación. Asimismo, se indica la cantidad de aire atrapado para hormigón sin aire incluido, y la cantidad de aire recomendado de aire a incluir en hormigón con aire incluido.

Tabla III.31. - Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaño máximos de agregado.

Revenimiento (cm)	Tamaño máximo de la grava (mm)							
	9.5	12.5	19	25	38	50	75	150
Concreto sin aire incluido								
2.5 -> 5	207	199	190	179	166	154	130	113
7.5 -> 10	228	216	205	193	181	169	145	124
15 -> 17.5	243	228	216	202	190	178	160	---
Aire atrapado aprox. (%)	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
Concreto con aire incluido								
2.5 -> 5	181	175	168	160	150	142	122	107
7.5 -> 10	202	193	184	175	165	157	133	119
15 -> 17.5	216	205	197	174	174	166	154	---
Promedio recomendado de aire a incluir según el tipo de exposición (%)								
Exposición Ligera	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 Severa	7.5	7	6	6	5.5	5	4.5	4

Fuente: Instituto Mexicano del Concreto y Cemento – basado en la ACI 211.1-91.

III.3.4. Paso 4: Determinación de resistencia característica.

En este método de dosificación, una característica a tener en cuenta para su obtención es la resistencia característica de hormigón, ésta es la que se debe utilizar como la resistencia a alcanzar en los ensayos a compresión, con se realiza con el objetivo de mantener el número de pruebas bajas dentro de los límites especificados. Para obtener este valor se debe utilizar la fórmula correspondiente a la resistencia de diseño a utilizar, extraída de la Tabla III.32.

Tabla III.32. – Resistencia a compresión requerida inicialmente para la dosificación de hormigón.

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

Fuente: ACI 318.

Las ecuaciones de la Tabla III.32 se aplica cuando no se realizan ensayos previos en obra para calcular la desviación estándar de la muestra.

III.3.5. Paso 5: Selección de relación agua-cemento.

Se determina no solo por el valor de la resistencia requerida, también por la durabilidad y las propiedades del acabado. Para el uso de cemento portland Tipo I y para producir la resistencia deseada a los 28 días de curado en laboratorio, se pueden tomar los valores que se indican en la Tabla III.33.

Tabla III.33. - Correspondencia entre la relación agua/cemento y la resistencia a la compresión.

Resistencia a la compresión a los 28 días (kg/cm^2)	Relación agua/cemento (a partir del peso)	
	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
420	0.41	---
350	0.48	0.40
280	0.57	0.48
210	0.68	0.59
140	0.82	0.74

Fuente: Instituto Mexicano del Concreto y Cemento – basado en la ACI 211.1-91.

Se debe tomar como resistencia a la compresión a los 28 días en la Tabla III.33 a la resistencia característica obtenida en el paso 4 para determinar la relación agua-cemento.

III.3.6. Paso 6: Cálculo de contenido de cemento.

La cantidad en peso de cemento requerido por metro cúbico de hormigón es igual al contenido estimado del agua de mezclado dividido entre la relación agua/cemento, datos obtenidos en los pasos 3 y 5, respectivamente. Con la operación matemática mencionada se obtiene el contenido de cemento.

III.3.7. Paso 7: Estimación de la cantidad de agregado grueso.

Para obtener una facilidad de trabajo satisfactoria, el volumen del agregado grueso depende del tamaño máximo nominal y del módulo de fineza del agregado fino a utilizar, y este volumen se lo puede obtener de la Tabla III.34.

Tabla III.34. - Volumen de agregado grueso (m^3) por volumen unitario del hormigón.

Tamaño máximo del agregado grueso (mm)	Módulo de finura de la arena			
	2.40	2.60	2.80	3.00
9.5	0.50	0.48	0.46	0.44
12.5	0.59	0.57	0.55	0.53
19	0.66	0.64	0.62	0.60
25	0.71	0.69	0.67	0.65
37.5	0.75	0.73	0.71	0.69
50	0.78	0.76	0.74	0.72
75	0.82	0.80	0.78	0.76
150	0.87	0.85	0.83	0.81

Fuente: Instituto Mexicano del Concreto y Cemento – basado en la ACI 211.1-91.

Al valor obtenido de la tabla se lo multiplica por el peso volumétrico del agregado grueso, seco y compactado con varilla (peso unitario compactado), para obtener el peso de agregado grueso requerido por metro cúbico de hormigón.

III.3.8. Paso 8: Estimación de la cantidad de agregado fino.

Un procedimiento más exacto para calcular la cantidad requerida de agregado fino se basa en el uso de los volúmenes de los componentes, para ello se suman los volúmenes del agua, aire, cemento y agregado grueso, y esto se le resta al volumen unitario ($1 m^3$) de hormigón para obtener el volumen necesario de agregado fino; este volumen se multiplica con el peso específico para así obtener la cantidad en peso del agregado fino necesaria.

III.3.9. Dosificación del hormigón de cada banco.

Todos los detalles de los cálculos realizados para determinar estos resultados se encuentran en el *Anexo A.8. Dosificación de probetas de hormigón*. En este punto se mostrarán las proporciones de dosificación del hormigón H-25 con edad de 28 días, obtenidas para cada banco.

III.3.9.1. Banco de materiales del río Santa Ana.

Para el banco de materiales de Santa Ana se tienen las cantidades en volumen, peso seco y peso húmedo de cada uno de los materiales que son necesarios para realizar un metro cúbico de hormigón H-25 con edad de 28 días en la Tabla III.35.

Tabla III.35.- Pesos y volúmenes de los ingredientes para un metro cúbico de hormigón del banco de Santa Ana.

Ingrediente	Peso seco [kg/m³]	Peso húmedo [kg/m³]	Volumen absoluto [lt/m³]
Cemento	418,37	418,37	133,24
Agua	205,00	165,96	205,00
Grava	1.053,36	1.075,16	393,04
Arena	626,77	671,83	248,72
Aire	-	-	20,00
TOTAL	2.303,49	2.331,32	1.000,00

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla III.36 se encuentran las proporciones en peso del cemento, arena y grava obtenidas de dividir el peso húmedo de los materiales ya mencionados con el peso del cemento. Los resultados de estas proporciones se redondean a un decimal.

Tabla III.36. – Proporciones de dosificación del banco de Santa Ana.

Cemento	Arena	Grava
1	1,6	2,6

Fuente: Elaboración propia.

III.3.9.2. Banco de materiales del río Bella Vista.

En la Tabla III.37 se tienen los datos los materiales necesarios para la realización de un metro cúbico de hormigón H-25 con una edad de 28 días, conformado por materiales de Bella Vista, mientras que sus proporciones de mezcla en peso se encuentran en la Tabla III.38.

Tabla III.37.- Pesos y volúmenes de los ingredientes para un metro cúbico de hormigón del banco de Bella Vista.

Ingrediente	Peso seco [kg/m³]	Peso húmedo [kg/m³]	Volumen absoluto [lt/m³]
Cemento	418,37	418,37	133,24
Agua	205,00	200,90	205,00
Grava	878,40	890,87	327,76
Arena	797,56	814,39	314,00
Aire	-	-	20,00
TOTAL	2.299,33	2.324,54	1.000,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla III.38. – Proporciones de dosificación del banco de Bella Vista.

Cemento	Arena	Grava
1	1,9	2,1

Fuente: Elaboración propia.

III.3.9.3. Banco de materiales del río Sella.

La mezcla para hormigón H-25 con edad de 28 días conformado por materiales de Sella necesita las cantidades de material expresadas en la Tabla III.39, las proporciones de dosificación del hormigón se encuentran en la Tabla III.40.

Tabla III.39.- Pesos y volúmenes de los ingredientes para un metro cúbico de hormigón del banco de Sella.

Ingrediente	Peso seco [kg/m³]	Peso húmedo [kg/m³]	Volumen absoluto [lt/m³]
Cemento	393,88	393,88	125,44
Agua	193,00	144,65	193,00
Grava	1.051,70	1.073,37	385,24
Arena	725,81	784,82	281,32
Aire	-	-	15,00
TOTAL	2.364,39	2.396,71	1.000,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla III.40. – Proporciones de dosificación del banco de Sella.

Cemento	Arena	Grava
1	2	2,7

Fuente: Elaboración propia.

Se debe aclarar que para este banco se tuvo que realizar la corrección de la dosificación, debido a que las probetas otorgaban valores de resistencia bastante bajos, para eso se redujo la relación agua-cemento de 0,49 a 0,445 y se obtuvo la dosificación que se muestra en la Tabla III.42. Los pesos y volúmenes de los materiales necesarios para la dosificación del hormigón se encuentran en la Tabla III.41, los cálculos realizados para las correcciones de este banco se encuentran en el *Anexo A.8.3.1*.

Tabla III.41.- Pesos y volúmenes de los ingredientes para un metro cúbico de hormigón del banco de Sella corregidos.

Ingrediente	Peso seco [kg/m³]	Peso húmedo [kg/m³]	Volumen absoluto [lt/m³]
Cemento	433,71	433,71	138,12
Agua	193,00	146,61	193,00
Grava	1.051,70	1.073,37	385,24
Arena	693,09	749,43	268,64
Aire	-	-	15,00
TOTAL	2.371,49	2.403,12	1.000,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla III.42. – Proporciones de dosificación del banco de Sella corregidas.

Cemento	Arena	Grava
1	1,7	2,5

Fuente: Elaboración propia.

III.4. Elaboración y curado de las probetas de hormigón.

III.4.1. Elaboración de probetas.

Las probetas de hormigón H-25 necesarias para los ensayos de laboratorio se realizaron con ayuda de moldes metálicos de forma cilíndrica con un diámetro igual a 6 pulgadas y su altura de 12 pulgadas.

La mezcla de los materiales componentes del hormigón se realizó con ayuda de una mezcladora de hormigón, introduciendo poco a poco los materiales en esta máquina hasta obtener una mezcla homogénea.

III.4.1.1. Prueba del Cono de Abrams.

Con este ensayo se determina la consistencia del hormigón en estado fresco, midiendo el *slump* o asentamiento del mismo. Para su realización son necesarios los siguientes materiales:

- Molde de metal galvanizado en forma de cono, con 4 pulgadas de diámetro en la base superior, 8 pulgadas de diámetro en la base inferior y 12 pulgadas de altura.
- Superficie metálica del molde.
- Varilla apisonadora de 5/8 de pulgada de diámetro y 60 cm. de longitud.
- Regla graduada o cinta métrica.

Esta prueba se realiza mediante el siguiente procedimiento:

-Colocar el molde sobre la superficie metálica.

-Llenar el molde en tres capas, cada capa se apisona con 25 golpes de la varilla distribuidos uniformemente. Luego de apisonar la última capa, se enrasa con la varilla el material sobrante en el cono.

-Se levanta el molde verticalmente y se mide con ayuda del metro o regla el asentamiento de la muestra, usando como referencia el molde.

III.4.1.2. Vaciado de probetas.

Una vez comprobado el asentamiento del hormigón H-25, se debe vaciar la mezcla en los moldes cilíndricos. Para esto es necesario llenar los moldes en tres capas, cada capa se apisona con una varilla metálica (la misma que se utiliza en la prueba del cono de Abrams) con 25 golpes repartidos uniformemente a lo largo de su superficie y también se golpea la parte exterior del molde con combos o martillos de goma entre unas 10 a 20 veces, para reducir la cantidad de vacíos en el interior de la probeta. Al llenar el molde, se enrasa la superficie con la varilla y se empareja esa capa con ayuda de una plancha de albañil.

Se dejan secar las probetas durante aproximadamente 24 horas; pasado este tiempo se desmoldan las probetas para proceder a su curado.

III.4.2. Curado de probetas.

El curado del hormigón consiste en mantener la humedad en la mezcla, con el propósito de evitar la evaporación del agua para que esta pueda completar el fraguado correctamente y así alcanzar su máxima condición de resistencia y durabilidad.

En este caso, el curado de las probetas de hormigón H-25 se realizó en una piscina de agua ubicada dentro del laboratorio de hormigón de la U.A.J.M.S., sumergiéndolas en su totalidad, donde fueron almacenadas durante un tiempo de 28 días.

III.5. Determinación de resistencia a la compresión del hormigón.

El ensayo de resistencia a compresión del hormigón H-25 con edad de 28 días se lleva a cabo utilizando una máquina de rotura a compresión que opera hidráulicamente en base a la norma *ASTM C 39 – “Método de prueba estándar para determinar la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de hormigón”*.

Para esto es necesario introducir a la máquina una probeta de hormigón, registrando previamente en la máquina el diámetro, la altura, el peso y el tiempo de curado de la probeta; estos datos se introducen en la máquina antes iniciar el proceso de rotura, el cual lo realiza la máquina por su cuenta. En la Tabla III.43, se muestra los datos de las resistencias obtenidas de las probetas de los tres bancos de material, el informe completo de este ensayo se encuentra en el *Anexo A.9. Resistencia característica del hormigón*.

Tabla III.43. - Resistencia a la compresión del hormigón para todos los bancos de material.

Banco Santa Ana.		Banco Bella Vista.		Banco Sella.	
Número de muestra.	Resistencia a compresión (N/mm²).	Número de muestra.	Resistencia a compresión (N/mm²).	Número de muestra.	Resistencia a compresión (N/mm²).
1	24,48	1	25,47	1	23,34
2	25,73	2	24,08	2	25,46
3	24,94	3	26,13	3	25,09
4	26,60	4	24,43	4	27,86
5	26,79	5	25,98	5	27,34
6	25,40	6	25,64	6	23,69
7	27,28	7	26,39	7	25,11
8	25,69	8	25,64	8	25,95
9	25,38	9	24,84	9	25,54
10	25,00	10	25,79	10	25,51
11	26,28	11	27,20	11	26,16
12	25,18	12	26,71	12	25,10
13	26,79	13	27,46	13	25,36
14	25,56	14	25,27	14	25,45
15	26,68	15	25,51	15	25,37
Media.	25,85	Media.	25,77	Media.	25,49
Desviación Estándar.	0,83	Desviación Estándar.	0,94	Desviación Estándar.	1,14
Coefficiente de variación.	3,22%	Coefficiente de variación.	3,63%	Coefficiente de variación.	4,46%

Fuente: Elaboración propia.

III.6. Determinación del módulo de elasticidad a compresión del hormigón.

El ensayo de módulo de elasticidad se realizó en base a la norma *ASTM C 469 - "Módulo de Elasticidad Estático y Relación de Poisson del Concreto en Compresión"*, el cual realiza el uso de un compresómetro para determinar la deformación en la probeta al someterse a compresión. También es necesario utilizar un aparato que muestra los valores de la deformación, conocido como deformómetro, deformímetro o dial, contando el laboratorio de la universidad con una versión digital de este aparato, al igual que una máquina de rotura para ejercer esfuerzo de compresión longitudinal en las probetas de hormigón.

Este método de ensayo nos ayuda a determinar el módulo de elasticidad secante a compresión del hormigón H-25 aplicado a probetas cilíndricas con 28 días de edad.

El procedimiento para realizar este ensayo es el siguiente:

- Utilizar especímenes compañeros (probetas de la misma vaciada) para determinar la resistencia a compresión.
- Colocar el compresómetro o el equipo medidor de deformaciones en el cilindro a utilizar en el ensayo situándolo al centro del mismo.
- Colocar la probeta con el equipo en la máquina de resistencia a compresión, y ejercer una carga de prueba para comprobar el funcionamiento de los deformómetros y corregir de ser necesario.
- El valor máximo de las cargas aplicadas debe ser equivalente al 40% de la resistencia a compresión de la probeta.
- Aplicar al menos dos cargas subsecuentes y anotar el valor de la carga y la deformación longitudinal:
 - 1° Cuando la deformación longitudinal es igual a 50 millonésimas (deformación unitaria = 0,000050).
 - 2° Cuando la carga aplicada es igual al 40% de la resistencia a compresión última.
- En caso de necesitar una curva esfuerzo-deformación, tomar lecturas de dos o más puntos intermedios.

Para calcular el módulo de elasticidad secante a compresión, se debe aplicar la ecuación (3.1).

$$E = \frac{(S_2 - S_1)}{\varepsilon_2 - 0,000050} \quad (3.1)$$

Dónde:

E = Módulo de elasticidad secante (N/mm^2).

S_2 = Esfuerzo correspondiente al 40% de la carga última (N/mm^2).

S_1 = Esfuerzo correspondiente a la deformación longitudinal “ ϵ_1 ” igual a 50 millonésimas o 0,000050 mm/mm (N/mm²).

ϵ_2 = Deformación longitudinal producida por el esfuerzo S_2 (mm/mm).

Una observación a tener en cuenta es que con esta fórmula se mide la pendiente de una cuerda trazada desde el punto en donde la deformación longitudinal es igual a las 50 millonésimas hasta el punto equivalente al 40% de la resistencia a compresión, obtenidos de la curva esfuerzo-deformación de la probeta de hormigón utilizada, en lugar de tomar como el punto más bajo el punto de origen como se menciona en el punto II.4.7.

La razón de este procedimiento es que se mantiene el punto más bajo lo más cercano al origen, y a la vez lo suficientemente separado para no verse afectado por irregularidades en las lecturas de deformación causadas por efectos del ajuste inicial de los cabezales de la máquina de ensayo y de los deformómetros.

Con este ensayo también es posible obtener la relación de Poisson, siempre y cuando esté incluido un extensómetro en el compresómetro con un dial incluido, que mide la deformación transversal de la probeta.

Para obtener adecuadamente los datos de carga y las deformaciones correspondientes a estas en la probeta de hormigón, se optó por grabarlos en video mediante el uso de dos cámaras de celular, las cuales enfocaban la medida de los esfuerzos sometidos a la probeta registrados en la máquina de rotura y las deformaciones registradas en el deformómetro. Posteriormente, se juntaron los videos para registrar los esfuerzos y las deformaciones en las probetas de hormigón H-25 sometidas a la práctica.

Tabla III.44. – Valores del módulo de elasticidad a compresión obtenidos de especímenes del banco Santa Ana.

Banco Santa Ana.					
Número de muestra.	Resistencia a la compresión (N/mm²).	Esfuerzo 50 millonésimas - S₁ (N/mm²).	Esfuerzo 40% - S₂ (N/mm²).	Deformación longitudinal - ε₂ (mm/mm).	Módulo de elasticidad (N/mm²).
1	24,48	1,82	9,79	0,000323	29.218,86
2	25,73	1,50	10,29	0,000386	26.182,90
3	24,94	1,50	9,98	0,000406	23.838,54
4	26,60	1,37	10,64	0,000426	24.606,56
5	26,79	1,50	10,72	0,000388	27.293,01
6	25,40	1,51	10,16	0,000380	26.181,61
7	27,28	1,66	10,91	0,000378	28.213,41
8	25,69	1,97	10,28	0,000327	29.986,58
9	25,38	1,62	10,15	0,000352	28.211,54
10	25,00	1,09	10,00	0,000415	24.436,05
11	26,28	1,53	10,51	0,000403	25.471,12
12	25,18	1,49	10,07	0,000406	24.144,16
13	26,79	1,44	10,72	0,000427	24.632,58
14	25,56	1,35	10,22	0,000381	26.785,61
15	26,68	1,43	10,67	0,000389	27.250,83

Fuente: Elaboración propia.

Los valores de módulo de elasticidad, así como los datos necesarios para su obtención como el esfuerzo a 50 millonésimas, esfuerzo a 40 % de la resistencia y la deformación longitudinal de cada muestra para todos los bancos de material se muestran en la Tabla III.44, la Tabla III.45 y la Tabla III.46.

Tabla III.45. – Valores del módulo de elasticidad a compresión obtenidos de especímenes del banco Bella Vista.

Banco Bella Vista.					
Número de muestra.	Resistencia a la compresión (N/mm²).	Esfuerzo 50 millonésimas - S₁ (N/mm²).	Esfuerzo 40% - S₂ (N/mm²).	Deformación longitudinal - ε₂ (mm/mm).	Módulo de elasticidad (N/mm²).
1	25,47	1,43	10,19	0,000388	25.904,05
2	24,41	1,44	9,76	0,000381	25.164,52
3	26,13	1,72	10,45	0,000365	27.751,96
4	24,43	1,87	9,77	0,000302	31.418,75
5	25,98	1,55	10,39	0,000364	28.193,81
6	25,64	1,67	10,25	0,000347	28.917,99
7	26,39	1,39	10,55	0,000378	27.914,65
8	25,64	1,63	10,25	0,000340	29.748,44
9	24,84	1,51	9,94	0,000350	28.074,36
10	25,79	1,63	10,31	0,000343	29.645,92
11	27,20	1,52	10,88	0,000405	26.382,85
12	26,71	1,55	10,68	0,000397	26.305,02
13	27,46	1,97	10,98	0,000348	30.253,94
14	25,27	1,52	10,11	0,000376	26.302,94
15	25,51	1,83	10,21	0,000347	28.154,51

Fuente: Elaboración propia.

Para ver detalladamente la obtención de los módulos de elasticidad a compresión obtenidos de todos los bancos de material, se recomienda revisar el *Anexo A.10. Módulo de elasticidad a compresión del hormigón.*

Tabla III.46.- Valores del módulo de elasticidad obtenido de especímenes del banco Sella.

Banco Sella.					
Número de muestra.	Resistencia a la compresión (N/mm²).	Esfuerzo 50 millonésimas - S₁ (N/mm²).	Esfuerzo 40% - S₂ (N/mm²).	Deformación longitudinal - ϵ_2 (mm/mm).	Módulo de elasticidad (N/mm²).
1	23,34	1,43	9,33	0,000363	25.293,58
2	25,46	1,57	10,19	0,000404	24.347,01
3	25,09	1,38	10,04	0,000412	23.898,69
4	27,86	1,68	11,15	0,000410	26.289,82
5	27,34	1,75	10,94	0,000358	29.814,42
6	23,69	1,93	9,48	0,000315	28.469,80
7	25,11	1,50	10,04	0,000363	27.285,93
8	25,95	1,31	10,38	0,000416	24.804,02
9	25,54	1,72	10,22	0,000380	25.735,04
10	25,51	2,01	10,21	0,000339	28.338,19
11	26,16	1,46	10,46	0,000437	23.285,53
12	25,10	1,65	10,04	0,000363	26.803,60
13	25,36	1,72	10,14	0,000347	28.347,43
14	25,45	1,61	10,18	0,000389	25.250,12
15	25,37	1,73	10,15	0,000352	27.829,86

Fuente: Elaboración propia.

III.7. Análisis de resultados.

El análisis estadístico descriptivo se refiere al análisis de un conjunto de datos, el cual es realizado mediante una serie de métodos que permiten recolectar y ordenar un grupo de datos, presentarlos de manera gráfica y/o tabulada, describir las tendencias o comportamientos claves de los datos, para poder llegar a una conclusión válida mediante la interpretación de estos datos.

III.7.1. Recopilación de datos obtenidos.

En la Tabla III.47 se recopilan los valores de módulo de elasticidad a compresión obtenidos de las probetas de hormigón H-25 con edad de 28 días para cada banco de material, así como la media aritmética (o promedio aritmético), la desviación estándar y el coeficiente de variabilidad de cada conjunto de datos de cada banco.

Tabla III.47. – Valores del módulo de elasticidad de todos los bancos de material.

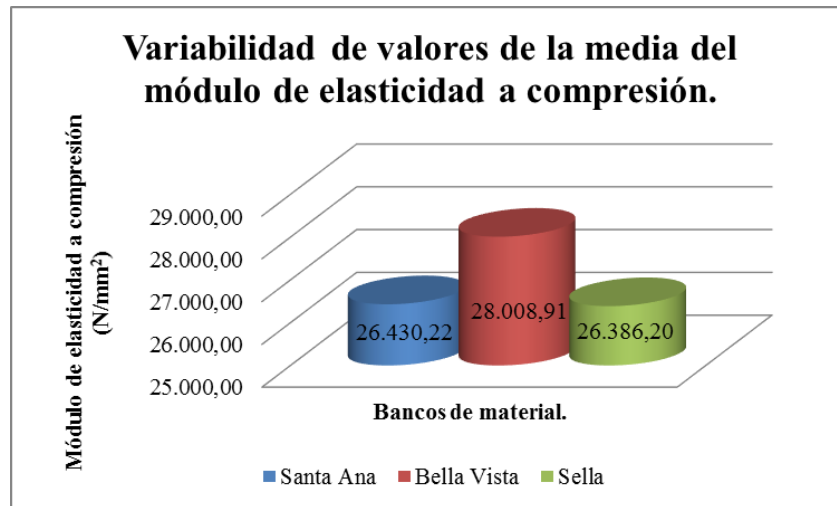
Banco Santa Ana.		Banco Bella Vista.		Banco Sella.	
Número de muestra.	Módulo de elasticidad (N/mm²).	Número de muestra.	Módulo de elasticidad (N/mm²).	Número de muestra.	Módulo de elasticidad (N/mm²).
1	29.218,86	1	25.904,05	1	25.293,58
2	26.182,90	2	25.164,52	2	24.347,01
3	23.838,54	3	27.751,96	3	23.898,69
4	24.606,56	4	31.418,75	4	26.289,82
5	27.293,01	5	28.193,81	5	29.814,42
6	26.181,61	6	28.917,99	6	28.469,80
7	28.213,41	7	27.914,65	7	27.285,93
8	29.986,58	8	29.748,44	8	24.804,02
9	28.211,54	9	28.074,36	9	25.735,04
10	24.436,05	10	29.645,92	10	28.338,19
11	25.471,12	11	26.382,85	11	23.285,53
12	24.144,16	12	26.305,02	12	26.803,60
13	24.632,58	13	30.253,94	13	28.347,43
14	26.785,61	14	26.302,94	14	25.250,12
15	27.250,83	15	28.154,51	15	27.829,86
Media.	26.430,22	Media.	28.008,91	Media.	26.386,20
Desviación Estándar.	1.924,30	Desviación Estándar.	1.779,10	Desviación Estándar.	1.930,95
Coefficiente de variación.	7,28%	Coefficiente de variación.	6,35%	Coefficiente de variación.	7,32%

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a los datos obtenidos de la Tabla III.47, la media del módulo de elasticidad a compresión del banco Bella Vista es la mayor, seguida de Santa Ana y finalmente Sella. Los coeficientes de variación de todos los bancos mencionados se encuentran entre un 6-8% de la media aritmética, esto nos indica que, al ser estos valores menores a 10%, el control de las pruebas de hormigón es bueno.

En la Figura III.6 se observa mediante un gráfico de barras la variación entre los valores del módulo de elasticidad a compresión en el hormigón de todos los bancos.

Figura III.6.- Variabilidad del módulo de elasticidad a compresión de los bancos de material.



Fuente: Elaboración propia.

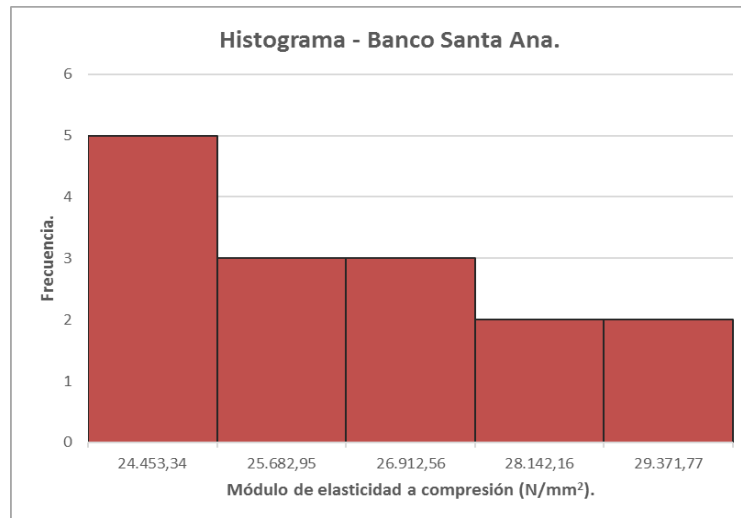
Para describir de manera gráfica cada conjunto de datos, se realizó el histograma para cada banco de material, además de tablas de frecuencias que contienen los datos utilizados para realizar cada uno de estos gráficos.

Tabla III.48.- Tabla de frecuencias banco Santa Ana.

Intervalo de clase [N/mm ²]		Marca de clase	Frecuencia absoluta		Frec. Abs. acumulada
Desde	Hasta	[N/mm ²]	[adm]	[%]	[%]
23.838,54	25.068,15	24.453,34	5	33,33	33,33
25.068,15	26.297,75	25.682,95	3	20,00	53,33
26.297,75	27.527,36	26.912,56	3	20,00	73,33
27.527,36	28.756,97	28.142,16	2	13,33	86,67
28.756,97	29.986,58	29.371,77	2	13,33	100,00
Total			15	100,00	

Fuente: Elaboración propia.

Figura III.7.- Histograma del banco Santa Ana.



Fuente: Elaboración propia.

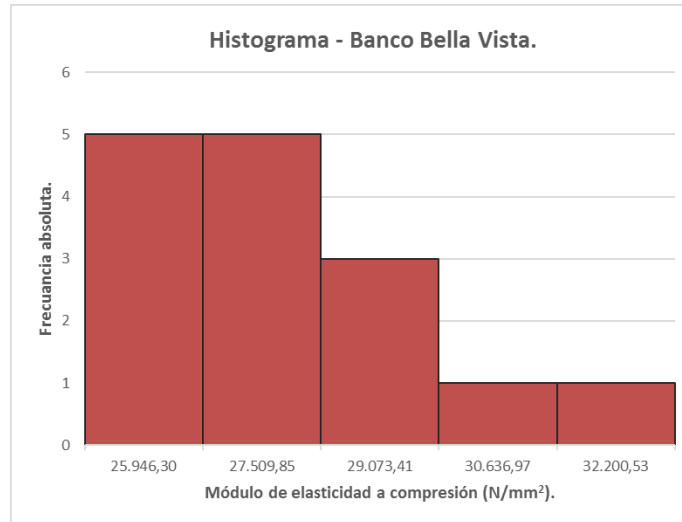
En el histograma del banco Santa Ana (ver Figura III.7) se muestra que en los intervalos con menor valor de módulo de elasticidad a compresión poseen más datos con respecto a los de mayor valor, ya que la mayor parte de los datos obtenidos (5) se encuentran en el primer intervalo de clase; en el segundo y tercer intervalo se encuentran tres datos en cada uno, y finalmente en el resto de intervalos se encuentran dos datos para cada uno.

Tabla III.49.- Tabla de frecuencias del banco Bella Vista.

Intervalo de clase		Marca de clase	Frecuencia absoluta		Frec. Abs. acumulada
Desde	Hasta		[adm]	[%]	[%]
25.164,52	26.728,08	25.946,30	5	33,33	33,33
26.728,08	28.291,63	27.509,85	5	33,33	66,67
28.291,63	29.855,19	29.073,41	3	20,00	86,67
29.855,19	31.418,75	30.636,97	1	6,67	93,33
31.418,75	32.982,31	32.200,53	1	6,67	100,00
Total			15	100	

Fuente: Elaboración propia.

Figura III.8.- Histograma del banco Bella Vista.



Fuente: Elaboración propia.

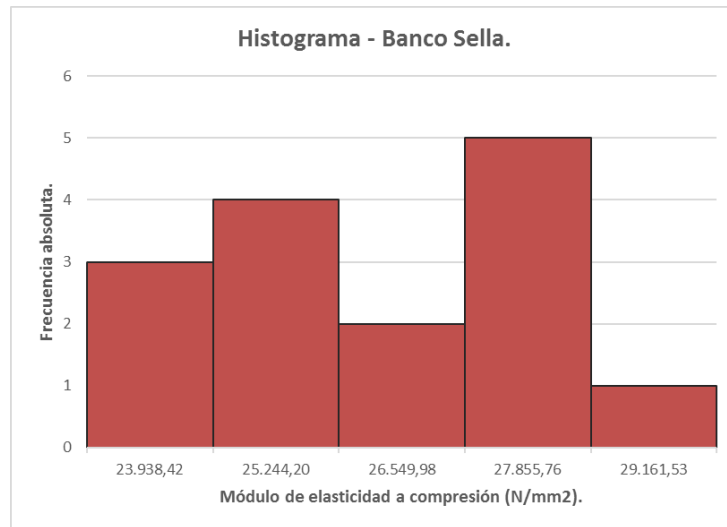
En este histograma de la Figura III.8 se observa una situación similar al del banco anterior. La mayoría de los datos del banco de Bella Vista se encuentran dentro de los dos primeros intervalos de su histograma, conteniendo cinco datos cada uno de ellos. El tercer intervalo posee tres datos y los últimos dos intervalos poseen un dato cada uno.

Tabla III.50.- Tabla de frecuencias del banco Sella.

Intervalo de clase		Marca de clase	Frecuencia absoluta		Frec. Abs. acumulada
Desde	Hasta		[adm]	[%]	[%]
23.285,53	24.591,31	23.938,42	3	20,00	20,00
24.591,31	25.897,09	25.244,20	4	26,67	46,67
25.897,09	27.202,87	26.549,98	2	13,33	60,00
27.202,87	28.508,64	27.855,76	5	33,33	93,33
28.508,64	29.814,42	29.161,53	1	6,67	100,00
Total			15	100	

Fuente: Elaboración propia.

Figura III.9.- Histograma del banco Sella.



Fuente: Elaboración propia.

El histograma del banco de Sella (ver Figura III.9) posee una cantidad variada de datos para cada uno de sus intervalos, teniendo tres, cuatro, dos, cinco y uno para el primer, segundo, tercer, cuarto y quinto intervalo, respectivamente.

III.7.2. Aplicación de la distribución t de Student.

Para este trabajo de investigación, la distribución t de Student se utiliza para determinar la media poblacional del módulo de elasticidad a compresión del hormigón H-25 con edad de 28 días para cada uno de los tres bancos de material, teniendo como datos un grado de libertad $\nu=14$ y un nivel de confianza del 95%, o, dicho de otro modo, un nivel de significancia $\alpha=0,05$. Como los valores de las medias poblacionales obtenidas representan los límites del nivel de confianza, se utilizan dos valores de $t_{0,025}$ situados uno en la izquierda y otro en la derecha del eje horizontal en la gráfica, con valores igual a -2,145 y 2,145, respectivamente; estos valores los aplicamos en la ecuación (2.10) como valor “t”.

En la Tabla III.51, la Tabla III.52 y la Tabla III.53 se muestran todos los datos utilizados para la obtención de la media poblacional del módulo de elasticidad a compresión del hormigón para los bancos de Santa Ana, Bella Vista y Sella, respectivamente. Estos datos se aplican en la ecuación (2.10), al tener dos valores de t (uno positivo y otro negativo), se obtienen dos resultados los cuales representan los límites del rango de la media

poblacional del módulo de elasticidad a compresión del hormigón, ambos representados en estas tablas.

Tabla III.51.- Obtención de media poblacional del módulo de elasticidad a compresión para el banco Santa Ana.

Banco Santa Ana			
Parámetro	Unidad	Valor	
Media muestral (\bar{X})	N/mm ²	26.430,22	
Desviación estándar muestral (S)	N/mm ²	1.924,30	
Grado de libertad (v)	Adim	14	
Nivel de significancia (α)	Adim	0,05	
Valor t (t_{α})	Adim	-2,145	2,145
Media poblacional (μ)	N/mm ²	25.364,48	27.495,97

Fuente: Elaboración propia.

Tabla III.52.- Obtención de media poblacional del módulo de elasticidad a compresión para el banco Bella Vista.

Banco Bella Vista			
Parámetro	Unidad	Valor	
Media muestral (\bar{X})	N/mm ²	28.008,91	
Desviación estándar muestral (S)	N/mm ²	1.779,10	
Grado de libertad (v)	Adim	14	
Nivel de significancia (α)	Adim	0,05	
Valor t (t_{α})	Adim	-2,145	2,145
Media poblacional (μ)	N/mm ²	27.023,59	28.994,24

Fuente: Elaboración propia.

Tabla III.53.- Obtención de media poblacional del módulo de elasticidad a compresión para el banco Sella.

Banco Sella			
Parámetro	Unidad	Valor	
Media muestral (\bar{X})	N/mm ²	26.386,20	
Desviación estándar muestral (S)	N/mm ²	1.930,95	
Grado de libertad (v)	Adim	14	
Nivel de significancia (α)	Adim	0,05	
Valor t (t_{α})	Adim	-2,145	2,145
Media poblacional (μ)	N/mm ²	25.316,77	27.455,63

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados el valor de la media poblacional obtenidos también se pueden representar, para cada banco de material, con un nivel de confianza del 95%, de la siguiente manera:

- $\mu_{\text{Santa Ana}} = 26.430,22 \pm 1.065,75 \text{ N/mm}^2$
- $\mu_{\text{Bella Vista}} = 28.008,91 \pm 985,33 \text{ N/mm}^2$
- $\mu_{\text{Sella}} = 26.386,20 \pm 1.069,43 \text{ N/mm}^2$

III.7.3. Comparación entre los resultados obtenidos con normativas.

Para comprender mejor el valor de los resultados de módulo de elasticidad a compresión del hormigón obtenidos, se utilizarán gráficos y tablas de datos para cada banco de material, las cuales mostrarán los diferentes valores del módulo de elasticidad para cada una de las muestras de hormigón, obtenidos de las ecuaciones de las normativas ACI 318S (Estados Unidos), Eurocódigo 2 (Europa), EHE-08 (España), CBH-87 (Bolivia) y NB 1225001 (Bolivia), ecuaciones que se describen en el marco teórico desde el punto II.4.8 al punto II.4.12 del presente trabajo de investigación.

Se utilizarán gráficos *esfuerzo a compresión vs. módulo de elasticidad*, donde los módulos de elasticidad a compresión del hormigón H-25 con edad de 28 días obtenidos de ensayos de laboratorio son representados por puntos negros, de los cuales se obtiene una línea de tendencia (de color negro), esta podrá compararse con las normativas las cuales se representan como líneas de diferentes colores.

Se debe tener en cuenta es que, para simplificar la disposición de los datos, los resultados de las normativas de ACI 318S y NB 1225001 serán mostrados en una misma columna en las tablas y en una misma línea en los gráficos, debido a que ambas utilizan la misma ecuación para el módulo de elasticidad a compresión.

Asimismo, se utilizará el método de la norma mexicana NMX-C-128 (norma inspirada en ASTM C 469), ya que en esta norma se encuentra un método para obtener una curva esfuerzo-módulo de elasticidad para realizar comparaciones.

Este método consiste en obtener un coeficiente numérico de elasticidad con los datos obtenidos de laboratorio utilizando la ecuación (3.2).

$$K = \frac{E}{\sqrt{f'c}} \quad (3.2)$$

Donde:

K = Coeficiente numérico de elasticidad

E = Módulo de elasticidad a compresión del hormigón promedio de los datos obtenidos de laboratorio (N/mm²)

f'c = Resistencia a compresión del hormigón promedio de los datos obtenidos de laboratorio (N/mm²)

Luego, con el valor de este coeficiente (K) y los valores de resistencia a compresión obtenidos de laboratorio (f'ci), para obtener módulos de elasticidad (Ei) de la ecuación (3.3), la cual utiliza las mismas unidades de la ecuación (3.2), con los datos de “f'ci” y “Ei” se grafica la línea curva.

$$Ei = k * \sqrt{f'ci} \quad (3.3)$$

III.7.3.1. Comparaciones del banco de Santa Ana.

En la Tabla III.54 se encuentran los datos de módulo de elasticidad a compresión del hormigón H-25 con 28 días de edad del banco de Santa Ana, obtenidos de la práctica de laboratorio y de las ecuaciones de las normativas, así como la resistencia a compresión de cada probeta. Con los promedios del módulo de elasticidad a compresión de los datos obtenidos de la práctica de laboratorio y de la resistencia a la compresión, se obtiene el valor de “k” para el banco de Santa Ana, reemplazando en la ecuación (3.2) como corresponde a continuación.

$$k = \frac{26.430,22}{\sqrt{25,85}} = 5.198,23$$

Con este dato, la ecuación para el banco de Santa Ana queda de la siguiente manera:

$$Ei = 5.198,23 * \sqrt{f'ci} \quad (3.4)$$

La ecuación (3.4) se representa en la Figura III.10 como una línea amarilla en la gráfica. De igual manera, se representa en esta gráfica la línea de tendencia potencial mediante una línea de color negro.

Tabla III.54.- Módulos de elasticidad a compresión según normas para banco Santa Ana.

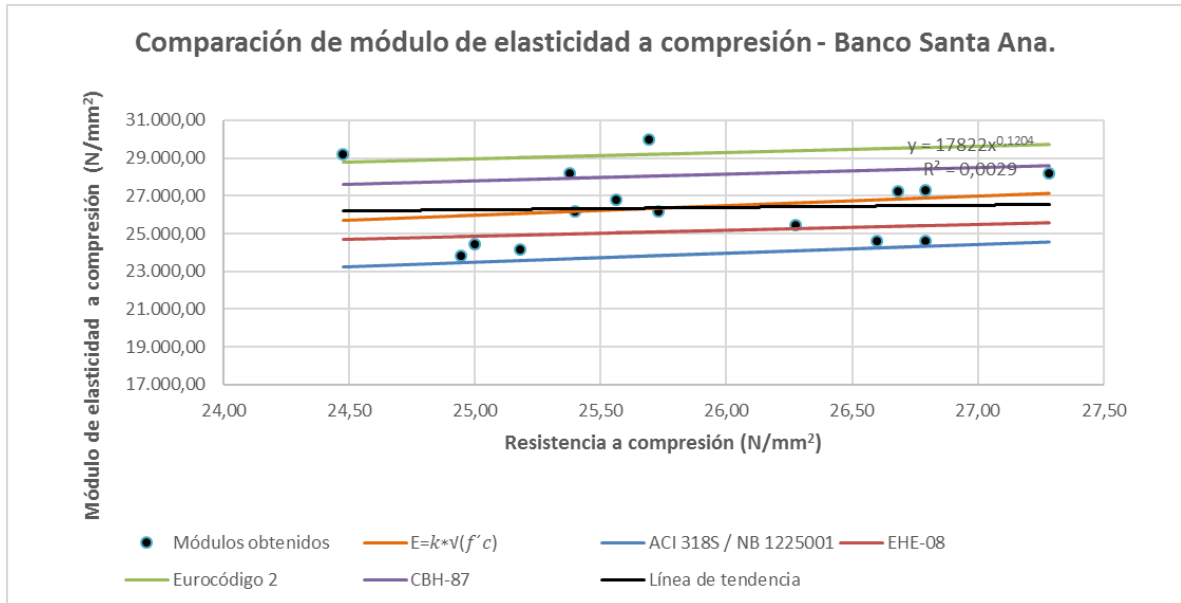
Banco Santa Ana.						
Número de muestra	Resistencia a compresión (N/mm²)	Módulo de elasticidad a compresión (N/mm²)				
		Obtenido de laboratorio	ACI 318S / NB 1225001	EHE-08	Eurocódigo 2	CBH-87
1	24,48	29.218,86	23.252,42	24.679,28	28.776,95	27.582,72
2	25,73	26.182,90	23.841,20	25.094,15	29.211,97	28.046,40
3	24,94	23.838,54	23.473,56	24.835,50	28.940,85	27.757,33
4	26,60	24.606,56	24.238,67	25.372,28	29.503,21	28.357,26
5	26,79	27.293,01	24.327,61	25.434,31	29.568,12	28.426,58
6	25,40	26.181,61	23.686,56	24.985,52	29.098,13	27.924,99
7	27,28	28.213,41	24.549,41	25.588,67	29.729,57	28.599,10
8	25,69	29.986,58	23.822,21	25.080,82	29.198,00	28.031,50
9	25,38	28.211,54	23.676,21	24.978,24	29.090,51	27.916,86
10	25,00	24.436,05	23.499,64	24.853,89	28.960,14	27.777,88
11	26,28	25.471,12	24.091,91	25.269,76	29.395,89	28.242,67
12	25,18	24.144,16	23.584,65	24.913,80	29.022,96	27.844,84
13	26,79	24.632,58	24.327,61	25.434,31	29.568,12	28.426,58
14	25,56	26.785,61	23.762,56	25.038,94	29.154,12	27.984,69
15	26,68	27.250,83	24.277,30	25.399,23	29.531,41	28.387,37
Media	25,85	26.430,22	23.894,10	25.130,58	29.250,00	28.087,12

Fuente: Elaboración propia.

Utilizando las ecuaciones de cada normativa, se tiene que el Eurocódigo 2 (línea verde) tiene la mayor posición en los gráficos, situándose entre valores de 29.000 y 30.000 N/mm². En segundo lugar, se encuentra la normativa boliviana CBH-87 (línea morada), entre 27.500 y 29.500 N/mm².

A continuación, se encuentra la instrucción española EHE-08 (línea roja), ubicada entre los 24.500 y 25.500 N/mm², y finalmente tenemos a la normativa estadounidense ACI 318S y la normativa boliviana NB 1225001, ambas representadas por la línea azul al utilizar la misma ecuación, con valores entre los 23.000 y 24.500 N/mm². Lo mencionado en este párrafo y el anterior se aplica en los tres bancos de material.

Figura III.10.- Comparación del módulo de elasticidad a compresión según diferentes normativas para banco Santa Ana.



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura III.10, se observa que la línea de tendencia, conformada por los datos de laboratorio del banco de Santa Ana, ubicándose de acuerdo al gráfico aproximadamente por los 26.000 N/mm² de módulo de deformación longitudinal a compresión, entre la instrucción EHE y las normativas ACI/NB. En el caso de la ecuación (3.4) se posiciona aproximadamente entre los 25.500 y los 27.000 N/mm², y en promedio aproximadamente por los 26.500 N/mm².

III.7.3.2. Comparaciones del banco de Bella Vista.

En la Tabla III.55 se encuentran los datos de módulo de elasticidad a compresión del hormigón H-25 con 28 días de edad del banco de Bella Vista. Al igual que en el punto anterior, se obtiene el valor de “k” para el banco de Bella Vista utilizando la ecuación (3.2).

$$k = \frac{28.008,91}{\sqrt{25,79}} = 5.515,31$$

Con este dato, se obtiene la ecuación (3.5). Esta ecuación se representa como la curva amarilla en la Figura III.11

$$E_i = 5.515,31 * \sqrt{f'_{ci}} \quad (3.5)$$

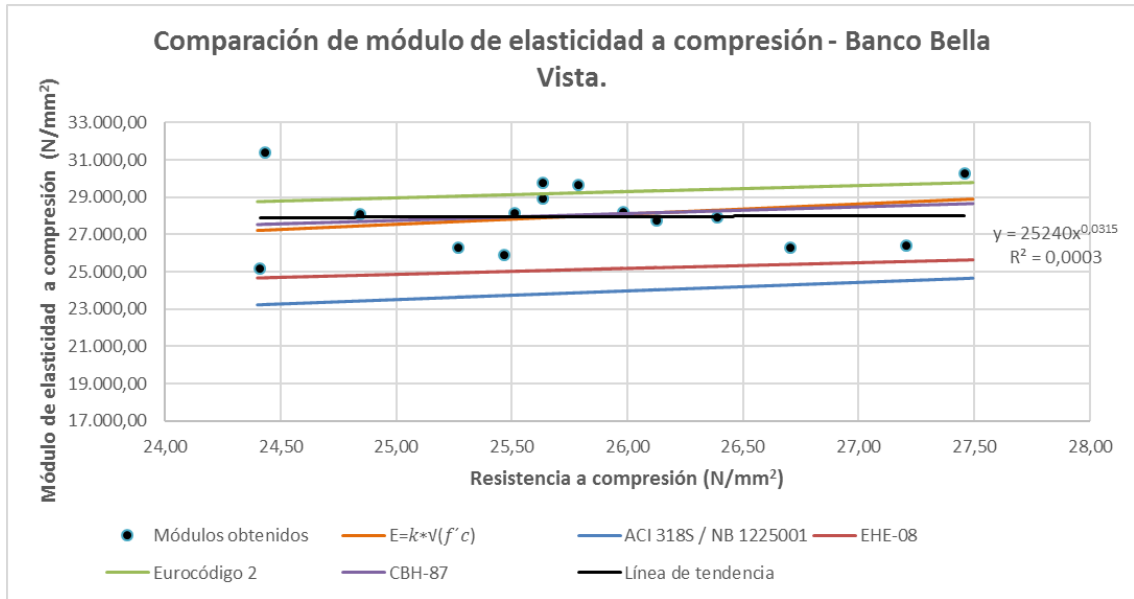
Tabla III.55.- Módulos de elasticidad a compresión según normas para banco Bella Vista.

Banco Bella Vista.						
Número de muestra	Resistencia a compresión (N/mm ²)	Módulo de elasticidad a compresión (N/mm ²)				
		Obtenido de laboratorio	ACI 318S / NB 1225001	EHE-08	Eurocódigo 2	CBH-87
1	25,47	25.904,05	23.717,57	25.007,32	29.120,98	27.949,35
2	24,41	25.164,52	23.221,71	24.657,54	28.754,15	27.558,43
3	26,13	27.751,96	24.023,77	25.222,10	29.345,99	28.189,40
4	24,43	31.418,75	23.232,26	24.665,01	28.761,98	27.566,78
5	25,98	28.193,81	23.956,18	25.174,76	29.296,41	28.136,50
6	25,64	28.917,99	23.796,84	25.063,01	29.179,35	28.011,60
7	26,39	27.914,65	24.142,66	25.305,24	29.433,03	28.282,32
8	25,64	29.748,44	23.796,84	25.063,01	29.179,35	28.011,60
9	24,84	28.074,36	23.426,74	24.802,47	28.906,20	27.720,41
10	25,79	29.645,92	23.866,45	25.111,86	29.230,53	28.066,20
11	27,20	26.382,85	24.514,30	25.564,26	29.704,05	28.571,83
12	26,71	26.305,02	24.288,49	25.407,03	29.539,57	28.396,10
13	27,46	30.253,94	24.627,55	25.642,94	29.786,31	28.659,76
14	25,27	26.302,94	23.624,94	24.942,17	29.052,69	27.876,54
15	25,51	28.154,51	23.739,83	25.022,97	29.137,38	27.966,84
Media	25,79	28.008,91	23.865,07	25.110,11	29.228,53	28.064,24

Fuente: Elaboración propia.

Para el banco de materiales de Bella Vista, la línea de tendencia en la Figura III.11 se ubica por los 28.000 N/mm² de deformación longitudinal, ligeramente por encima de la instrucción EHE-08. La ecuación (3.5) se encuentra aproximadamente entre 27.000 y 29.000 N/mm², cuyo promedio posee el mismo valor de la línea de tendencia de 28.000 N/mm².

Figura III.11.- Comparación del módulo de elasticidad a compresión según diferentes normativas para banco Bella Vista.



Fuente: Elaboración propia.

III.7.3.3. Comparaciones del banco de Sella.

Se realiza el mismo procedimiento utilizado en los dos puntos anteriores para determinar el valor de “k” del banco de Sella, con los datos que se encuentran en la Tabla III.56.

$$k = \frac{26.386,20}{\sqrt{25,49}} = 5.226,41$$

Con el valor de “k” obtenido, se determina la ecuación (3.6) para el banco de Sella a continuación.

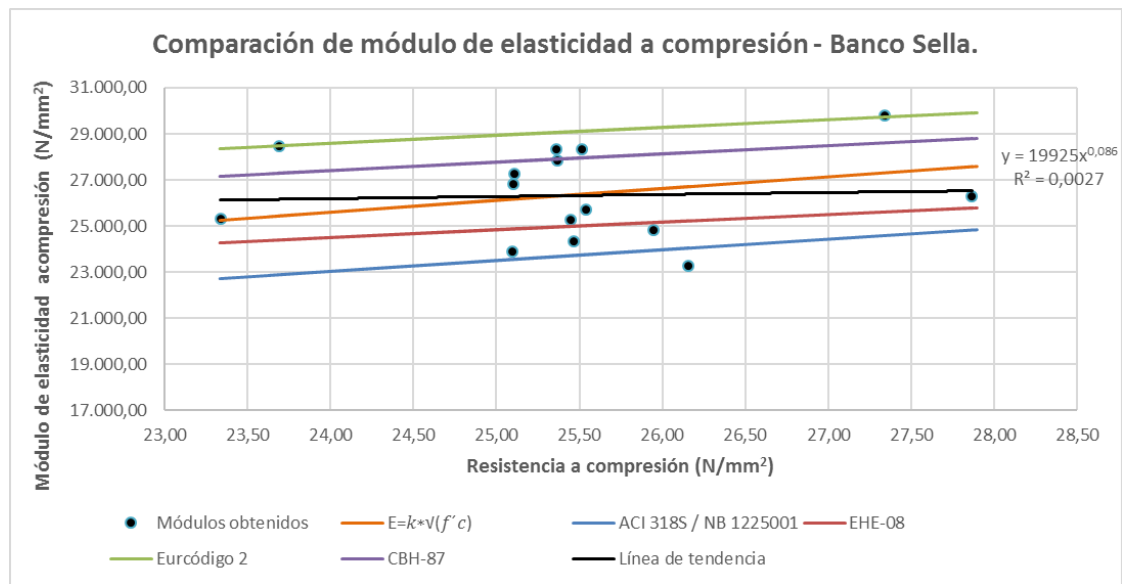
$$E_i = 5.226,41 * \sqrt{f'c_i} \quad (3.6)$$

Tabla III.56.- Módulos de elasticidad a compresión según normas para banco Sella.

Banco Sella.						
Número de muestra	Resistencia a compresión (N/mm ²)	Módulo de elasticidad a compresión (N/mm ²)				
		Obtenido de laboratorio	ACI 318S / NB 1225001	EHE-08	Eurocódigo 2	CBH-87
1	23,34	25.293,58	22.704,24	24.289,86	28.367,97	27.147,49
2	25,46	24.347,01	23.716,95	25.006,89	29.120,53	27.948,87
3	25,09	23.898,69	23.544,29	24.885,37	28.993,15	27.813,06
4	27,86	26.289,82	24.810,00	25.769,43	29.918,51	28.801,13
5	27,34	29.814,42	24.574,80	25.606,31	29.748,02	28.618,82
6	23,69	28.469,80	22.876,98	24.412,91	28.497,26	27.285,01
7	25,11	27.285,93	23.550,06	24.889,43	28.997,41	27.817,60
8	25,95	24.804,02	23.942,09	25.164,89	29.286,08	28.125,47
9	25,54	25.735,04	23.752,52	25.031,88	29.146,73	27.976,81
10	25,51	28.338,19	23.739,68	25.022,86	29.137,27	27.966,73
11	26,16	23.285,53	24.037,57	25.231,75	29.356,09	28.200,19
12	25,10	26.803,60	23.548,64	24.888,43	28.996,36	27.816,48
13	25,36	28.347,43	23.669,02	24.973,18	29.085,20	27.911,20
14	25,45	25.250,12	23.708,28	25.000,79	29.114,14	27.942,06
15	25,37	27.829,86	23.671,04	24.974,60	29.086,69	27.912,79
Media	25,49	26.386,20	23.723,08	25.009,91	29.123,43	27.952,25

Fuente: Elaboración propia.

Figura III.12- Comparación del módulo de elasticidad a compresión según diferentes normativas para banco Sella.

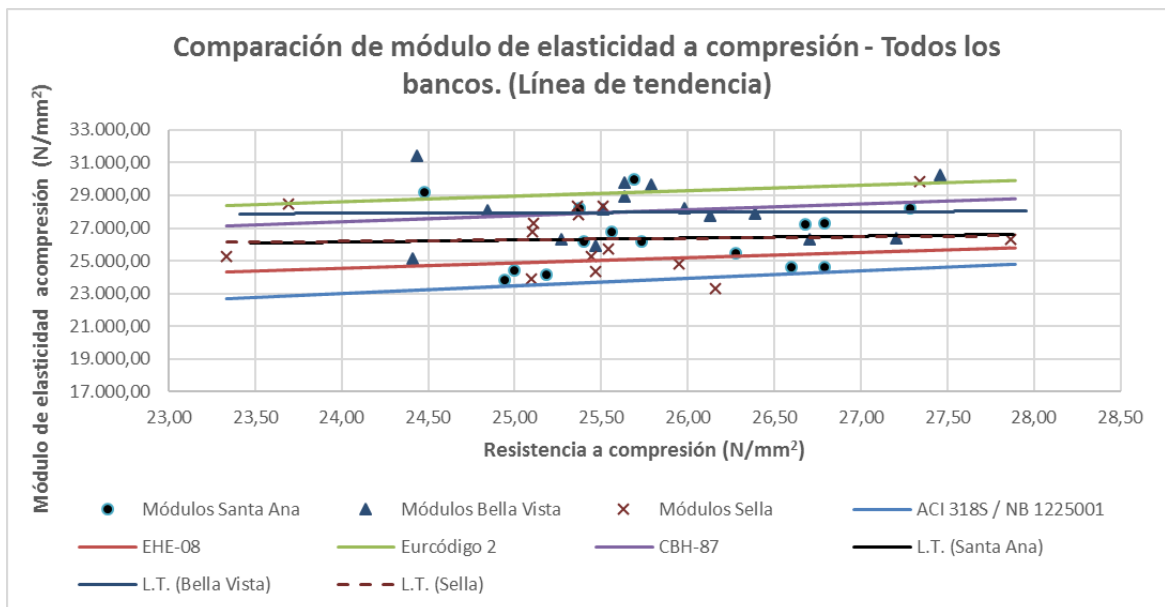


Fuente: Elaboración propia.

En la Figura III.12 se observa que la mayoría de los datos obtenidos se encuentran entre las normas EHE y ACI/NB. La línea de tendencia generada se encuentra aproximadamente por los 26.000 N/mm² de módulo de elasticidad. La línea generada por la ecuación (3.6) se sitúa entre los 25.000 y 27.500 N/mm², con un promedio aproximado de 26.400 N/mm².

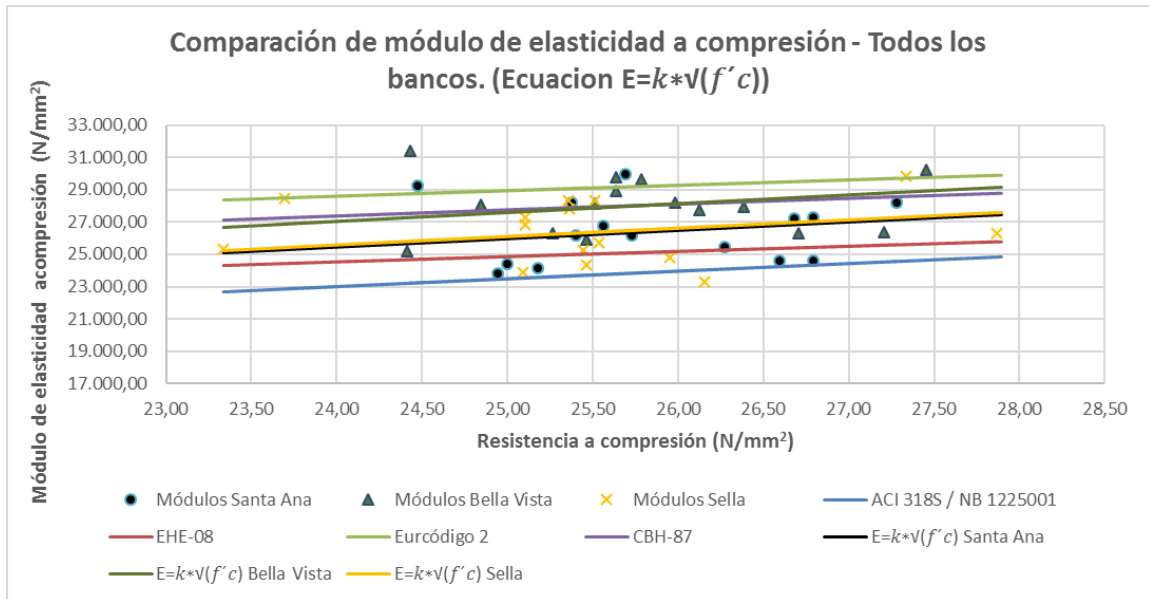
A continuación, se muestran gráficos donde se muestran todos los bancos de material. En la Figura III.13 se encuentran las curvas conformadas por líneas de tendencia potencial formadas por los datos de cada banco, y en la Figura III.14 se encuentran las curvas formadas por las ecuaciones desarrolladas en base a la norma mexicana NMX-C-128. En ambas figuras se muestran los todos datos de módulo de elasticidad a compresión obtenidos de los tres bancos: Santa Ana, Bella Vista y Sella.

Figura III.13.- Comparación de módulo de elasticidad a compresión con las líneas de tendencia de todos los bancos.



Fuente: Elaboración propia.

Figura III.14.- Comparación de módulo de elasticidad a compresión con la ecuación $E=k*\sqrt{(f'c)}$ de todos los bancos.



Fuente: Elaboración propia.

III.7.4. Contrastación de hipótesis con los resultados obtenidos.

Para tener una mejor visualización de los datos de caracterización del hormigón H-25 con edad de 28 días y de los resultados obtenidos de los bancos de Santa Ana, Bella Vista y Sella, se recopilan los mismos en la Tabla III.57.

Tabla III.57.- Recopilación de datos de los diferentes bancos de material.

Característica	Banco Santa Ana	Banco Bella Vista	Banco Sella
Peso específico de la arena [g/cm ³]	2,52	2,54	2,58
Peso específico de la grava [g/cm ³]	2,68	2,68	2,73
Absorción de humedad de la arena [%]	1,65	1,96	2,12
Absorción de humedad de la grava [%]	1,66	1,09	1,61
Humedad de la arena [%]	7,19	2,11	8,13
Humedad de la grava [%]	2,07	1,42	2,06
Tamaño máximo nominal [plg]	¾	¾	1
Peso de arena para dosificación [%]	28,82	35,03	31,19
Peso de grava para dosificación [%]	46,12	38,32	44,67
Peso de agregados para dosificación [%]	74,94	73,35	75,86
Resistencia a compresión promedio [N/mm ²]	25,85	25,79	25,49
Módulo de elasticidad promedio [N/mm ²]	26.430,22	28.008,91	26.386,20

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, aunque no todos los datos característicos de los bancos de material son iguales, la mayoría de estos son bastante similares o cercanos entre sí.

Para determinar qué tan variados son los datos de módulo de elasticidad a compresión obtenidos de los tres bancos de material, se calcula el coeficiente de variación utilizando los valores promedio de los bancos. Si este valor es superior al 20% significa que los datos tienen alta variabilidad. Esta verificación se muestra en la Tabla III.58.

Tabla III.58.- Verificación de la variabilidad del módulo de elasticidad con datos promedio.

<i>Banco de material</i>	<i>Módulo de elasticidad (N/mm²)</i>
Santa Ana	26.430,22
Bella Vista	28.008,91
Sella	26.386,20
Media	26.941,78
Desviación Estándar	924,43
Coeficiente de variación.	3,43%

Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, se optó por realizar una verificación utilizando todos los datos individuales, como se observa en la Tabla III.59, la cual nos da un valor de 7,38%.

En ambas tablas, el coeficiente de variación es menor al 20%, por lo que puede decirse que no cumple la hipótesis propuesta y que la caracterización que poseen los agregados de los bancos de Santa Ana, Bella Vista y Sella no son lo suficientemente influyentes como para generar una variabilidad alta en el módulo de elasticidad a compresión del hormigón H-25 con edad de 28 días.

Tabla III.59.- Verificación de variabilidad con los datos obtenidos de todos los bancos.

<i>Módulo de elasticidad (N/mm²)</i>		
<i>Banco Santa Ana</i>	<i>Banco Bella Vista</i>	<i>Banco Sella</i>
29.218,86	25.904,05	25.293,58
26.182,90	25.164,52	24.347,01
23.838,54	27.751,96	23.898,69
24.606,56	31.418,75	26.289,82
27.293,01	28.193,81	29.814,42
26.181,61	28.917,99	28.469,80
28.213,41	27.914,65	27.285,93
29.986,58	29.748,44	24.804,02
28.211,54	28.074,36	25.735,04
24.436,05	29.645,92	28.338,19
25.471,12	26.382,85	23.285,53
24.144,16	26.305,02	26.803,60
24.632,58	30.253,94	28.347,43
26.785,61	26.302,94	25.250,12
27.250,83	28.154,51	27.829,86
29.218,86	25.904,05	25.293,58
26.182,90	25.164,52	24.347,01
23.838,54	27.751,96	23.898,69
Media	26.941,78	
Desviación Estándar	1.988,55	
Coefficiente de variación.	7,38%	

Fuente: Elaboración propia.

III.7.5. Ecuación de módulo de elasticidad a compresión obtenida a partir de los datos obtenidos.

De los datos obtenidos en este trabajo de investigación del módulo de elasticidad a compresión, es posible obtener una ecuación que permita determinar datos aproximados del módulo de elasticidad a compresión del hormigón H-25 con 28 días de edad que se encuentre conformado por agregados del Valle Central de Tarija. En la presente investigación, se propone dos ecuaciones para determinar este módulo de elasticidad a compresión.

La primera ecuación propuesta (3.7) se obtiene mediante el método de regresión potencial la cual consiste en encontrar los valores “A” y “B” para una ecuación tipo “ $Y=A \cdot X^B$ ” utilizando los valores del módulo de elasticidad a compresión y la resistencia a

compresión del hormigón obtenidos de los ensayos de laboratorio. En la ecuación “Y” es el módulo de elasticidad a compresión y “X” la resistencia a compresión. Se puede observar en detalle el desarrollo de esta ecuación en el *Anexo A.11. Determinación de la ecuación del módulo de elasticidad a compresión mediante regresión potencial.*

$$E = 17.809 * (f'c)^{0,1267} \quad (3.7)$$

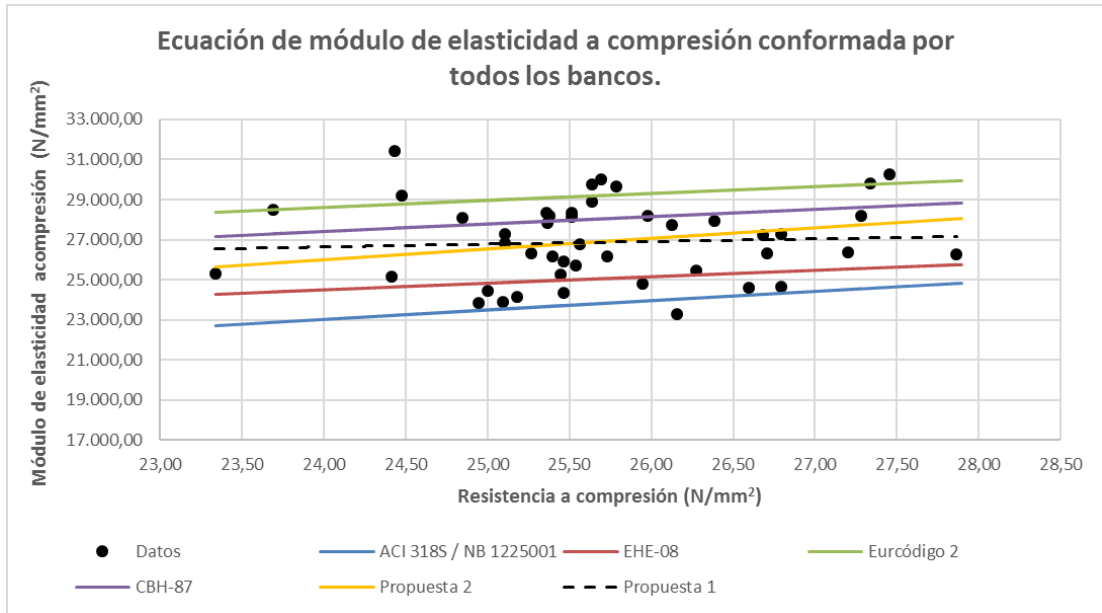
La segunda ecuación propuesta (3.8) se obtiene determinando el valor de un coeficiente “k” para una ecuación tipo “ $E=k*(f'c)^{1/2}$ ”, similar a las ecuaciones de las normativas utilizadas y cuyo método de obtención es igual al utilizado en el análisis con la normativa mexicana en el punto III.7.3. Se utilizan como datos la media aritmética del módulo de elasticidad a compresión (26.941,78 N/mm²), y la resistencia a la compresión (25,71 N/mm²) de todos los datos obtenidos.

$$k = \frac{26.941,78}{\sqrt{25,71}} = 5.313,42$$

$$E = 5.313,42 * \sqrt{f'c} \quad (3.8)$$

Para comparar las ecuaciones obtenidas en este punto con la de las normativas utilizadas en esta investigación, se tiene la Figura III.15 donde se trazan todas estas junto a todos los datos obtenidos.

Figura III.15.- Gráfico de ecuaciones de módulo de elasticidad obtenidas de los datos de todos los bancos.



Fuente: Elaboración propia.

IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

IV.1. Conclusiones.

- Luego de realizar los ensayos de laboratorio y los cálculos correspondientes, se obtuvo para el banco de Santa Ana un valor promedio del módulo de elasticidad a compresión del hormigón con una edad de 28 días de 26.430 N/mm^2 , mientras que para el banco de Bella Vista el valor es 28.008 N/mm^2 y finalmente el banco de Sella posee un valor de 26.386 N/mm^2 . Además de esto, se debe indicar que el coeficiente de variación para estos tres bancos es de 7,28%, 6,35% y 7,32% para los bancos de Santa Ana, Bella Vista y Sella, respectivamente, por lo que la variación de los resultados obtenidos es prácticamente igual en todos los bancos.
- De acuerdo a análisis estadístico de t de Student, el valor de la media poblacional del módulo de elasticidad a compresión del hormigón H-25 para el banco de Santa Ana es de $26.430,22 \pm 1.065,75 \text{ N/mm}^2$, para el banco de Bella Vista el valor es de $28.008,91 \pm 985,33 \text{ N/mm}^2$ y en el caso del banco de Sella se obtiene $26.386,20 \pm 1.069,43 \text{ N/mm}^2$.
- De acuerdo a los ensayos de laboratorio, los valores del peso específico y la absorción de la humedad para los agregados fino y grueso de todos los bancos de material utilizados para la realización de esta investigación tienen valores similares. Por lo tanto, estos parámetros no llegan a afectar el valor del módulo de elasticidad del hormigón obtenido de los ensayos de laboratorio en esta investigación.
- Teniendo en cuenta que los tipos de roca más predominantes en los tres bancos de material son la cuarcita, arenisca, lutita y limolita, y que los valores de módulo de elasticidad a compresión del hormigón H-25 con edad de 28 días obtenidos de estos bancos se encuentran dentro del rango de los valores de la caliza según la gráfica de agregados más utilizados en el punto EHE-08, la cual es superior a los valores de arenisca e inferior a los de la cuarcita en dicha tabla, se puede decir que, aunque el tipo de roca influye en el módulo de elasticidad a compresión del hormigón de manera general, no llega a afectar de manera significativa en los valores obtenidos en esta investigación.

- Para el peso unitario del agregado grueso, el banco de Bella Vista tiene un valor menor al del resto de los bancos, por lo que, de acuerdo a la dosificación obtenida mediante ACI-211, la cantidad de agregado grueso a utilizar en el desarrollo de las probetas del banco de Bella Vista, al igual que la proporción de este material con respecto a la cantidad de hormigón en peso obtenida, es menor al de los bancos de Santa Ana y Sella. A su vez, el banco de Bella Vista tiene la mayor cantidad necesaria y la mayor proporción de agregado fino para la elaboración de las probetas de hormigón.

Para la realización del hormigón H-25, la proporción obtenida de los agregados fino y grueso en conjunto es la misma en todos los bancos de material. Complementando con lo mencionado en el párrafo anterior, es apropiado indicar que la proporción de arena en la mezcla de hormigón influye en el módulo de elasticidad a compresión.

- De acuerdo al análisis gráfico del banco de Santa Ana y del banco de Sella, observando el promedio de los valores y utilizando la línea de tendencia potencial y la ecuación propuesta por la norma mexicana, el valor módulo de elasticidad a compresión de ambos bancos supera al valor obtenido por las ecuaciones de la norma estadounidense ACI 318S, la normativa boliviana en desarrollo NB 1225001 y la instrucción española EHE-08, quedando por debajo de la norma boliviana CBH-87 y el Eurocódigo 2.

En el caso del banco de Bella Vista, el módulo tiene un valor superior al de las normativas ACI 318S, NB 1225001 y EHE-08, y coincide con el valor propuesto por CBH-87.

De manera general, es apropiado indicar que todos los bancos superan los valores con la norma estadounidense, la norma boliviana NB y la instrucción española, pero se encuentran por debajo de los de la norma europea y de la norma boliviana CBH, y que el valor del módulo de elasticidad a compresión del hormigón H-25 utilizando agregados del Valle Central de Tarija es más aproximado a esta última.

IV.2. Recomendaciones.

- Debido a que los valores promedio del módulo de elasticidad de los ensayos son más próximos a los resultados obtenidos de la norma CBH-87, es apropiado utilizar la ecuación propuesta por esta normativa para cálculos empíricos, sea para un pre-diseño de una obra o una investigación que requiera utilizar este parámetro al utilizar hormigón H-25 compuesto con agregados del Valle Central de Tarija.
- Es recomendable que el uso del hormigón simple conformado por agregados de estos bancos de material se enfoque en estructuras que no tengan que soportar altos niveles de esfuerzo a compresión, debido a que, si el material posee un módulo de elasticidad bajo, posee mayor facilidad para deformarse. Sin embargo, el hormigón puede utilizarse en conjunto con acero, aditivos y/o cementos especiales que incrementan la resistencia, para brindar la rigidez requerida al hormigón.
- Para incrementar el módulo de elasticidad que se puede obtener en el hormigón, se puede realizar un método de curado en el que se mantenga la humedad en el hormigón, esto debido a que se reducen las posibilidades de que se generen grietas en este material al ser colocadas ante esfuerzos a compresión que cuando está seco. Esto es adecuado para épocas calurosas.
- En caso de utilizar alguna ecuación de norma que utilice un coeficiente de corrección según el tipo de árido, para calcular de manera más acertada el módulo de elasticidad a compresión del hormigón, utilizando agregados del Valle Central de Tarija, se recomienda determinar la mayor proporción del tipo de roca en el agregado con ayuda de un geólogo o un mineralogista, y aplicar el coeficiente de corrección correspondiente para ese tipo de árido, en caso contrario o si el tipo de árido no posea un coeficiente de corrección, utilizar el coeficiente igual a uno.
- Se debe tener en cuenta que las ecuaciones propuestas no consideran la corrección por tipo de árido, debido a que las mismas se obtienen de valores de módulo de elasticidad a compresión del hormigón H-25 para una edad de 28 días, que no varían significativamente entre sí. Por ello, si se desea realizar una investigación para aplicar un coeficiente de corrección por tipo de árido a estas ecuaciones, es apropiado utilizar agregados donde predomine el tipo de árido que se pretende analizar.