

1. GENERALIDADES

1.1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, los avances de la tecnología del concreto, ya son parte de la vida integral de las sociedades desarrolladas y no desarrolladas; por tal razón, la investigación se vuelve un medio innegable para el desarrollo de los pueblos, que sin lugar a dudas, con mayor o menor grado de investigación se enriquece cada vez más la tecnología de uno de los materiales de mayor consumo en la construcción de pavimentos rígidos.

El diseño, implementación y construcción de estructuras de pavimentos rígidos es una alternativa de pavimentación económica y técnica en las obras de infraestructura vial para vías de segundo y tercer orden. Sin embargo, a pesar de esta consideración, estas obras han sufrido inconvenientes y fallas que han generado una disminución considerable en su efectividad y durabilidad, generando como consecuencia una incomodidad en los usuarios que utilizan estos corredores, ya que el mantenimiento en estas vías restringe su uso.

Tal afirmación, ha llevado a buscar nuevas alternativas en lo que se refiere a los materiales que componen el concreto con el fin de mejorar sus propiedades físico-mecánicas. Esto implica que las exigencias respecto al concreto, sean cada vez mayores, por lo que es común encontrar dentro de la literatura, términos como hormigones de altas prestaciones, alto comportamiento, alto desempeño, alto rendimiento, durabilidad, aditivos, adiciones, etc. Por lo que muchos autores ya no conciben el concepto actual de concreto hidráulico sin el término aditivos y/o adiciones.

Sin embargo, el costo del m³ de concreto con aditivos y/o adiciones, difiere al de los hormigones normales o convencionales, razón por la cual en este estudio se propone el análisis de incidencia en el comportamiento de la resistencia del Concreto de un material abundante, de bajo costo y alternativo a las adiciones minerales tradicionales como lo es la ceniza de caña de azúcar.

1.1.1. CONCEPTOS BÁSICOS

Partiendo desde la necesidad que se requiere de la aclaración de algunos conceptos que tienden a crear alguna confusión al tener cierta similitud, es que se dará a continuación algunos conceptos básicos que son necesarios:

- **Abrasión.-** Proceso de desgaste producido en una superficie por pérdidas de material causadas por agentes externos.
- **Absorción de Agua.-** Masa de agua necesaria para llevar un material pétreo del estado seco al estado saturado superficialmente seco. Se expresa como porcentaje referido a la masa del pétreo seco.
- **Adiciones (hormigón).-** Materiales, además del cemento, agua y áridos, que se añaden al hormigón o mortero inmediatamente antes o durante el mezclado. Su objetivo es modificar, acentuar o conferir alguna propiedad que de por sí la mezcla no posee y hacerla temporal o permanente durante su estado fresco o endurecido.
- **Agregado Pétreo.-** Árido compuesto de partículas duras, de forma y tamaño estables.
- **Agua de Amasado.-** Agua utilizada para hidratar el cemento en la confección de un hormigón o mortero y que debe cumplir requisitos químicos básicos en cuanto a pH, sólidos en suspensión, sólidos disueltos y materias orgánicas.
- **Agua Libre (hormigón).-** Agua utilizada para otorgar trabajabilidad a la mezcla de hormigón fresco.
- **Alargamiento de una Partícula.-** Es la relación entre el largo y el ancho de una partícula de suelo.
- **Árido.-** Material pétreo compuesto de partículas duras, de forma y tamaño estables.
- **Árido Fino.-** Árido que pasa por el tamiz de abertura nominal 5 mm (hormigón) es retenido en el de 0,08 mm.
- **Árido Grueso.-** Árido retenido en el tamiz de abertura nominal 5 mm cuando se emplea en hormigón.

- **Asentamiento del Hormigón.-** Descenso del cono que experimenta una muestra de hormigón fresco ensayada de acuerdo con el Método H0304, y que se utiliza como indicador de la docilidad.
- **Calor de Hidratación.-** Cantidad de calor liberado durante el proceso exotérmico de reacción del cemento con el agua.
- **Capa de Rodadura.-** Capa superficial de un camino que recibe directamente la acción del tránsito. Debe ser resistente al deslizamiento, a la abrasión y a la desintegración por efectos ambientales.
- **Cemento Portland.-** Producto obtenido de la pulverización de clinker, mezclado con sulfato de calcio (yeso) finamente molido. Tiene la propiedad de fraguar por hidratación y obtener gran dureza.
- **Compactación (hormigón).-** Operación mecanizada para dar al hormigón la homogeneidad y densidad convenientes.
- **Cono de Abrams.-** Molde tronco-cónico, recto, metálico, abierto por ambos extremos, utilizado en el método para determinar la docilidad (trabajabilidad) del hormigón.
- **Cuarteo.-** Procedimiento empleado para reducir el tamaño original de una muestra de suelo o agregado pétreo, cuyo objetivo es obtener una muestra representativa del material y de un tamaño acorde a los requerimientos del ensayo a realizar.
- **Densidad (hormigones).-** Cociente entre la masa del hormigón y su volumen, a una temperatura determinada. Se expresa normalmente en kg/m^3 .
- **Densidad Aparente (Hormigones).-** Densidad que se calcula considerando el volumen aparente de mezcla (volumen real de la mezcla más el volumen de aire arrastrado o incorporado a ella). Corresponde a la capacidad de la medida que lo contiene.
- **Densidad Aparente (Densidad a Granel o Densidad Bruta).-** Densidad que considera el volumen macizo de las partículas de un pétreo más el volumen de los poros y de los huecos. Corresponde a la capacidad de la medida que lo contiene.
- **Densidad Aparente Compactada.-** Densidad aparente del pétreo compactado en la medida que lo contiene, según procedimientos normalizados.

- **Densidad Aparente Suelta.-** Densidad aparente del pétreo vaciado en la medida que lo contiene, según procedimientos normalizados.
- **Densidad Neta.-** Densidad en que se considera el volumen macizo de las partículas de material pétreo más el volumen de los poros inaccesibles.
- **Densidad Real.-** Densidad en que se considera el volumen macizo de las partículas de material pétreo, más el volumen de los poros accesibles e inaccesibles de esas partículas.
- **Densidad Real Saturada Superficialmente Seca.-** Densidad real en que se considera la masa del pétreo seco más la masa del agua que llena los poros accesibles.
- **Densidad Real Seca.-** Densidad real en que se considera solamente la masa del pétreo seco.
- **Docilidad o Trabajabilidad (hormigón fresco).-** Propiedad del hormigón fresco que se manifiesta por la facilidad para ser transportado, colocado y compactado, sin producir segregación.
- **Equivalente de Arena.-** Porcentaje de arena propiamente tal con respecto al total de arena y de impurezas coloidales floculadas, particularmente arcillosas, húmicas y eventualmente ferruginosas, presentes en un pétreo fino (bajo tamiz 5 mm).
- **Exudación (hormigón).-** Fenómeno que se produce durante la colocación del hormigón por sedimentación de las partículas sólidas debido a la acción de la fuerza de gravedad y de la vibración, desplazando el agua hacia la superficie.
- **Fisura (hormigones).-** Quiebre o rotura que afecta a las losas del pavimento, de variados orígenes, y cuyo ancho superficial es igual o menor que 3 mm.
- **Flexo-tracción.-** Ensayo a que se somete una probeta de hormigón endurecido, para determinar su resistencia a la tracción por flexión.
- **Fraguado (Hormigón).-** Proceso exotérmico en el cual la pasta acuosa de un conglomerante adquiere trabazón, consistencia y endurecimiento, merced a las modificaciones físico-químicas que tienen lugar entre el conglomerado y el agua.
- **Granulometría de un Árido.-** Distribución porcentual en masa de los distintos tamaños de partículas que constituyen un árido, determinada de acuerdo con la norma ASTM.

- **Hormigón de Prueba.-** Hormigón preparado en laboratorio, destinado a verificar principalmente el cumplimiento de los requisitos de densidad y resistencia exigidos en la obra.
- **Hormigón Endurecido.-** Para los efectos de muestreo debe considerarse como endurecido el hormigón que no cumple con la definición de hormigón fresco.
- **Hormigón Fresco.-** Aquel que ha terminado su proceso de mezclado y aún no ha sido colocado, sin sobrepasar un tiempo de dos horas para los cementos de grado corriente y una hora para los cementos de alta resistencia. El tiempo señalado se mide desde el comienzo del amasado.
- **Humedad.-** Cociente entre la masa de agua presente en un suelo y su masa seca. Se expresa en porcentaje.
- **Índice de Lajas.-** Porcentaje en peso de partículas que tienen un espesor (dimensión mínima) inferior a 0,6 veces la dimensión media de la fracción de agregado considerada.
- **Módulo de Finura.-** Uno de los índices que sirven para clasificar los agregados en función de su granulometría.
- **Muestra de Laboratorio.-** Cantidad mínima de material necesario para realizar los ensayos de laboratorio requeridos.
- **Pavimento Rígido.-** Estructura conformada por losas de hormigón de cemento hidráulico.
- **Poros.-** Espacios vacíos interiores de una partícula de pétreo.
- **Probeta de Hormigón.-** Muestra de hormigón endurecido de dimensiones predeterminadas y conservadas en condiciones preestablecidas, para posteriormente ser sometida a ensayos.
- **Razón Agua-Cemento.-** Cociente entre la cantidad de agua de amasado y la dosis de cemento, utilizados en la confección de un hormigón.
- **Resistencia Mecánica (hormigón).-** Resistencia a la ruptura de probetas de hormigón endurecido.
- **Retracción (hormigón).-** Variación del volumen del hormigón por efecto del fraguado, por su desecación y su humedecimiento. Esta variación se produce en parte antes de fraguar y en parte en el hormigón fraguado y ya endurecido.

- **Segregación (hormigón).**- Separación de la fracción gruesa del mortero durante el transporte o colocación del hormigón fresco.
- **Tamaño Máximo Absoluto de un Árido.**- Corresponde a la abertura del menor tamiz que deja pasar el 100% de la masa del árido.
- **Tamaño Máximo Nominal de un Árido.**- Corresponde a la abertura del tamiz inmediatamente menor al Tamaño Máximo Absoluto, cuando por dicho tamiz pasa el 90% o más de la masa del árido. Cuando pasa menos del 90%, el Tamaño Máximo Nominal se considera igual al Tamaño Máximo Absoluto.
- **Tamizado.**- Operación que consiste en separar por tamaño las partículas de un agregado, mediante tamices.
- **Textura (pavimentos).**- El aspecto o característica de la superficie del pavimento que depende del tamaño, forma, disposición y distribución del árido y del agente ligante.

1.1.2. JUSTIFICACIÓN.

Por razones ecológicas y económicas que puede proporcionar el aprovechamiento de la ceniza de caña de azúcar del Ingenio Azucarero de Bermejo (I.A.B.S.A.), se ha investigado el uso de este subproducto puzolánico y cementante como adición sólida mineral en el concreto hidráulico en sustitución parcial del cemento portland, sin comprometer las características esenciales del funcionamiento del concreto, logrando mejoras considerables en la resistencia última y en la impermeabilidad, siendo especialmente efectiva en incrementar la resistencia a flexo-tracción del concreto y representando un ahorro directo en el costo de materiales.

La ceniza de caña de azúcar, es un material resultante de la combustión del bagazo de caña de azúcar dentro de grandes hornos generadores de calor ya es utilizado como combustible de bajo costo por del ingenio para la obtención del azúcar.

La ceniza es considerada por la industria azucarera, como material de desecho la cual genera problemas de transporte y de disposición final. El costo energético para su producción es igual a cero KJ/Kg de ceniza, ya que es formada por sí sola, producto de la combustión. Su producción es variable, se estima entre 40 a 50 toneladas diarias en tiempo de zafra (135 días por año aproximadamente).

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GENERAL.

Analizar empíricamente el comportamiento del concreto, combinado con diferentes porcentajes de ceniza de caña de azúcar, con el fin de cuantificar y comparar sus propiedades físicas y mecánicas respecto a las de un concreto patrón, de tal manera se pueda definir el posible espectro de aplicación en obras civiles.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Establecer un estado de conocimiento básico de la investigación realizada, en base de un hormigón prueba (hormigón preparado en laboratorio, destinado a verificar principalmente el cumplimiento de los requisitos de densidad y resistencia exigidos en obra).
- Establecer criterios técnicos orientados en el trabajo de investigación planteado.
- Caracterización física y mecánica de áridos y cemento empleados para pavimento rígido.
- Caracterización física y química de la ceniza de caña de azúcar.
- Elaboración de 10 probetas y 10 bloques de concreto simple para la muestra patrón.
- Elaboración de 10 probetas y 10 bloques de concreto simple con adición de 2, 4, 6, y 15% de ceniza en peso cementante.
- Caracterizar y fundamentar los cambios en las propiedades físicas y mecánicas del concreto cuando se adiciona ceniza de caña de azúcar como adición mineral sólida.

1.3. ALCANCE

El alcance de esta investigación, engloba conceptos básicos y parámetros de comparación, recopilados de diferentes libros, normas y experiencias reportadas por otros países sobre el tema.

Los ensayos aquí realizados, están orientados de manera objetiva a comparar las características presentes en un concreto patrón diseñado para pavimento rígido y un

concreto elaborado con diferentes porcentajes de ceniza de caña de azúcar. Estas comparaciones fueron realizadas, tanto al concreto en estado fresco (apariencia, consistencia, exudación, densidad, asentamiento y aire atrapado naturalmente), como al concreto en estado endurecido (densidad, resistencia a compresión y resistencia a flexo tracción); en función a parámetros presentados por normas vigentes dentro de nuestro medio.

Los resultados están presentados en diagramas de barras y en dos ábacos finales, para su mejor entendimiento y posible aplicación en el futuro.

2. FUNDAMENTO TEÓRICO.

INTRODUCCIÓN

El pavimento rígido es una estructura construida por el hombre para que la circulación de los vehículos sea fácil, cómoda y segura, con el interés de mejorar la calidad de vida de los habitantes considerando que es fácil de construir y muy durable; consta básicamente de una losa de concreto colocada sobre una capa de material seleccionado llamada sub- base.

El concreto de la losa es el material que soporta el peso de los vehículos, la acción del sol y la acción de la lluvia, por tanto debe ser resistente y durable; si bien las losas son estructuras rígidas, una vez fisuradas tienden a deteriorarse con facilidad reduciendo de esta manera la serviciabilidad y vida útil pavimento.

El concreto posee una serie de características que lo mantienen como el material estructural más utilizado en el mundo; sin embargo, presenta algunas limitaciones, como ser la baja capacidad de deformación antes de la rotura y la baja resistencia a fuerzas de flexión.

2.1. GENERALIDADES

El concreto es una masa heterogénea constituida básicamente por agregados pétreos, cemento portland, agua, aire y algunas veces aditivos y/o adiciones, que una vez endurecida tiene la característica de resistir esfuerzos mecánicos en especial los de compresión.

Los agregados o áridos, constituyen el material llenante; están compuestos por una parte fina y por otra gruesa. El agregado fino comúnmente se lo conoce como arena y al agregado grueso como grava o piedra triturada. La diferencia entre arena y grava se ha establecido en forma conveniente y arbitraria tomando como base su tamaño. En general la arena, es aquella cuyo diámetro es inferior a 5mm., mientras que la grava es aquella superior a 5mm.

El cemento portland es el pegante o ligante hidráulico, es decir, el material que en determinadas condiciones es capaz de endurecer con el transcurso del tiempo, uniendo a otros materiales heterogéneos (agregado grueso y fino). En particular el cemento portland se endurece al ponerlo en contacto con el agua (proceso de hidratación) lo que da lugar a una acción inicial de fraguado (reacción química), que a su término convierte la masa plástica de concreto fresco en una masa endurecida e indeformable.

2.2. FUNCIONES DE LOS COMPONENTES

2.2.1. FUNCIONES DE LA PASTA

Dentro de las funciones que cumple la pasta dentro del concreto están:

- En estado plástico sirve como lubricante dándole fluidez a la mezcla haciendo que sea más o menos trabajable.
- Desarrolla la resistencia con el tiempo durante períodos de fraguado y de endurecimiento que permite el transporte, colocación y moldeo del concreto en la obra.
- En estado sólido obtura los espacios dejados por los agregados disminuyendo de esta forma la permeabilidad.
- Presenta durabilidad ante factores agresivos como aguas y suelos sulfatados, etc.
- Es el aglomerante o pegante encargado de ligar los agregados formando una piedra artificial con gran resistencia a la compresión.

2.2.2. FUNCIONES DE LOS AGREGADOS

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

- Se utilizan como material de relleno para hacer mas económica la mezcla.
- Evitan que se forme grietas durante el proceso de fraguado de la pasta.
- Junto con la pasta endurecida permiten altas resistencias a los esfuerzos de compresión.

En un concreto correctamente elaborado, cada partícula de agregado, sin importar su tamaño, debe estar rodeada de pasta, y todos los espacios completamente llenos de ella.

2.3. VENTAJAS DEL CONCRETO

El concreto presenta una serie de ventajas que justifican su uso tan difundido, a continuación se mencionan algunas de las más importantes:

- Los materiales que se emplean en su fabricación son muy fáciles de encontrar y existen en todas las partes del mundo.
- Mejora su resistencia con el pasar del tiempo.
- Resiste diversas condiciones ambientales y tiene buena durabilidad (resistente al desgaste por roce de neumáticos en las carreteras, a los cambios de temperatura, etc.)
- Es resistente al fuego (por lo menos hasta 400°C) y al envejecimiento.
- Es más económico, comparado con el asfalto.
- Se puede utilizar en cualquier tipo de obra de construcción, desde obras de arte (esculturas), pasando por estructuras para resistir cargas (pavimentos, presas, edificios, etc.) y no estructurales (adornos arquitectónicos y otros).
- Por su plasticidad inicial permite obtener una buena superficie de acabado.

2.4. CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO

El concreto para pavimento rígido es diseñado con la finalidad de que presente características bien definidas en sus dos estados fundamentales: Fresco y Endurecido.

2.4.1. CONCRETO FRESCO

El concreto fresco se refiere básicamente a la humedad de mezcla para que esta pueda ser manejada, transportada, colocada y consolidada por medios adecuados, sin demasiados esfuerzos, y sin que se produzca segregación o exudación.

La segregación, consiste en la separación de las partículas gruesas de agregado de las más finas por falta de cohesividad, haciendo que la distribución de la masa de concreto deje de ser uniforme.

Las principales *causas de segregación* son la diferencia en tamaño de las partículas, la densidad de los constituyentes de la mezcla y una mala gradación de los agregados. Asimismo, pueden influir otros factores como un mal mezclado, un inadecuado sistema de transporte, una colocación deficiente y un exceso de vibración en la compactación.

La Exudación, o algunas veces llamada sangrado del concreto, se presenta cuando una parte del agua de mezclado tiende a elevarse en la superficie del concreto recién

colocado o durante el proceso de fraguado. Esto es debido a que los constituyentes sólidos de la mezcla no pueden retener toda el agua cuando se asientan durante el proceso de fraguado.

La exudación de la mezcla trae *consecuencias nocivas*. Por un lado, parte superior de una porción del concreto se vuelve demasiado húmeda por lo que conlleva a que la estructura se vuelva porosa, débil o poco durable. Por otra parte, si la evaporación del agua en la superficie del concreto es más rápido que la velocidad de exudación, se producen grietas plásticas de contracción.

2.4.2. CONCRETO ENDURECIDO

El concreto en estado endurecido toma aspecto y características de roca artificial, que son aprovechadas para el uso del pavimento rígido. Estas propiedades son, la resistencia a los esfuerzos mecánicos, durabilidad impermeabilidad, densidad acabado y estabilidad volumétrica.

2.4.2.1. Resistencia

La resistencia es la capacidad que tiene el concreto para soportar esfuerzos de diferentes tipos y magnitudes. La resistencia a los esfuerzos mecánicos incluye principalmente lo que se refiere a compresión, flexo-tracción y adherencia al acero de refuerzo. De las mencionadas, la resistencia a la compresión simple es la característica más importante y normalmente con ella se define la calidad del concreto; aunque por lo general el control del concreto se realiza mediante ensayos de rotura a compresión y flexo-tracción siendo este último el ensayo más apropiado para mostrar con mayor exactitud las condiciones de trabajo del concreto dentro del pavimento rígido.

En conclusión, el concreto es un material relativamente débil a los esfuerzos de tracción comparado con su resistencia a la compresión.

2.4.2.2. Durabilidad

La durabilidad es la propiedad del concreto de soportar aquellas exposiciones que pueden privarlo de su capacidad de servicio tales como ciclos de congelamiento y deshielo, sustancias químicas, ciclos de humedecimiento y secado, ciclos de

calentamiento y enfriamiento, y otras semejantes como expansiones producidas por agregados que reaccionan químicamente con el cemento, suelos y aguas agresivas, etc. La resistencia a algunas de ellas puede fomentarse con el uso de aditivos inclusores de aire, cementos portland con puzolana, cementos resistentes a los sulfatos y otras adiciones sólidas especiales. La utilización de relaciones agua/cemento bajas constituye en aspecto importante para conservar la vida útil del concreto puesto que reduce la penetración de líquidos agresivos.

2.4.2.3. Densidad

La densidad o peso volumétrico constituye también una característica importante en el concreto, siendo algunas veces indispensable para la estabilidad de la estructura. Tal es el caso de puentes elevadizos, presas de gravedad, etc.

2.4.2.4. Acabado

Gracias a la manejabilidad de la mezcla en estado fresco, el concreto puede obtener un acabado en superficie lisa, apta para la circulación del flujo vehicular.

2.5. ELABORACIÓN DEL CONCRETO

La elaboración del concreto es un proceso que requiere de una técnica adecuada para lograr los resultados esperados. Para hacer un concreto malo (que con frecuencia es una sustancia con consistencia de sopa que al endurecer se convierte en una masa porosa y no homogénea) no hay sino que mezclar cemento, agua y agregados. Paradójicamente, los ingredientes de un buen concreto son los mismos, la diferencia está únicamente en aplicar conocimientos prácticos que involucren toda una tecnología. En general, los factores y procesos que constituyen la elaboración del concreto de calidad se resume en la tabla 2.1.

TABLA 2.1.
FACTORES Y PROCESOS EN LA ELABORACIÓN DE UN BUEN CONCRETO.

Selección de materiales	Control de producción	Propiedades deseadas	Costo
– Clase (Materiales). – Cantidad (Dosificación). – Uniformidad.	– Dosificación, mezcla – Transporte, manejo. – Colocación. – Compactación. – Curado, pruebas de control e inspección.	– Trabajabilidad. – Uniformidad. – Resistencia. – Durabilidad. – Impermeabilidad.	– Materiales. – Labor. – Equipo.

Fuente: Tecnología del hormigón Ing. Civil Vitervo O'Reilly.

2.6. CLASIFICACIÓN DEL CONCRETO

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

2.6.1. POR CONSISTENCIA

La Consistencia es una medida indirecta de la trabajabilidad de una mezcla de concreto y se mide por medio del ensayo de asentamiento. De acuerdo con esto, el concreto puede clasificar por su trabajabilidad tal como se muestra en la tabla 2.2.

TABLA 2.2.
CLASIFICACIÓN DEL CONCRETO POR SU CONSISTENCIA.

Asentamiento (cm.)	Consistencia (tipo de concreto)	Grado de trabajabilidad	Tipo de estructura y condiciones de colocación.
0.0 – 2.0	Muy Seca.	Muy pequeño.	Vigas o pilotes de alta resistencia con vibradores de encofrados.
2.0 – 3.5	Seca.	Pequeño.	Pavimentos vibrados y contruidos con maquina extrusoras.
3.5 – 5.0	Semi – seca.	Pequeño.	Construcción en masas voluminosas, losas medianamente reforzadas con vibración. Fundaciones en concreto simple. Pavimentos con vibradores normales.
5.0 – 10.0	Media.	Medio.	Losas medianamente reforzadas y pavimentos, compactados con maquinas vibradoras. Columnas, vigas, fundaciones y muros, con vibración.
10.0 – 15.0	Húmeda.	Alto.	Secciones con mucho refuerzo. Trabajos donde la colocación sea difícil. Revestimiento de túneles. No recomendable para compactarlo demasiado.

Fuente: Tecnología del hormigón Ing. Civil Vitervo O'Reilly.

2.6.2. POR RESISTENCIA

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

TABLA 2.3.

CLASIFICACIÓN DEL CONCRETO POR SU RESISTENCIA A COMPRESIÓN NB- 011.

Clase de concreto simple.	Resistencia a compresión a los 28 días.
PP	≥ 40 MPa (400 kg/cm ²)
P1	≥ 35 MPa (350 kg/cm ²)
P	≥ 30 MPa (300 kg/cm ²)
AA	≥ 28 MPa (280 kg/cm ²)
A	≥ 21 MPa (210 kg/cm ²)
B	≥ 18 MPa (180 kg/cm ²)
C	≥ 16 MPa (160 kg/cm ²)
D	≥ 13 MPa (130 kg/cm ²)
E	≥ 11 MPa (110 kg/cm ²)

*Fuente: Administradora Boliviana de Carreteras.***TABLA 2.4.**

CLASIFICACIÓN POR SU RESISTENCIA A COMPRESIÓN “GENERAL O INTERNACIONAL”

Clase de concreto	Resistencia a compresión a los 28 días.
Normal	140 a 350 (kgf/cm ²).
De Alta Resistencia	350 a 1000 (kgf/cm ²).
De Ultra Alta Resistencia	> 1000 (kgf/cm ²).

*Fuente: Tecnología del hormigón Ing. Civil Vitervo O'Reilly.***TABLA 2.5.**

CLASIFICACIÓN RESISTENCIA A COMPRESIÓN “SERVICIO NACIONAL DE CAMINOS”

Clase de concreto	Resistencia a compresión a los 28 días.
H° 400	400 (kgf/cm ²).
H° 350	350 (kgf/cm ²).
Tipo A	210 (kgf/cm ²).
Tipo B	180 (kgf/cm ²).
Tipo C	160 (kgf/cm ²).
Tipo D	130 (kgf/cm ²).
Tipo E	110 (kgf/cm ²).

Fuente: Servicio Nacional de Caminos.

TABLA 2.6.

CLASIFICACIÓN “ORDENANZA GENERAL DE URBANISMO Y CONSTRUCCIÓN INN - NCH 170”

Clase de concreto	Resistencia a compresión a los 28 días.
H 5	50 (kgf/cm ²).
H 10	100 (kgf/cm ²).
H 15	150 (kgf/cm ²).
H 20	200 (kgf/cm ²).
H 25	250 (kgf/cm ²).
H 30	300 (kgf/cm ²).
H 35	350 (kgf/cm ²).
H 40	400 (kgf/cm ²).
H 45	450 (kgf/cm ²).
H 50	500 (kgf/cm ²).

Fuente: Ordenanza General de Urbanismo y Construcción INN - NCh 170.

Desde el punto de vista de la resistencia a flexo-tracción a los 28 días:

TABLA 2.7.

CLASIFICACIÓN “ORDENANZA GENERAL DE URBANISMO Y CONSTRUCCIÓN INN - NCH 170”

Clase de concreto	Resistencia a flexo-tracción a los 28 días.
H 3	50 (kgf/cm ²).
H 3.5	100 (kgf/cm ²).
H 4	150 (kgf/cm ²).
H 4.5	200 (kgf/cm ²).
H 5	250 (kgf/cm ²).
H 5.5	300 (kgf/cm ²).
H 6	350 (kgf/cm ²).

*Fuente: Ordenanza General de Urbanismo y Construcción INN - NCh 170.***2.6.3. POR PESO UNITARIO**

Por el peso unitario o también llamado peso por unidad de volumen del concreto se clasifica en:

TABLA 2.8.

CLASIFICACIÓN DEL CONCRETO POR SU PESO UNITARIO.

Clase de concreto	Peso Unitario
De Peso Liviano	< 2000 (kgf/m ³)
De Peso Normal	2000 a 2600 (kgf/m ³)
De Peso Pesado	> 2600 (kgf/m ³)

Fuente: Tecnología del hormigón Ing. Civil Vitervo O'Reilly.

2.7. CEMENTO PORTLAND

GENERALIDADES

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

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

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

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

Se puede lograr diversos tipos de cemento al efectuar algunas variantes en su composición química; de ahí que se puedan conseguir concretos con características específicas para obras determinadas. Sin embargo, sea cual sea el tipo de cemento utilizado, es recomendable llevar un control estricto en sus propiedades para asegurar uniformidad en la producción del concreto.

2.7.1. MATERIAS PRIMAS Y FABRICACIÓN

El cemento está compuesto por dos materias primas principales: Materiales calizos y materiales arcillosos. Los primeros suministran cal y los segundos sílice y alúmina; además de estos materiales, el cemento contiene pequeñas cantidades de óxido de hierro, óxido de magnesio, álcalis y anhídrido sulfúrico.

El cemento se obtiene a partir de materias primas abundantes en la naturaleza, pero como es difícil encontrar las calizas con la cantidad precisa de arcilla la industria

recurre a la dosificación artificial de estos insumos en proporciones determinadas, utilizando para ello dos procesos, por vía seca y por vía húmeda.

El proceso utilizado depende fundamentalmente de los factores físicos y económicos. Los físicos se refieren al estado de las materias primas, como por ejemplo la humedad de la arcilla, calidad de la caliza, etc.; los económicos se basan principalmente en la mayor o menor cantidad de combustible consumido en las operaciones de elaboración.

El proceso de producción del cemento se inicia con la extracción de la piedra caliza y la arcilla de depósitos o canteras naturales, que dependiendo de la dureza o cohesión que presenten los materiales y de la disposición de los mismos, imponen diferentes sistemas de explotación desde sencillos taladros manuales hasta complicados sistemas de perforación y voladura.

El material así extraído se carga y transporta por medio de pesada maquinaria de cantera hasta la planta. En ocasiones, especialmente en zonas de topografía quebrada, se utiliza transporte por medio de cables aéreos; en algunas plantas de proceso húmedo el transporte se hace por tuberías, las cuales reciben el nombre de pastoductos, (obviamente su utilización hace necesario efectuar en la cantera algunos procesos de trituración y/o molienda, y la adición de agua).

El proceso de fabricación propiamente dicho se inicia con la trituración. La materia prima que viene de las canteras en trozos con tamaños que alcanzan los 50 centímetros y aun 1 metro, es reducida en su trituración en dos o tres etapas, según sus características y tamaño, hasta trozos cuyo tamaño máximo este entre 5 y 10 milímetros. Se efectúa, entonces, la pre-mezcla de las materias primas (calizas y arcillas) con miras a que el cemento que habrá de resultar este acorde con estrictas normas de calidad y tenga la composición adecuada.

La mezcla efectuada en los depósitos de materia prima triturada se lleva, generalmente por transportadores de banda, a los molinos de crudo que son grandes cilindros giratorios donde por medio de bolas metálicas, se continúa la reducción de tamaño, iniciada en las trituradoras, hasta diámetros del orden de $\frac{1}{2}$ milímetro. La trituración y la molienda de las materias primas pueden efectuarse, también en una

sola etapa, empleando molinos verticales que por medio de grandes rodillos realizan la reducción del tamaño en una sola operación. Esta es la etapa donde se establece la primera gran diferencia entre los principales sistemas de producción de cemento: El proceso húmedo y el proceso seco.

En el proceso húmedo la molienda de las materias primas ya dosificadas se efectúa con adición de agua al molino, por lo que el material resultante de los molinos es un lodo, lo que recibe el nombre de pasta, y que debe ser manejado por tubería y homogenizado (como etapa posterior del proceso) en grandes tanques llamados balsas, en los cuales mediante agitación mecánica se impide la sedimentación.

En la vía seca la dosificación va antecedida del secado de los materiales y la molienda se efectúa sin adición de agua, con lo cual el material que sale de los molinos es un polvo que se denomina harina, y que se deposita en los silos especiales en los cuales se homogeniza por medio de agitación con aire.

La homogenización pretende que las partículas se distribuyan en la masa buscando una composición uniforme posible del material que pasara al horno.

En el caso del proceso húmedo, sin embargo, el agua que había sido agregada, al menos parcialmente, antes de pasar a la siguiente etapa del proceso; para tal fin la pasta se deja sedimentar en grandes tanques (espesadores) y el agua se retira por la parte superior. En ocasiones, este lodo aun contiene un exceso de agua, por lo que se debe efectuar un proceso adicional de filtración.

La mezcla de las materias primas procede de los silos de homogenización en el proceso seco o de balsas; en el húmedo esta lista para pasar a la etapa de calcinación.

Esta es la fase más importante del proceso seco pues es allí donde ocurren las transformaciones fundamentales que dan origen al cemento y a las propiedades de conglomerante hidráulico.

La calcinación se efectúa en hornos rotatorios inclinados, que son grandes cilindros de acero, con diámetros entre 3 y 5 metros y una longitud que en ocasiones llega a ser superior a 150 metros, que giran lentamente alrededor de su eje y están recubiertos interiormente de material refractario. En estos hornos la pasta (o harina) se deposita

en el extremo superior y desciende lentamente, pasando sucesivamente por zonas de mayor temperatura, hasta llegar a la zona final donde se encuentra la llama, y donde alcanza la máxima temperatura, unos 1450°C, que se logra quemando algún combustible; en Colombia se utiliza básicamente carbón o gas natural, aunque se puede emplear fuel oil, petróleo crudo y aun materiales de desecho, como es el caso de llantas de automóviles o cascara de arroz, usados con gran éxito en algunos países.

En los hornos de proceso seco, (ya que nos es necesario eliminar el agua en exceso que se tiene en el proceso húmedo), se emplea el aire caliente que sale del horno para iniciar el calentamiento de las materias primas. Esto se realiza en grandes torres llamadas pre calentadores, lo cual se reduce notablemente el consumo energético que constituye uno de los mayores costos en la producción del cemento.

En la parte final del horno se produce la fusión de varios de los componentes y se forman gránulos de 1 a 3 centímetros de diámetro, que constituyen lo que se conoce como clinker. Ya en los últimos metros del horno, detrás de la llama, el clinker empieza a perder temperatura, iniciándose la etapa de enfriamiento, proceso que se acelera con equipos especiales de diferente tipo. Además de los enfriadores de parrilla se utilizan los enfriadores tipo planetario constituidos por grandes tubos acoplados al horno y por los cuales circula el clinker.

Para poder utilizar el cemento en todo su poder conglomerante es necesario que se encuentre en forma de polvo fino, pues solo así puede efectuarse de forma eficiente la hidratación de sus partículas. Esta finura se obtiene por la molienda de clinker en molinos especiales que naturalmente trabajan en seco. En esta etapa se efectúa la adición de pequeños porcentajes de yeso, con el fin de controlar el tiempo de fraguado (endurecimiento) del cemento resultante. En los cementos portland con puzolana se adiciona en esta etapa la puzolana.

Se tiene entonces, que según el tipo de cantidad de materiales adicionados, puede recibir diferentes denominaciones y ofrecer una amplia gama de propiedades para distintos usos en la construcción.

2.7.2 COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL CEMENTO

Las materias primas usadas en la manufactura del cemento portland (cal, sílice, alúmina y óxido de hierro), interactúan en el horno hasta alcanzar un estado de equilibrio químico para formar una serie de productos más complejos. Dichos productos se mencionan en la tabla 2.9.

TABLA 2.9.
COMPUESTOS DEL CEMENTO PORTLAND

Compuesto	Fórmula Química	Abreviatura Usada
Silicato Tricálcico.	3CaOSiO_2	C_3S
Silicato Dicálcico.	2CaOSiO_2	C_2S
Aluminato Tricálcico.	$2\text{CaOAl}_2\text{O}_3$	C_3A
Ferro Aluminato Tetracálcico.	$4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$	CA_4F

Fuente: Tecnología del hormigón Ing. Civil Vitervo O'Reilly.

Generalmente la fórmula química de estos constituyentes se usa en la forma abreviada con el único fin de facilitar su expresión y no utilizar un término complicado.

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

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

La contribución de la resistencia del C_2S toma lugar muy lentamente. Su acción endurecedora está comprendida entre los 7 y 28 días y puede continuar por 1 año.

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

El CA_4F cumple la función de catalizar y aportar poca resistencia al concreto.

2.7.3. TIPOS DE CEMENTO

Debido a la notable evolución de la industria del cemento se puede contar con diversos tipos. Generalmente el cemento portland se clasifica de acuerdo a la normalización del país de origen (en Bolivia se usa la Norma NB-011). Las Normas ASTM (American Society for Testing and Materials) de los Estados Unidos, clasifica 5 tipos de cementos enumerándolos del I al V. La diferencia de las propiedades de los diferentes tipos de cemento depende de la proporción relativa que ellos poseen de los cuatro componentes principales.

La Norma también se refiere a los cemento tipo I-A, II-A y III-A, que son exactamente los tipos I, II y III, excepto que durante el proceso de pulverización de clinker se le adiciona un material incorporador de aire. Estos cementos le dan al concreto una mayor durabilidad en especial a la acción del congelamiento y deshielo así como una mejor manejabilidad en estado plástico. También existe en cemento I-M que es el mismo tipo pero con resistencia superior.

2.7.4. PROPIEDADES DEL CEMENTO PORTLAND

2.7.4.1. Hidratación y calor de hidratación

En términos generales, cuando el cemento se encuentra en presencia del agua, se produce una reacción química en la cual el cemento desarrolla sus propiedades aglutinantes. En otras palabras, en presencia de agua, los compuestos del cemento (C_2S , C_3S , C_3A y C_4AF) se hidratan produciendo la pasta que con el paso del tiempo forma una masa y más tarde endurece dando origen a propiedades mecánicas útiles en aplicaciones estructurales.

Cuando un grano de cemento, cuyo diámetro promedio es de 50μ , entra en contacto con el agua, no lo hace totalmente sino que forma una película superficial que pese a su aumento con el peso de hidratación queda en el interior una parte sin reaccionar formando un núcleo inerte. La velocidad de hidratación disminuye continuamente y es de aproximadamente $3,5\mu$ en 28 días, esto significa que las partículas relativamente gruesas puedan durar varios años en hidratarse o no hidratarse nunca, generando de esta manera un rendimiento pequeño del cemento.

Cuando el agua y el cemento reaccionan, se genera calor de hidratación durante los procesos de fraguado y endurecimiento haciéndose importante en estructuras de considerable masa, debido a que si no se disipan rápidamente, puede ocurrir un incremento en la temperatura del concreto, produciéndose una rápida evaporación del agua y cambios volumétricos que llevan a la contracción del material y su eventual agrietamiento. Las secciones estructurales delgadas disipan el calor de hidratación difundiéndolo al ambiente; intercambio que se hace más difícil a medida que se engrosa la sección. La cantidad de calor generado durante los primeros 7 días para los diferentes tipos de cementos, expresados como porcentajes del total para el tipo I, se muestran en la tabla 2.10.

TABLA 2.10.

CANTIDADES APROXIMADAS DE CALOR GENERADO EN LOS 7 PRIMEROS DÍAS.

Tipo de Cemento	Características	% De calor generado
I	Uso general.	100
II	Moderada resistencia a los sulfatos.	80 - 85
III	Desarrolla altas fuerzas iniciales.	40 - 60
IV	Desarrolla bajo calor de hidratación.	60 - 75
V	Desarrolla alta resistencia a los sulfatos.	

Fuente: Tecnología del hormigón Ing. Civil Vitervo O'Reilly.

2.7.4.2. Peso Específico

El peso específico o densidad del cemento es la relación entre la masa de una cantidad dada y el volumen absoluto que ocupa en esa masa. En el cemento portland puro, su valor varía entre 3,10 y 3,15 gr/cm³; en el cemento portland con adiciones suele estar entre 2,90 y 3,00 gr/cm³. El valor del peso específico, en realidad no indica la calidad de este, su valor es usado principalmente para el diseño de mezclas.

2.7.4.3. Superficie Específica o Finura

Esta es una de las propiedades más importantes del cemento, y se obtiene en la etapa de molienda. Como la hidratación comienza sobre la superficie de las partículas de cemento, el área superficial total del cemento representa el material susceptible de hidratación. De esta manera, la velocidad de hidratación, y por tanto la resistencia, dependerá del grado de finura de los granos.

Una gran finura de los granos de cemento implica un mayor costo; además de hidratarse con mayor rapidez por la exposición a la atmósfera.

La medida de la finura se expresa como el área superficial de las partículas contenidas en un grano de material y se mide en (cm^2/gr). Existen varios métodos para medirla que pueden ser directos o indirectos como se aprecia en la tabla 2.11:

TABLA 2.11.
MÉTODOS PARA MEDIR LA FINURA O SUPERFICIE ESPECÍFICA.

Tipo de método	Nombre del método	Norma ASTM
Directos	Tamizado.	C-266
	Tamizado.	C-294
Indirectos	Turbidímetro de Wagner.	C-597
	Permeabilímetro de Blaine.	C-33

Fuente: Tecnología del hormigón Ing. Civil Vitervo O'Reilly.

2.7.4.4. Consistencia Normal

El cemento al amasarse con agua, forma una pasta suave y plástica que posteriormente se torna rígida y endurece presentando aspecto pétreo, debido a las reacciones químicas que se verifican entre el cemento y el agua.

Dependiendo de la cantidad de agua que se le agregue, el cemento alcanza una determinada fluidez, que aumenta al incrementar la cantidad de agua. Esto quiere decir que abra una determinada fluidez para una cierta cantidad de agua, considerada como la consistencia normal.

La consistencia normal no es un parámetro directo que indique la calidad del cemento y por eso las normas no nos dan valores máximos ni mínimos. Sin embargo, se considera como un parámetro complementario de otros ensayos que si tienen relación directa con la calidad del cemento como en el caso de los tiempos de fraguado y la estabilidad de volumen, que se estudiarán más adelante.

La consistencia de una pasta de cemento se mide por medio del aparato de Vicat cuyo procedimiento está descrito en la Norma. Dicho ensayo consiste en preparar la pasta con 500 gr de cemento y una cantidad conocida de agua. La pasta se coloca en un molde, se pone el embolo en contacto con la superficie superior de la pasta y se suelta. Dependiendo de la consistencia de la pasta, la varilla penetra y si esta

penetración es de $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ después de 30 segundos de haber soltado el embolo, se considera que la pasta tiene consistencia normal.

El contenido de agua en una pasta normal se expresa como porcentaje en peso del cemento seco y usualmente varía entre 23 y 33%. Para cementos gruesos el contenido es menor y para cementos finos el contenido es mayor.

2.7.4.5. Tiempo de Fraguado

Cuando el cemento se mezcla con el agua, forma de esta manera la pasta, mantiene una plasticidad casi constante durante un tiempo, luego del cual la pasta cambia de estado fluido a estado rígido, que se conoce como fraguado. El lapso que transcurre desde el mezclado hasta dicho cambio constituye el tiempo de fraguado. Aunque durante el fraguado la pasta adquiere alguna resistencia, es conveniente diferenciar entre fraguado y endurecimiento, pues este último se refiere al aumento de resistencia de la pasta de cemento fraguado.

El tiempo de fraguado indica si la pasta esta o no sufriendo reacciones de hidratación normales, se considera en dos etapas elegidas en forma arbitraria: Fraguado inicial y fraguado final.

Fraguado Inicial, se mide por el lapso entre el amasado y la pérdida parcial de plasticidad de la pasta, encontrándose el cemento parcialmente hidratado.

Fraguado Final, se caracteriza porque deja de ser deformable ante cargas relativamente pequeñas, con el cemento aun mas hidratado. A partir de este momento comienza el endurecimiento de la pasta, proceso que se considera indefinido, aunque para efectos de construcción se estime a los 28 días.

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

La medida de los tiempos de fraguado se hace por medio de la aguja de Vicat cuyo procedimiento se encuentra descrito en la Norma. El ensayo de Vicat consiste en hacer penetrar una aguja de 1mm de diámetro y 300 gr de peso sobre una pasta de consistencia normal a una profundidad de 25 mm, cuando esto ocurre se considera que se ha presentado el fraguado inicial; cuando la aguja solo deje una ligera huella

sobre la superficie de la pasta, sin que haya penetración, se dice que se ha presentado el fraguado final.

El tiempo de fraguado es importante porque da una idea del tiempo disponible para el mezclado, transporte, colocación, vibrado y afinado de concretos y morteros, la edad a la cual puedan soportar cargas, así como la de permitir tránsito sobre ellos y la ejecución del tratamiento de curado. El fraguado inicial debe presentarse a los 45 minutos como mínimo, y el final antes de las 10 horas.

2.7.4.6. Estabilidad de Volumen de Sanidad

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

Como se anotó anteriormente, durante el proceso de fraguado se incrementa la temperatura como consecuencia de las reacciones químicas que se efectúan entre los componentes del cemento y el agua. Este aumento de temperatura hace que una parte del agua se evapore y origine una contracción en la pasta como un eventual agrietamiento. La contracción lineal puede ser de aproximadamente 150×10^{-6} (0.015% en volumen) y generalmente se presenta los primeros 2 o 3 meses.

La expansión del cemento solo se manifiesta pasado varios meses o años. Cuando hay un cambio de volumen, bien sea por contracción o por expansión, se generan esfuerzos de tracción en la masa de concreto endurecida que suele conducir a una ruptura de la pasta ocasionando desde ligeros descascaramientos hasta el colapso de la estructura.

2.7.4.7. Resistencia

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

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

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

La resistencia a la compresión se mide por cubos de mortero estándar, de 5 cm de lado, curados de una manera estricta y usando arena normalizada. Es claro que la resistencia del cemento no puede ser usada para predecir la resistencia del concreto con alto grado de aproximación, debido a las muchas variables involucradas en la mezcla de concreto y los procesos de construcción.

El procedimiento para medir la resistencia de la tensión del cemento consiste en briquetas de mortero moldeadas de forma estándar y curada durante 24 horas. A estas briquetas se les aplica tensión directa a través de mordazas especiales colocadas en los extremos anchos.

El ensayo a flexión se hace sobre una vigueta prismática de sección cuadrada de 4cm de lado y 16cm de longitud. Las muestras son curadas hasta el momento del ensayo, que se lleva a cabo colocando la vigueta sobre cilindros de apoyo y aplicando la carga en el punto medio de la longitud de la muestra.

2.7.5. ALMACENAMIENTO DEL CEMENTO EN OBRA

El cemento no debe ser guardado sin usarse mucho tiempo, pues conforme avanza el tiempo va perdiendo resistencia; esto es válido para todos los tipos de cemento.

Para el caso de cementos en sacos, bien guardados en almacenes cerrados y sobre tablillas de madera, la pérdida de resistencia probable es en 3 meses 15%, y en 6 meses 25% y así aumenta sucesivamente.

En general, un límite apropiado de utilidad para el cemento en sacos es de 3 meses para cuando está en silos herméticos. Después del tiempo indicado es importante hacer pruebas antes de usarlo.

Los límites proporcionados son para el caso de cemento bien almacenado, para cemento a la intemperie los límites son mucho menores, sobre todo si el tiempo es

malo o lluvioso, en este caso puede inutilizarse en pocos días, si no se guarda convenientemente .

Para subsanar la pérdida de resistencia por almacenaje deberá incrementarse la dosificación en peso del cemento y mantener invariable la dosificación de los otros componentes de la mezcla.

2.7.6. CALIDAD DEL CEMENTO

Una vez descritas las principales propiedades del cemento es necesario que sus características numéricas se encuentren dentro de ciertos límites con el fin de asegurar un adecuado desempeño dentro de la masa de concreto.

De acuerdo a la Norma Boliviana NB 011-05 (IBNORCA) se tiene las siguientes especificaciones para la clasificación y composición de los cementos.

TABLA 2.12.
ESPECIFICACIONES DE CLASIFICACIÓN Y CALIDAD DEL CEMENTO

Tipos de Cemento		Proporción de masa %				
		Tipo	Componentes Principales			Componentes adicionales
Denominación	Designación		Clinker	Puzolana Natural	Filler Calizo	
Cementos Portland	Cemento Portland	I	95 a 100			0 a 5
	Cemento Portland con Puzolana	IP	70 a 94	6 a 30		0 a 5
	Cemento Portland con Filler calizo	IF	80 a 94		6 a 15	0 a 5
Cemento Puzolánico		P	60	40		0 a 50

Fuente: Norma Boliviana de Calidad IBNORCA.

La Norma Boliviana también distingue y clasifica a los cementos de acuerdo a su resistencia a compresión en:

TABLA 2.13.
ESPECIFICACIONES DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN

Categoría de resistencias	Resistencia a la compresión (MPa) (NB-470)		
	Mínima a 3 días	Mínima a 7 días	Mínima a 14 días
Alta	17	25	40
Media	---	17	30
Baja	---	15	25

Fuente: Norma Boliviana de Calidad IBNORCA

2.8. EL AGUA

GENERALIDADES

Dentro de los procesos de mezclado y curado, el agua reviste vital importancia para obtener las mejores propiedades en el concreto.

En primer lugar, se presentan las generalidades sobre las diferentes formas como el agua participa en el concreto. Luego, separadamente para el agua de mezclado y de curado se analiza su función y las características que deben tener para que no alteren las propiedades del concreto, especialmente su resistencia y el tiempo de fraguado.

Por último, se resumen algunos valores que se recomiendan como máximos para que las sustancias dañinas presentes en el agua no afecten al concreto.

2.8.1. EL AGUA EN EL CONCRETO

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

2.8.2. FUNCIÓN Y CARACTERÍSTICA DEL AGUA DE MEZCLADO

El agua de mezclado es aquella que se le agrega al cemento para formar la pasta. Tiene como funciones hidratar al cemento y proporcionar una fluidez a la mezcla tal que, con una lubricación adecuada de los agregados, se obtenga la manejabilidad del concreto deseada cuando este se encuentre en el estado fresco.

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

En general, se puede afirmar que cualquier agua natural que sea apta para el consumo humano y no tenga sabor u olor fuerte, pueden ser usadas para la elaboración del concreto, sin que esto implique que el agua adecuada para la elaboración de concreto sea potable. Algunos valores máximos admisibles de las sustancias existentes en el agua a utilizarse en la preparación del concreto son mencionados en la tabla 2.14:

TABLA 2.14.

VALORES MÁXIMOS RECOMENDADOS DE CONCENTRACIONES DE IMPUREZAS EN EL AGUA DE MEZCLADO.

Tipo de Impureza	Valor Máximo Recomendado
Cloruros	300 ppm
Sulfatos	300 ppm
Sales de magnesio	150 ppm
Sales Solubles	1500 ppm
P.H.	6 - 8
Sólidos en suspensión	1500 ppm
Materia Orgánica	10 ppm

Fuente: Tecnología del hormigón Ing. Civil Vitervo O'Reilly.

2.8.3. FUNCIÓN Y CARACTERÍSTICA DEL AGUA DE CURADO

En el proceso de hidratación la partícula de cemento no se hidrata totalmente sino que a medida que entra en contacto con el agua, se va formando una película superficial quedando en el interior una porción sin reaccionar y por tanto inerte. Para que este

núcleo reaccione es necesario lograr un abastecimiento adicional de agua durante las etapas tempranas de endurecimiento después del proceso de fraguado y lograr así que el cemento desarrolle todo su potencial aglutinante. A dicho suministro de agua se llama proceso de curado del concreto, y a la utilización para tal fin, agua de curado.

Los requerimientos para el agua de curado son menos exigentes que aquellos usualmente utilizados para el agua de mezclado, principalmente porque el agua de curado está en contacto con el concreto por un periodo de tiempo relativamente corto. Por lo general el agua que se considera buena para el mezclado también lo es para el curado, pero se debe tener cuidado con aquellas aguas que fluyen lentamente sobre el concreto y se evaporan rápidamente y además contienen materia orgánica o ferrosa porque pueden causar manchas en la superficie del concreto.

2.9. AGREGADOS

GENERALIDADES

Los agregados son una masa de materiales casi siempre pétreos, que se consideran originalmente inertes y que unidos por medio de la pasta de cemento conforman la masa del concreto. Sin embargo los agregados no son realmente inertes y sus propiedades físicas, químicas, mecánicas y térmicas influyen sobre el comportamiento del concreto.

Las propiedades como una buena distribución de tamaños de las partículas, forma y textura superficial apropiada; granos poco porosos, resistentes y duros, que no contengan sustancias químicas que reaccionen con la pasta de cemento, libres de limo, arcilla, materia orgánica, partículas débiles, etc., son indispensables para que puedan ser utilizados en el concreto, y de allí la importancia de sus control de calidad. La importancia de los agregados también radica en que constituyen alrededor del 60 a 80% del volumen total del concreto.

Los agregados naturales se clasifican en:

- a) Agregados finos (arena fina, media y gruesa).
- b) Agregados Gruesos (Grava y Piedra).

2.9.1. AGREGADO FINO

Se considera como agregado fino a la arena o a la piedra natural finamente triturada, de dimensiones reducidas y que pasan el tamiz 9.5 mm ($\frac{3}{8}$ ") y que cumple con los límites establecidos en la Norma ASTM.

Las arenas, provienen de la desintegración natural de rocas y son arrastradas por corrientes aéreas o fluviales llegándose a acumular en lugares determinados.

2.9.1.1. Requisitos de uso

- El agregado fino será arena natural. Sus partículas serán limpias, de perfil preferentemente angular, duro, compacto y resistente.
- El agregado fino deberá estar libre cantidades perjudiciales de polvo, terrones, partículas escamosas o blandas, esquistos, pizarras, álcalis, materia orgánica u otras sustancias perjudiciales.
- Debe cumplir las normas sobre su granulometría.
- Se recomienda que las sustancias perjudiciales no excedan los porcentajes máximos mostrados en la tabla 2.15:

TABLA 2.15.

CANTIDAD DE SUSTANCIAS PERJUDICIALES PERMISIBLES EN EL AGREGADO FINO.

Características	Clase A % en peso	Clase B % en peso	Norma ASTM
Partículas desmenuzables y terrones de arcilla	$\leq 3.0\%$	$\leq 3.0\%$	C 142 -78
Carbón y lignito	$\leq 0.25\%$	$\leq 1.0\%$	C 142 -78
Finos que pasan la malla N° 200			
• En concreto sujeto a abrasión.	$\leq 2.0\%$	$\leq 4.0\%$	C 117-90
• En otras clases de concreto.	$\leq 3.0\%$	$\leq 5.0\%$	C 117-90
Sustancias Perjudiciales	$\leq 1.0\%$	$\leq 1.0\%$	

Fuente: Manual Centroamericano para la Construcción de Carreteras y Cuentas Regionales

2.9.1.2. Granulometría (Límites Según la Norma ASTM).

La granulometría es la distribución por tamaños de las partículas de arena, la que se determina por separación con una serie de mallas normalizadas. Las mallas utilizadas para el agregado fino son: N°4, 8, 16, 30, 50 y 100.

Los requerimientos en cuanto a granulometría que debe cumplir la arena de acuerdo a la Norma ASTM C-33 se muestra en la tabla 2.16:

TABLA 2.16.
GRANULOMETRÍA PARA AGREGADO FINO. NORMA ASTM C-33

Malla N°		% Pasa	
$\frac{3}{8}"$	9.5 mm	100	
N°4	4.75 mm	95	100
N°8	2.36 mm	80	100
N°16	1.18 mm	50	85
N°30	600 μ	25	60
N°50	300 μ	10	30
N°100	150 μ	2	10

***Fuente:** Tecnología del hormigón Ing. Civil Vitervo O'Reilly.*

La Norma ASTM, exceptúa los concretos preparados con más de 300 kg/m³ de cemento los porcentajes requeridos para el material que pasa las mallas N°50 y N°100 que en este caso pueden reducirse a 5% y 0% respectivamente.

Esta excepción se explica porque el mayor contenido de cemento contribuye a la plasticidad del concreto y la compacidad de la pasta, función que cumple el agregado más fino.

Además, la Norma prescribe que la diferencia entre el contenido que pasa una malla y el retenido en la siguiente, no debe ser mayor al 45% del total de la muestra. De esta manera se tiene una granulometría más regular.

Por otra parte, se debe permitir el paso de más de un 15% del material por el tamiz 300 μ (N°50) y más de un 3% por el tamiz 150 μ (N°100) para que las mezclas sean más manejables, cohesivas y presenten menos agua superficial.

2.9.2. AGREGADO GRUESO

Se define como agregado grueso al material retenido en el tamiz 4.75 mm (N°4) proveniente de la desintegración natural o mecánica de las rocas, y que cumple con los límites establecidos en la Norma ASTM.

El agregado grueso puede ser grava o piedra chancada.

2.9.2.1. Clasificación

a) Gravas, comúnmente llamadas “canto rodado”, es el conjunto de fragmentos pequeños de piedra, provenientes de la disgregación, natural de las rocas, por acción

del hielo y otros agentes atmosféricos, encontrándoseles corrientemente en canteras y lechos de ríos, depositados de forma natural.

Cada fragmento ha perdido sus aristas vivas y se presentan en forma más o menos redondeadas. Las gravas pesan de 1600 a 1700 kg/m³.

b) Piedra partida o chancada, se denomina así, al agregado grueso obtenido por trituración artificial de rocas o gravas. Como agregado grueso se puede usar cualquier clase de piedra partida siempre que sea limpia, dura y resistente.

Su función principal es la de dar volumen y aportar su propia resistencia. Los ensayos indican que la piedra chancada o partida da concretos ligeramente más resistentes que los hechos con piedra redonda. El peso de la piedra chancada se estima en 1450 a 1500 kg/m³.

2.9.2.2. Requisitos de uso

- El agregado grueso deberá estar conformado por partículas limpias, de perfil preferentemente angular o semi-angular, duras o compactas, resistentes y de textura preferentemente rugosa.
- Las partículas deben de estar libres de tierra, polvo, limo, humos, escamas, materia orgánica, sales u otras sustancias dañinas.
- Se recomienda que las sustancias perjudiciales no excedan los porcentajes máximos mostrados en la tabla 2.17:

TABLA 2.17.

CANTIDAD DE SUSTANCIAS PERJUDICIALES PERMISIBLES EN EL AGREGADO GRUESO.

Clase	Partículas desmenuzables y terrones de arcilla	Carbón y lignito	Finos que pasan la malla N° 200	Desgaste de los Ángeles
A	2.0%	0.5%	1.0%	50.0%
B	3.0%	0.5%	1.0%	50.0%
C	5.0%	0.5%	1.0%	50.0%
D	5.0%	0.5%	1.0%	50.0%
E	10.0%	1.0%	1.0%	50.0%

Fuente: Manual Centroamericano para la Construcción de Carreteras y Puentes Regionales

Las clases A, B, C, D y E corresponden a los siguientes usos típicos:

Usos	Exposición a la intemperie	Clase
Concreto arquitectónico, puentes, otros usos en que irregularidades debidas al deterioro son objetables.	Severas. Moderadas. Despreciables.	A B C
Pavimento de concreto, capas de base, veredas, etc., en que irregularidades moderadas pueden tolerarse.	Severas. Moderadas. Despreciables.	B C D
Concreto recubierto no expuesto a la intemperie.		E

Fuente: Manual Centroamericano para la Construcción de Carreteras y Puentes Regionales

2.9.2.3. Granulometría (Límites Según La Norma ASTM).

El agregado grueso deberá estar graduado dentro de los límites establecidos en la norma ASTM C-33, los cuales están indicados en la tabla 2.18.:

TABLA 2.18.
GRANULOMETRÍA DEL AGREGADO GRUESO.

ASTM N°	Tamaño Nominal	% Pasa por los tamices normalizados												
		100mm 4"	90 mm 3½"	75 mm 3"	63 mm 2½"	50mm 2"	37.5mm 1½"	25mm 1"	19mm ¾"	12.5mm ½"	9.5mm ¾"	4.75mm N°4	2.36mm N°8	1.18mm N°16
1	90 a 37.5 mm 3½" a 1½"	100	90-100		25-60		0-15		0-5					
2	63 a 37.5 mm 2½" a 1½"			100	90-100	35-70	0-15		0-5					
3	50 a 25.0 mm 2" a 1"				100	90-100	35-70	0-15		0-5				
357	50 a 4.75 mm 2" a N°4				100	95-100		35-70		10-30		0-5		
4	37.5 a 19mm 1½" a ¾"					100	90-100	20-55	0-15		0-5			
467	37.5 a 4.75mm 1½" a N°4					100	95-100		35-70		10-30	0-5		
5	25 a 12.5 mm 1" a ½"						100	90-100	20-55	0-10	0-5			

56	25 a 9.5 mm 1" a ¾"						100	90-100	40-85	10-40	0-15	0-5		
57	25 a 4.75 mm 1" a N°4						100	95-100		25-60		0-10	0-5	
64	19 a 9.5 mm ¾" a ½"							100	90-100	20-55	0-15	0-5		
67	19 a 4.75 mm ¾" a N°4							100	90-100		20-55	0-10	0-5	
7	12.5 a 4.75mm ½" a N°4								100	90-100	40-70	0-15	0-5	
8	9.5 a 2.36mm ¾" a N°8									100	85-100	10-30	0-10	0-5

Fuente: Tecnología del hormigón Ing. Civil Vitervo O'Reilly

2.9.3. CARACTERÍSTICAS DE LOS AGREGADOS

2.9.3.1. Modulo de Finura (MF)

El modulo de finura es un parámetro que se obtiene de la suma de los porcentajes retenidos acumulados de la serie de tamices especificados que cumplan con la relación 1:2 desde el tamiz 149 μ (N°100) en adelante hasta el tamaño máximo presente y divididos por 100.

En América es más frecuente el uso del MF de la arena para evaluar qué tan fina o gruesa es una arena, pero también es muy empleado como parámetro para el diseño de mezclas. Se considera que el MF de una arena adecuada para producir concreto debe de estar entre 2.30 y 3.10, donde un valor menor que 2 indica una arena fina, 2.5 una arena de finura media y más de 3.0 una arena gruesa.

2.9.3.2. Tamaño Máximo (TM)

Se define como la abertura del menor tamiz por el cual pasa el 100% de la muestra. Como su nombre lo indica, es el tamaño de las partículas más grandes que hay dentro de la masa de agregados y que en algunos casos puede ser único.

2.9.3.3. Tamaño Máximo Nominal (TMN)

El tamaño máximo nominal es otro parámetro que se deriva del análisis granulométrico y está definido como el siguiente tamiz que le sigue a la abertura (mayor) a aquel cuyo porcentaje retenido acumulado es del 15% o más.

En muchos casos puede ser que el TM y el TMN no coincidan lo que resulta perfectamente lógico debido a que este último indica el promedio de las partículas más grandes en su fracción más gruesa, mientras que el TM tan solo da una idea de las partículas más grandes, que tan solo puede ser una.

Por esta razón la mayoría de las especificaciones granulométricas se dan en función del TMN y comúnmente se estipula de tal manera que el agregado cumpla con los siguientes requisitos:

- El TMN no debe ser mayor que $1/5$ de la dimensión menor de la estructura, comprendida entre lados de un encofrado.
- El TMN no debe ser mayor que $1/3$ del espesor de una losa.
- El TMN no debe ser mayor que $3/4$ del espaciamiento libre máximo entre las barras de refuerzo.

2.9.3.4. Forma y Textura Superficial

La forma y textura superficial de los agregados es otra propiedad física que influye en las características del concreto. En términos generales, las piedras naturales sometidas a un proceso de trituración, tiene formas que varían desde las aproximadamente cúbicas a las alargadas y aplanadas y de textura rugosa, mientras que los agregados de río tienen forma redondeada y textura lisa debido al proceso de arrastre a que han sido sometidas.

En cuanto a la forma de los agregados se puede afirmar que la ideal es la redondeada, desde el punto de vista del grado de acomodamiento, que es mejor que el de las partículas de forma cúbica además se ha demostrado que en 1m^3 de agregados redondeados sueltos pueden haber hasta un 25% más de material que en igual volumen de material de forma cúbica.

Por otro lado se debe tener cuidado con las partículas que además de ser planas son alargadas y que comúnmente se conocen con el nombre de “lajas”. Dichas partículas generalmente son muy débiles porque poseen una estructura laminar, tienden a colocarse en forma horizontal dentro de la masa de concreto y muchas veces impiden la salida del agua evaporable durante el proceso de fraguado, generando bolas de aire, lo que origina una disminución de la resistencia del concreto, especialmente a la flexión. En la Norma se define partícula larga y partícula aplanada de la siguiente manera:

- **Partícula Larga**, aquella cuya relación entre longitud (L) y ancho (b) es > que 1,50 es decir:

$$P . l a r g a \frac{L}{b} \geq 1,5$$

- **Partícula Plana**, aquella cuya relación entre espesor (e) y ancho (b) es < que 0,5 es decir:

$$P . p l a n a \frac{e}{b} \leq 0,5$$

La misma Norma especifica que el porcentaje de partículas de forma indeseable, partículas planas o partículas alargadas, no debe exceder el 50% de la masa total del agregado. Así mismo el porcentaje de lajas se limita a un máximo del 15%.

La textura superficial de los granos de agregado incide notablemente en la adherencia entre pasta de cemento y la superficie de los agregados. La trabazón que se presenta entre estos dos elementos generalmente se ve incrementada cuando la textura de las partículas cambia de lisa (y redondeada) a rugosa (y angular); dicho aumento en trabazón es un factor que se debe considerar en la selección de agregados para concretos en pavimentos, donde la resistencia a flexión es importante y también donde se requiere una alta resistencia a compresión.

Las partículas de textura rugosa y de forma angular o elongada requieren mayor cantidad de pasta y arena para lograr una trabajabilidad, dada que otras de forma redondeada y de textura lisa, debido a que a las primeras se les dificulta el deslizamiento de una sobre otras, siendo necesario suministrarles mayor cantidad de lubricante con lo que se hace más costosa la mezcla. Sin embargo, con una buena

gradación tanto los agregados triturados como los de río, dan aproximadamente las mismas resistencias para una misma relación agua/cemento, cuando se utiliza el mismo tipo de roca.

2.9.3.5. Densidad

La densidad es una propiedad física de los agregados y está definida como la relación entre peso y volumen de una masa determinada lo que significa que depende directamente de las características del grano del agregado.

Como generalmente las partículas de agregado tienen poros tanto saturables como no saturables, que dependiendo de su permeabilidad interna pueden estar vacíos, parcialmente saturados o totalmente llenos de agua, se genera una serie de estados de humedad a los que corresponde diferentes tipos de densidad, descritos en la Norma; la que más interesa en el diseño de mezclas es la densidad aparente que se define como la relación que existe entre el peso del material y el volumen que ocupan las partículas de ese material incluidos todos los poros (saturables y no saturables).

Este factor es importante para el diseño de mezclas porque con él se determina la cantidad de agregado requerido para un volumen unitario de concreto, debido a que los poros interiores de las partículas de agregado van a ocupar un volumen dentro de la masa de concreto y además porque el agua se aloja dentro de los poros saturables. El valor de la densidad varía normalmente entre 2,48 y 2,80 gr/cm³.

2.9.3.6. Porosidad

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

2.9.3.7. Absorción y Humedad de la Superficie

Las partículas de los agregados pueden pasar por cuatro estados de humedad:

a) Totalmente Seco, se logra mediante un secado al horno a 110°C hasta que los agregados tengan un peso constante (generalmente a las 24 horas).

b) Parcialmente Húmedo, se logra mediante exposición al aire libre.

c) Saturado o Superficialmente Seco (SSS), es un estado en que los agregados tienen todos sus poros llenos de agua pero superficialmente se encuentran secos. Este estado solo se logra en el laboratorio.

d) Totalmente Húmedo, todos los poros del agregado están llenos de agua y además existe agua libre superficial.

La capacidad de absorción se determina por medio de los procedimientos descritos en la Norma. Básicamente consiste en sumergir la muestra durante 24 horas luego de los cual se saca y se lleva a la condición SSS; obtenida esta condición , se pesa e inmediatamente se seca en un horno y la diferencia de pesos, expresado en porcentaje de peso de la muestra seca, es la capacidad de absorción.

2.9.3.8. Peso Unitario (PU)

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

$$P U = \frac{P}{V}$$

Donde:

P=Peso seco del material (kg).

V=Volumen del recipiente (m³).

El peso unitario es un factor que mide la aptitud del agregado para ser utilizado en producción del concreto, y se determina por medio del procedimiento dado en la Norma, su valor varía entre 1200 y 1750 kg/m³ para agregados naturales.

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

a) Peso Unitario Suelto (PUS), se denomina PUS cuando para determinarla se coloca el material seco suavemente en el recipiente hasta el punto de derrame y a continuación se nivela a ras pasando una regla metálica.

El concepto de PUS es importante cuando se trata de manejo, transporte y almacenamiento de los agregados debido a que estos se hacen en estado suelto.

b) Peso Unitario Compactado (PUC), se denomina PUC cuando los granos han sido sometidos a compactación incrementando así el grado de acomodamiento de las partículas de agregado y por lo tanto el valor de la masa unitaria.

El PUC es importante desde el punto de vista de diseño de la mezcla ya que con él se determina el volumen absoluto de los agregados por cuanto estos van a estar sometidos a una compactación durante el proceso de colocación del concreto.

2.9.3.9. Resistencia a la Abrasión

La resistencia a la abrasión, desgaste, o dureza de un agregado grueso, es una propiedad que depende principalmente de las características de la roca madre.

Esta propiedad se determina mediante el ensayo de la máquina de los Ángeles, consiste en un cilindro hueco de acero, con sus extremos cerrados y una abertura central que sirve para introducir la muestra, y puede girar en posición horizontal.

De la siguiente tabla en función del T.M.N. se escoge el método de ensayo a utilizar, peso de agregado y número de esferas para agregados gruesos hasta de 1½":

Método		A	B	C	D
Diámetro		Cantidad de Material a emplear			
Pasa el Tamiz	Retenido en Tamiz				
1½"	1"	1250±25			
1"	¾"	1250±25			
¾"	½"	1250±10	2500±10		
½"	⅜"	1250±10	2500±10		
⅜"	¼"			2500±10	
¼"	Nº4			2500±10	
Nº4	Nº8				5000±10
Peso Total		5000±10	5000±10	5000±10	5000±10
Nº de Esferas		12	11	8	6
Nº de Revoluciones		500	500	500	500

El ensayo consiste en introducir en el cilindro unas bolas de acero que funcionan como la carga abrasiva y se hace girar un determinado número de vueltas. Luego se separa la parte de la muestra que pasa por el tamiz 1.7mm ASTM.

Se determina el coeficiente de desgaste de los ángeles mediante la diferencia del peso original de la muestra y el peso después del ensayo expresado en porcentaje del peso inicial. Si el desgaste es mayor de 50% corresponden a agregados de muy mala calidad, no aptos para construcción de capas de firme. Por el contrario, desgastes inferiores a 20% corresponden a áridos excelentes, con resistencia al desgaste suficiente para cualquier posible aplicación y, en particular, para capas de rodadura de concreto que hayan de soportar tráfico pesado

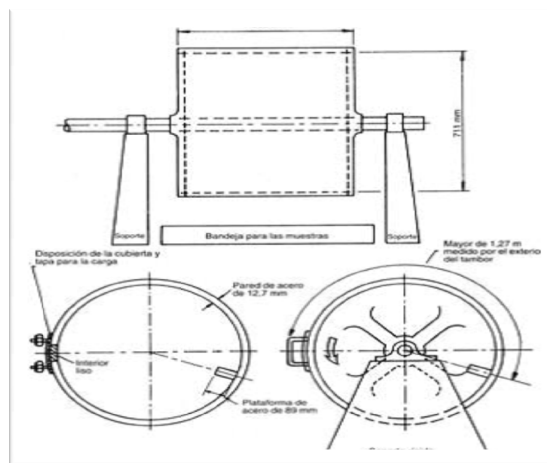


Figura 2.1. Máquina de Desgaste de los Ángeles.

2.9.3.10 Equivalente de Arena

Es la propiedad que permite evaluar la limpieza y plasticidad de los agregados finos.

Para determinar el equivalente de arena se utiliza un ensayo que consiste en introducir una muestra de agregado en una probeta que contiene una solución floculante, se mezcla el agregado con la solución y se añade agua, dejando reposar el conjunto durante 20 minutos. Después de este tiempo se puede observar el agregado limpio en la parte inferior, en la zona intermedia las partículas contaminantes en suspensión y en la superficie el líquido relativamente limpio. Con la relación de alturas de estas zonas se determina el equivalente de arena. Se define como agregado muy contaminado el que tiene un Equivalente de Arena menor de 20 y como agregado

limpio el que tiene un equivalente de arena mayor que 50, en el caso de concretos para pavimentos rígidos se recomienda usar equivalentes de arena mayores a 75%.

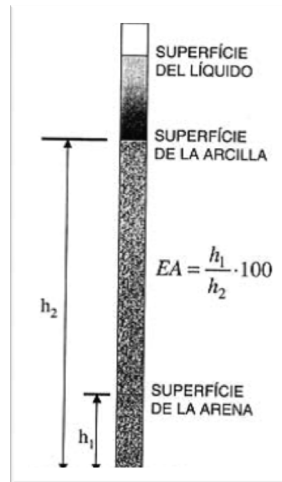


Figura 2.2. Equivalente de Arena.

2.9.3.11 Porcentaje de Partículas Lajeadas y Alargadas

La forma de las partículas de agregado grueso, afecta al esqueleto mineral, las formas pueden ser redondeadas, cúbicas, lascas o agujas, siendo estas dos últimas peligrosas, porque durante el proceso de compactación o por las tensiones del tráfico, se pueden romper y eso varía su contenido en la granulometría. Los métodos utilizados para la determinación de dichos índices de forma se basan generalmente en la medida directa de las dimensiones de las partículas.

Los ensayos se realizan por calibres de ranuras para determinar el índice de lajas y los calibres de las agujas para sacar el índice de agujas. Se hace pasar el retenido de cada tamiz por estos calibres y se expresa como resultado. El índice de lajas es el cociente entre lo que pasa por el calibre de ranuras y el total de muestra.

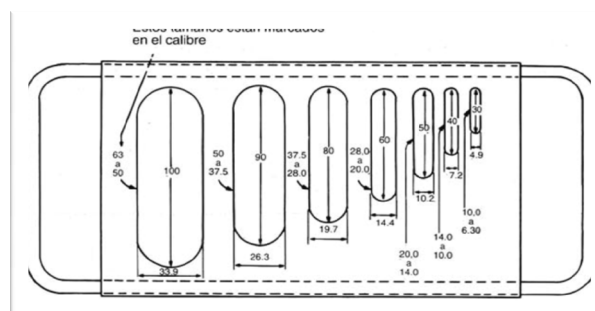


Figura 2.3. Calibre para la Determinación del Índice de Lajas.

El Índice de partículas alargadas es el cociente entre lo que retiene en el calibre de alargadas y el total de la muestra.

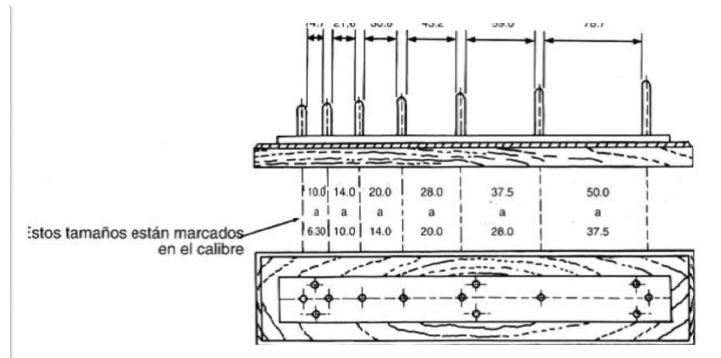


Figura 2.4. Calibre para la Determinación del Índice de Alargadas.

2.9.3.12. Forma y Caras de Fractura.

La forma de las partículas de mayor o menor angulosidad influye en la resistencia del esqueleto mineral. Para realizar este ensayo se determina el porcentaje de partículas con dos o más caras de fractura.

2.10. ADICIONES

Hoy en día la mayoría de las mezclas de concreto contienen adiciones al cemento que constituyen una porción del material cementante del concreto. Estos materiales son generalmente subproductos de otros procesos o materiales de origen natural. Ellos pueden o no ser procesados antes de ser utilizados en los concretos. Algunos de estos materiales son denominados puzolanas, que por sí mismos no tienen propiedades cementantes, pero cuando se utilizan con el cemento portland, reaccionan para formar componentes cementantes.

Para su uso en el concreto, las adiciones al cemento, algunas veces son referidos como adiciones minerales que necesitan cumplir los requerimientos de las normas establecidas; estas adiciones pueden ser utilizadas individualmente o en combinación en el concreto o también ser añadidas a la mezcla de concreto como un cemento que contenga la adición o como un ingrediente dosificado separadamente.

De acuerdo con la ASTM C-618 y el Comité ACI-211, la utilización de adiciones de tipo mineral, poseen muchas ventajas ecológicas y económicas en la elaboración de Concreto

hidráulico, ya que incrementan la resistencia y la impermeabilidad, con una cantidad menor de cemento portland. Dentro de dicho comité estos materiales se encuentran clasificados como adiciones minerales finamente divididos, los cuales son utilizados algunas veces en estado natural (crudos) o calcinados. Dentro de estos materiales se encuentra: cenizas volantes que provienen de centrales termoeléctricas, puzolanas artificiales (ceniza de cascarilla de arroz, ceniza de caña de azúcar), puzolanas naturales, escoria granulada de alto horno de industrias siderúrgicas y arenas de cuarzo, calcíticas y dolomíticas finamente molidas; algunos de estos materiales que se presentan de manera natural requieren calcinación para desarrollar actividad puzolanica útil.

La norma ASTM C-618 establece requerimientos de orden químico, de manera que los óxidos de sílice, aluminio y fierro deben ser iguales o mayores al 70% que el azufre expresado en SO_3 que debe ser como máximo 4% y, la pérdida por calcinación no mayor de un 10%.

Además se requiere cumplir con un índice de actividad resistente, por el cual una pasta de mortero con material cementoso constituido por 80% de cemento y 20% de puzolana debe ofrecer una resistencia por lo menos del 75% de la obtenida con el cemento patrón.

Estas adiciones minerales son ampliamente utilizadas para la elaboración de Concreto hidráulico en países como USA., Alemania, Japón, Francia, China, India, El Salvador y Ex-Repúblicas Soviéticas. Sin embargo la mayoría de países no cuentan con industrias que produzcan masivamente estos materiales, excepto las puzolanas naturales que las utilizan para fabricar cemento portland, y las cenizas volantes provenientes de la fabricación de cemento portland, que se utilizan para la fabricación de cementos portland mezclados.

2.10.1. CLASES DE ADICIONES

La ASTM 618 cuenta con clasificaciones separadas de adiciones minerales, estableciendo límites de fineza, requerimiento de agua, actividad puzolanica, sanidad y constituyentes químicos.

Con el objeto de describir detalladamente los importantes aditivos minerales, se los han dividido en dos grupos:

2.10.1.1. Materiales naturales.- Son aquellos que han sido procesados para el solo propósito de producir una puzolana. El procesamiento generalmente involucra el

triturado, molido y separación de tamaños, en algunos casos también puede incluir una actividad térmica.

Entre estos materiales se encuentran los vidrios volcánicos, turbas volcánicas, arcillas calcinadas o lutitas y tierra diatomácea.

2.10.1.2. Materiales de Subproductos.- Son aquellos materiales que no son los productos primarios de la industria que los produce. Los subproductos pueden requerir un procesamiento de secado o pulverización, antes de usarse como aditivos minerales.

Los principales subproductos adecuados para su uso como adiciones minerales en el concreto de cemento portland son las cenizas de combustión de carbón y algunos residuos de cosechas, el sílice volatizado de ciertas operaciones metalúrgicas y la escoria granulada tanto de industrias de metales ferrosos como no ferrosos.

La producción y las propiedades de los materiales importantes de subproductos se describen a continuación.

a. Cenizas Volantes

Son un subproducto de los hornos que emplean carbón mineral como combustible para la generación de energía y constituyen en si las partículas no combustibles removidas de las chimeneas de gases. Las cenizas volantes utilizadas en el concreto deben tener conformidad con las Norma ASTM C-618. La cantidad de ceniza volante en el concreto puede variar entre 5 y el 65% en peso de los materiales cementantes, según la fuente, la composición de la ceniza y el desempeño requerido del concreto.

1. Escorias Molidas de alto horno

Son subproductos no metálicos producidos en un alto horno cuando el mineral de hierro es reducido a hierro dulce, la escoria líquida es enfriada rápidamente para formar gránulos que son molidos hasta una finura similar a la del cemento portland. Las escorias molidas de alto horno utilizadas como material cementante deben tener conformidad con la Norma ASTM C-989, estas escorias tienen por sí mismas propiedades cementantes pero estas son mejoradas cuando se utilizan con cemento

portland. Las escorias se utilizan entre el 20 y el 70% en peso de los materiales cementantes.

a. Humo de Sílice

Es un material puzolánico de alta reactividad formado de un subproducto de la producción de metal silíceo o ferro silíceo. Se recolecta de la chimenea de gases de los hornos de arco eléctrico. El humo de sílice es un polvo extremadamente fino, con partículas alrededor de 100 veces más pequeñas que un grano promedio de cemento. Este material debe tener conformidad con la Norma ASTM C-1240. Generalmente se utiliza entre el 5 y 12% en peso de los materiales cementantes para las estructuras de concreto que necesitan alta resistencia o una permeabilidad significativamente reducida al agua.

i. Cenizas de Residuos Agrícolas.

Las cenizas de residuos agrícolas constituyen una de las experiencias más alentadoras en la búsqueda de materiales más sustentables ecológica y económicamente del cemento. Entre ellas se mencionan las siguientes:

- ***Ceniza de Cascara de Arroz.***- De los residuos agrícolas comunes, las cascara de arroz producen la ceniza de mayor cantidad, alrededor del 20% del peso, que también tiene el mayor contenido de sílice, alrededor del 93% del peso. Es su gran contenido de sílice lo que le da a la ceniza sus propiedades puzolánicas.

La ceniza de cascara de arroz puede reemplazar hasta 30% del cemento de un mortero o concreto.

- ***Ceniza de bagazo de caña de azúcar.***- El bagazo es obtenido durante la molienda de la caña de azúcar para la extracción del jugo, luego es sometido a un proceso de combustión (400 - 500°C) en hornos industriales para la producción de calor en el proceso de elaboración del azúcar; resultado de este proceso es una ceniza rica en sílice.

La ceniza reactiva es de color gris oscura a blanca, dependiendo del carbón residual en ella, que no tiene efecto negativo si es menor de 10%.

De acuerdo a estudios realizados por el Instituto Salvadoreño del Cemento y del Concreto (ISCYC) el año 2001, la ceniza de caña de azúcar puede ser empleada por lo general entre el 5% y el 15% en peso de material cementante.

Las propiedades de estas cenizas dependen de la composición química y la estructura interna. Se prefiere que su composición química tenga la presencia de los tres principales óxidos (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3) en un porcentaje mayor del 50%.

Sin embargo, sólo la sílice amorfa (no cristalina) posee estas propiedades, es por esta razón que la temperatura y duración de la combustión son importantes en la producción de la ceniza de bagazo de caña de azúcar.

La sílice amorfa se obtiene realizando una quema controlada en tiempo y temperatura (menor a 700°C) del bagazo. Una combustión sin control, generalmente a temperaturas mayores de 700°C , ocasiona la cristalización de la sílice, haciéndola menos reactiva.

Para mejorar la reactividad química, la ceniza es pulverizada en un molino de bolas por aproximadamente una hora, logrando un tamaño de partícula aproximada a $45\mu\text{m}$.

Las ventajas que ofrecen estos tipos de cenizas sobre el resto se detallan a continuación:

➤ **Mejoramiento a la trabajabilidad.-** La reducción de segregación y exudación con el uso de aditivos minerales es de gran importancia cuando el concreto se coloca por medio de bombeo. En cuanto más fina es una adición mineral, menor cantidad de la misma se necesitara para realizar la cohesión.

Puede notarse que aunque la adición mineral tiende a mejorar la cohesividad y la trabajabilidad del concreto fresco, muchos no poseen la capacidad reductora de agua de las cenizas volantes y de las escorias. Para una consistencia dada del concreto, el uso de materiales con muy alta área de superficie, tales como el humo de sílice condensado, la ceniza de cascara de arroz y la ceniza de caña de azúcar, tienden a incrementar el agua.

➤ **Durabilidad ante el agrietamiento térmico.-** Suponiendo que debido al calor de hidratación, la temperatura máxima en una estructura masiva se alcanza dentro de

una semana posterior a la colocación del concreto, el uso de una adición mineral ofrece la posibilidad de reducir el incremento de la temperatura en una relación casi directa con la cantidad de cemento portland sustituido por la adición. Esto es debido a que en condiciones normales, estas adiciones no reaccionan en un grado significativo durante varios días, lo que significa que el calor de hidratación producido en concretos con adiciones minerales es menor que el de un concreto normal.

- ***Durabilidad ante ataques químicos.-*** La reacción puzolánica que involucra aditivos minerales es capaz de un refinamiento de los poros la cual reduce la permeabilidad del concreto. Tanto estudios de laboratorio como de campo han mostrado mejoras considerables en la durabilidad química de los concretos que contienen adiciones minerales.
- ***Aumento en la resistencia a flexo-tracción.-*** La presencia de adiciones minerales sólidas en sustitución parcial de cemento generalmente retarda la adquisición de resistencia. La habilidad de una adición mineral para reaccionar a temperaturas normales con el hidróxido de calcio presente en la pasta de cemento portland hidratada, y para formar silicatos de calcio hidratados, puede conducir a una reducción significativa en la porosidad. Consecuentemente se puede lograr mejoras considerables en la resistencia última, especialmente en la resistencia a flexión.

El Instituto Salvadoreño del Cemento y del Concreto en un estudio realizado el año 2001 en el Salvador, en concretos con adición mineral de ceniza de caña de azúcar un 6%, obtuvo los siguientes parámetros químicos y de resistencia presentados en probetas y vigas de concreto prueba.

RESULTADOS MINERALOGICOS POR DIFRACCIÓN DE RAYOS X						
Nº	Descrip.	Minerales presentes	Composición química	%	Descripción macroscópica	Descripción Microscópica
1	Ceniza de Caña de Azúcar	Amortita Calcita. Cuarzo.	((CaNa) (AlSi) ₂ Si ₂ O ₈) CaCO ₃ SiO ₂	39 38 23	Muestra de color negro metálico y café en forma fibrosa, los materiales crudos (cafés) todavía se observan, tienen más largas las fibras, minerales blancos redondeados.	Pequeños cristales de silicatos, cuarzos y plagioclasas (Amortita) en forma angular, fibras cafés todavía se mantienen junto con los materiales finos. Fibras 75%, minerales 25%.

ENSAYOS ADICIONALES	RESULTADOS
POL (Azúcar).	0.00
Humedad.	3%
PH.	10.1

ENSAYO DE RESISTENCIA DEL CONCRETO A LA COMPRESIÓN									
Probeta Nº	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Peso (kg)	Peso Vol. (kg/m ³)	Edad (días)	Cono (Pulg.)	Carga (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)
C-1	15.2	30.3	181.1	12.768	2322.0	7	2	36700.0	202
C-2	15.2	30.2	181.46	12.680	2314.0	7	2	41607.0	229
C-3	15.3	30.6	183.85	12.704	2258.0	7	2	34350.0	187
C-4	15.2	30.5	181.46	12.732	2300.0	7	2	35200.0	194
C-5	15.3	30.6	183.85	12.790	2273.0	14	2	45395.0	247
C-6	15.3	30.6	183.85	12.768	2269.0	14	2	56430.0	307
C-7	15.5	30.5	188.69	12.798	2224.0	28	2	53170.0	282
C-8	15.3	30.5	183.85	12.721	2269.0	28	2	53170.0	289
C-9	15.5	30.3	188.69	12.710	2223.0	28	2	67957.0	360

Cilindros N° C-3, C-4 y C-7 corresponden a la mezcla patrón sin adiciones.

Cilindros N° C-1, C-5 y C-8 corresponden a la mezcla con 6% de adición de ceniza.

Cilindros N° C-2, C-6 y C-9 corresponden a la mezcla con 15% de adición de ceniza.

ENSAYO DE RESISTENCIA A FLEXO-TRACCIÓN DE VIGAS DE CONCRETO (CARGA APLICADA EN EL TERCIO MEDIO)									
Vigueta Nº	Alto Efectivo (cm)	Ancho Efectivo (cm)	Longitud Efectiva (cm)	Peso (kg)	Peso Vol. (kg/m ³)	Edad (días)	Cono (Pulg.)	Carga (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)
V-1	14.9	15.1	45.0	31.430	2328.0	7	2	2055.0	28
V-2	15.2	15.4	45.0	31.675	2278.0	7	2	2370.0	30
V-3	15.1	15.0	45.0	30.880	2268.0	7	2	2365.0	31
V-4	15.0	15.4	45.0	31.315	2237.0	7	2	2020.0	26
V-5	15.3	15.3	45.0	31.600	2242.0	14	2	2400.0	30
V-6	15.0	15.5	45.0	32.390	2314.0	14	2	2530.0	33
V-7	15.2	15.2	45.0	31.370	2286.0	28	2	2615.0	34
V-8	15.4	15.6	45.0	31.770	2186.0	28	2	2870.0	35
V-9	15.0	15.4	45.0	31.270	2245.0	28	2	3280.0	43

Vigas N° C-3, C-4 y C-7 corresponden a la mezcla patrón sin adiciones.

Vigas N° C-1, C-5 y C-8 corresponden a la mezcla con 6% de adición de ceniza.

Vigas N° C-2, C-6 y C-9 corresponden a la mezcla con 15% de adición de ceniza.

De acuerdo a este mismo contexto, países desarrollados han investigado las adiciones minerales reportadas por la ACI las cuales son muy abundantes en estos países y con costos energéticos muy bajos.

3. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES QUE COMPONEN LA MEZCLA DE CONCRETO

INTRODUCCIÓN

En base al Manual Técnico de Hormigón para el Diseño de Carreteras en Bolivia (realizado por la Administradora Boliviana de Carreteras) y a la Norma ACI 211; se tomaron en cuenta los procedimientos y especificaciones técnicas que ellos recomiendan para llevar a cabo diferentes ensayos de laboratorio que son aplicables a mezclas que se emplean en ensayos de concreto fresco y en la confección de probetas y vigas para ensayos de concreto endurecido con los propósitos de: verificar la calidad de los materiales componentes y su correcta dosificación, investigar procedimientos de elaboración y ensayos, e investigación de propiedades y características del hormigón ante la presencia de adiciones.

En el presente proyecto se utilizara solamente el equipo necesario que justifique la caracterización de cada uno de los ensayos destinados a verificar principalmente el cumplimiento de los requisitos de resistencia y densidad exigidos en obras viales.

El análisis físico-químico del cemento será proporcionado por los laboratorios de SOBOCE mediante un informe técnico de calidad.

Los ensayos realizados para los agregados pétreos estarán de acuerdo a la normativa proporcionada por la ABC.

Los ensayos planteados para la caracterización de la ceniza de caña de azúcar están sujetos a conocer principalmente sus propiedades mecánicas básicas, como ser: modulo de finura, porcentaje que pasa el tamiz 200, granulometría, absorción, densidad y peso unitario. En cuanto a la composición química, será extraída de un certificado emitido por un laboratorio reconocido y acreditado.

El procedimiento y los cálculos realizados para cada uno de los ensayos, se muestran en forma detallada en el Anexo I, por lo que en este capítulo solamente se presentan resultados finales.

3.1. EQUIPOS

3.1.1. DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS UTILIZADOS

Los equipos utilizados para el presente trabajo se encuentran normalizados y calibrados, entre estos se mencionan:

a) Para la Granulometría:

- Juego de tamices de la Serie Estándar Americana 1", $\frac{3}{8}$ ", N°4, N°8, N°16, N°30, N°50, N°100, N°200. De acuerdo a la Norma ASTM E-11.2004, distribuida por la empresa PINZUAR LTDA.

b) Para pesaje de las muestras:

- Balanza Digital marca OHAUS modelo SCOUT Pro SP4001, cuya capacidad máxima es de 4000 gr., capacidad mínima de 0,50 gr., error máximo permisible de 0,10 gr.
- Balanza Digital marca PINZUAR modelo T3806, cuya capacidad máxima es de 20 kg., capacidad mínima de 0,02 kg., con un error máximo permisible de 0,001 kg.
- Balanza Digital marca PINZUAR modelo T3806, cuya capacidad máxima es de 100 kg., capacidad mínima de 0,05 kg., con un error máximo permisible de 0,01 kg.

c) Para el Ensayo Desgaste del Agregado Grueso.

- Maquina Universal de Desgaste de los Ángeles, de acuerdo a la Norma (ASTM C131 AASHTO T96).

d) Para Ensayo de Docilidad (Trabajabilidad):

- Cono de Abrams, de acuerdo a la Norma (ASTM C143 AASHTO T119).

e) Para Ensayo de Porcentaje de Vacíos:

- Presurímetro de vacíos, de acuerdo a las especificaciones de la Norma (ASTM C138 AASTHO T121).

f) Para Pruebas de Compresión de Probetas y Flexo-tracción de Vigas:

- Maquina de Ensayo Universal, con un alcance máximo de 1000 KN, marca PINZUAR . Clase I, con error relativo máximo hallado en exactitud de -0.53%.

g) Otros:

- Moldes cilíndricos de 150mm de diámetro por 300mm de altura, de acuerdo con la Norma ASTM C-470.
- Moldes rectangulares de 150mm de altura por 153mm ancho por 507mm de largo.
- Mezcladora mecánica, bandejas, badilejos, termómetros, cronómetros, etc.

3.2. CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

3.2.1. CEMENTO EL PUENTE IP- 40

Las características tanto físicas como químicas fueron proporcionadas mediante un informe de calidad dado por el laboratorio de SOBOCE, este informe se encuentra dentro de las especificaciones que exige la Norma Boliviana (NB 011).

TABLA 3.1.
INFORME DE CONTROL DE CALIDAD “CEMENTO EL PUENTE IP-40”.

ESPECIFICACIONES QUÍMICAS		Unidad	Cemento Portland IP- 40	Especificaciones NB IP-40
PPF		%	4.05	< 7
SiO ₂		%	29.71	
Al ₂ O ₃		%	4.95	
Fe ₂ O ₃		%	2.99	
CaO		%	52.72	
MG		%	2.46	< 6
SO ₃		%	1.88	< 4
R.I.		%	10.16	
Cal Libre		%	1.22	
ESPECIFICACIONES FÍSICAS		Unidad	Cemento Portland IP- 40	Especificaciones NB IP-40
BLAINE		cm ² /gr.	5247	> 2800
Tiempo de fraguado	Inicial	Mint.	2:21	> 45
	Final	hrs.	4:22	> 10:00
Expansión Lee Chatelier		mm.	0.00	> 8
Relación a/c		ml/gr.	0.581	
Fluidez		%.	108.0	
Residuos en mallas	200mm.	% ret.	0.65	
	325mm.	% ret.	5.10	
Peso específico		gr./lt.	2.98	
Resistencia a Compresión	3 días	MPa.	22.80	> 17
	7 días	MPa.	30.60	> 25
	28 días	MPa.	40.90	> 40

Fuente: Empresa de Cemento SOBOCE S.A.

3.2.2. AGREGADO FINO

La cantera de agregado fino utilizada es procedente de la Planta de áridos Viracocha, que se encuentra ubicada en la comunidad de La Pintada, localizada a 4 Km al sud de la ciudad de Tarija (carretera a Bermejo).



Figura 3.1. Planta de áridos "Viracocha".

3.2.2.1. Tamaño Máximo (T.M.)

El T.M. del agregado fino corresponde al material que pasa el 100% de la muestra:

- T.M. = $\frac{3}{8}$ " (9.50 mm.).

3.2.2.2. Porcentaje de Finos

El porcentaje de finos fue determinado mediante ensayos que cumplen con la Norma (ASTM C117 AASTHO T11), el procedimiento del mismo se detalla en el anexo I:

- Porcentaje de Finos = 2.17%

Según especificaciones de la norma, el porcentaje de finos no debe exceder el 5%.



Figura 3.2. Método de Lavado (agregado fino).

3.2.2.3. Granulometría y Modulo de Fineza

El modulo de fineza, se calculo una vez realizado el análisis granulométrico, es el resultado de la suma de los porcentajes acumulados retenidos sobre cada uno de los siguientes tamices: $\frac{3}{8}$ ", N°4, N°8, N°16, N°30, N°50, N°100, dividido entre 100.



Figura 3.3. Serie de Tamices (agregado fino).

El modulo de fineza adecuado para producir concreto debe de estar entre 2.30 y 3.10, donde un valor menor que 2.00 indica una arena fina, 2.50 una arena de finura media y más de 3.0 una arena gruesa.

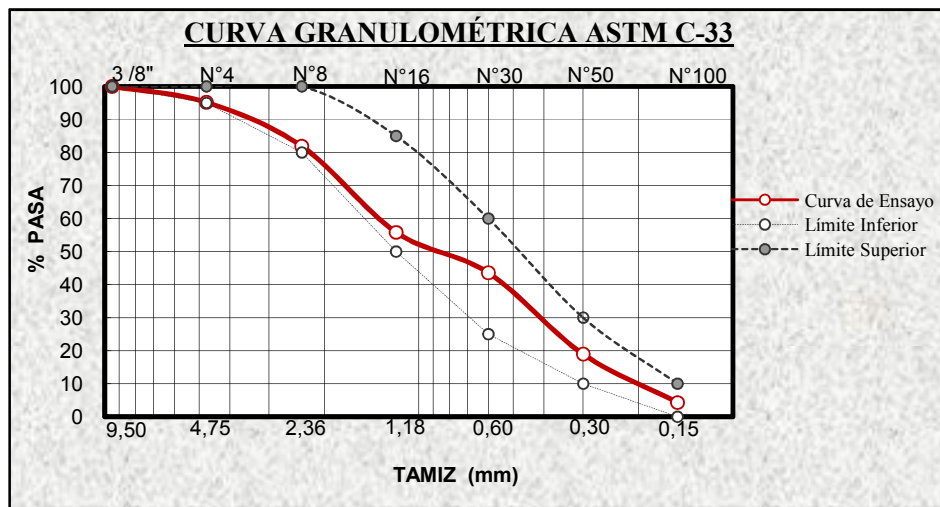
Los resultados obtenidos se reflejan en la tabla 3.2, el procedimiento del ensayo se detalla en el Anexo I:

TABLA 3.2.
GRANULOMETRÍA DEL AGREGADO FINO.

Identificación de la muestra: Arena.		Tamaño máx. del agregado: 9,50mm.	
Procedencia: Planta La Pintada (Viracocha).		Laboratorista: Univ. Jimena C. Jurado A.	

Peso Total Muestra (gr) = 1155,9

Tamices	Abertura (mm)	% Que pasa del total	Especificación ASTM C-33	
3/8	9,50	100,00	100	
Nº4	4,75	95,22	95	100
Nº8	2,36	81,90	80	100
Nº16	1,18	55,93	50	85
Nº30	0,60	43,64	25	60
Nº50	0,30	19,01	10	30
Nº100	0,15	4,41	2	10
BASE		0,00		



% DE HUMEDAD	
DATO	(gr).
Peso Muestra Húmeda	1234,40
Peso Muestra seca	1181,00
Peso Agua	53,40
% de Humedad	4,52

% PASA N° 200	
DATO	(gr).
Peso Muestra Seca	1181,00
Peso Muestra Seca Lavada	1155,90
% Pasa N° 200	2,17

- Modulo de Fineza = 3.00 (Arena media).

Fuente: Elaboración Propia.

3.2.2.4. Densidad Real, Densidad Neta y Absorción

Según las especificaciones de la Norma (ASTM C128 AASTHO T84), la densidad del agregado fino será expresada como: densidad real con superficie seca, densidad real del árido seco, densidad neta y absorción.

Se realizó el ensayo obteniéndose los resultados mostrados en la tabla 3.3, el procedimiento del ensayo se detalla en el Anexo I:

TABLA 3.3.
DENSIDAD Y ABSORCIÓN.

N°	Masa de árido saturado M_{ss} (gr)	Masa matraz con muestra + agua M_M (gr)	Masa de árido seco M_s (gr)	Masa de matraz con agua M_a (gr)	Densidad Real Sup. Seca P_{RT} (gr/cm ³)	Densidad Real de árido Seco P_{RS} (gr/cm ³)	Densidad Neta P_N (gr/cm ³)	Absorción del Agua a (%)
1	500,00	1750,4	493,40	1441,9	2,61	2,58	2,67	1,34
2	500,00	1750,6	493,00	1441,9	2,61	2,58	2,67	1,42
3	500,00	1750,4	493,40	1441,9	2,61	2,58	2,67	1,34
Promedio					<u>2,61</u>	<u>2,58</u>	<u>2,67</u>	<u>1,37</u>

Fuente: Elaboración Propia.



Figura 3.4. Árido saturado superficialmente seco.



Figura 3.5. Árido saturado+agua+matraz

3.2.2.5. Densidad Aparente Suelta y Compacta

De acuerdo a la Norma (ASTM C29), la densidad aparente suelta, se la utiliza en la dosificación de concretos para la conversión del peso a volumen, es decir para conocer el consumo por metro cubico de concreto; así mismo la densidad aparente compacta sirve para el conocimiento de volúmenes de materiales apilados, que están sujetos a acomodamiento o asentamiento provocados por el transito sobre ellos o por la acción del tiempo.

Los ensayos realizados dieron los resultados observados en la tabla 3.4 y 3.5, el procedimiento del ensayo se detalla en el Anexo I:

TABLA 3.4.
DENSIDAD APARENTE SUELTA.

Muestra N°	Peso Recipiente (gr.)	Volumen Recipiente (cm³)	Peso recipiente + muestra suelta (gr.)	Peso muestra suelta (gr.)	D. Aparente Suelta (gr/cm³)
1	1345,00	2094,00	4767,00	3422,00	1,634
2	1345,00	2094,00	4777,00	3432,00	1,639
3	1345,00	2094,00	4757,00	3412,00	1,629
Promedio					<u>1,63</u>

Fuente: Elaboración Propia.

TABLA 3.5.
DENSIDAD APARENTE COMPACTA.

Muestra N°	Peso Recipiente (gr.)	Volumen Recipiente (cm³)	Peso recipiente + muestra compacta (gr.)	Peso muestra compacta (gr.)	D. Aparente Compacta (gr/cm³)
1	1345,00	2094,00	4980,00	3635,00	1,736
2	1345,00	2094,00	4985,00	3640,00	1,738
3	1345,00	2094,00	4977,00	3632,00	1,734
Promedio					<u>1,74</u>

Fuente: Elaboración Propia.



Figura 3.6. Densidad Aparente Suelta



Figura 3.7. Densidad Aparente Compacta.

3.2.2.6. Equivalente de Arena

Este ensayo fue realizado en laboratorios del SEDECA dando como resultados los valores mostrados en la tabla 3.6, el procedimiento del ensayo se detalla en el Anexo I:

TABLA 3.6:
EQUIVALENTE DE ARENA

Observaciones	Muestra		
	1	2	3
Lect. Nivel Superior Arena (Na)	33	32	34
Lect. Nivel Inferior Arcilla (Nt)	37	36	39
Equivalente de Arena (EA%)	89	89	87
Promedio	<u>88</u>		

***Fuente:** Elaboración Propia.*

De acuerdo a las especificaciones de la Norma (ASTN D2419 AASTHO T176) valores superiores a 75% reflejan un grado de limpieza suficiente para su aplicación en pavimento rígido.

3.2.3. AGREGADO GRUESO

La cantera de agregado grueso utilizada, es la misma que la del agregado fino.



***Figura 3.8.** Planta de áridos " Viracocha".*

3.2.3.1. Tamaño Máximo (TM)

El T.M. absoluto del agregado grueso corresponde al material que pasa el 100% de la muestra y es:

- T.M. = 1" (25 mm.).

3.2.3.2. Tamaño Máximo Nominal (TMN)

El T.M.N. es otro parámetro que se deriva del análisis granulométrico y corresponde a la abertura del tamiz inmediatamente menor al tamaño máximo, cuando por dicho tamiz pasa el 90% o más de la masa de árido.

- T.M.N. = $\frac{3}{4}$ " (19 mm.).

3.2.3.3. Porcentaje de Finos

El porcentaje de finos fue determinado mediante el método del lavado de la muestra y mediante ensayos que cumplen con la Norma, el cual es igual a:

- Porcentaje de Finos = 0.33%

Según la Norma ASTM C117-90, el porcentaje de finos no debe exceder el 1.20%



Figura 3.9. Método de Lavado (agregado grueso).

3.2.3.4. Granulometría y Modulo de Finura

El modulo de fineza, se calcula una vez realizado el análisis granulométrico, es el resultado de la suma de los porcentajes acumulados retenidos sobre cada uno de los siguientes tamices de la serie Estándar Americana: 1", $\frac{3}{4}$ ", $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{8}$ ", N°4, N°8, N°16, N°30, dividido entre 100.



Figura 3.10. Serie de Tamices (agregado grueso).

Los requisitos estipulados en las especificaciones de la Norma ASTM C-33 N°67 para agregado grueso, permiten una relativa amplitud de variación en la granulometría de los límites especificados. Los resultados obtenidos se reflejan en la tabla 3.7:

TABLA 3.7:
GRANULOMETRÍA AGREGADO GRUESO

Identificación muestra: Grava			Tamaño máx. del agregado: 1".	
Procedencia: Planta La Pintada (Viracocha).			Laboratorista: Univ. Jimena C. Jurado A.	

Peso Total Muestra (gr) = 15024,00

Tamices	Abertura (mm)	% Que pasa del total	Especificaciones ASTM N° 67	
1"	25,00	100,00	100	100
3/4"	19,00	91,14	90	100
1/2"	12,50	57,24	55	77
3/8"	9,50	38,30	20	55
N°4	4,75	11,16	0	15
N°8	2,36	5,86	0	5
N°16	1,18	---	---	---

CURVA GRANULOMÉTRICA (ASTM C-33 N°67)

Legend:
 —○— Curva de Ensayo
 ---○--- Límite Inferior
 ---●--- Límite Superior

% DE HUMEDAD	
DATO	(gr).
Peso Muestra Húmeda	4038,00
Peso Muestra seca	3939,00
Peso Agua	99,00
% de Humedad	2,51

% PASA N° 200	
DATO	(gr).
Peso Muestra Seca	3939,00
Peso Muestra Seca Lavada	3926,00
% Pasa N° 200	0,33

- Modulo de Fineza = 4.87

3.2.3.5. Densidad Real, Densidad Neta y Absorción

Según las especificaciones de la Norma (ASTM C127 AASTHO T85), se realizaron los ensayos obteniendo los resultados mostrados en la tabla 3.8, el procedimiento del ensayo se detalla en el anexo I:

TABLA 3.8.
DENSIDAD Y ABSORCIÓN.

Nº	Masa de árido saturado M _{ss} (gr)	Masa de árido sumergido M _{sum} (gr)	Masa de árido seco M _s (gr)	Densidad Real Sup. Seca P _{RT} (gr/cm ³)	Densidad Real de árido Seco P _{RS} (gr/cm ³)	Densidad Neta P _N (gr/cm ³)	Absorción del Agua a (%)
1	3000,00	1847,00	2949,00	2,60	2,56	2,68	1,73
2	3000,00	1848,00	2948,00	2,60	2,56	2,68	1,76
3	3000,00	1846,00	2946,00	2,60	2,55	2,68	1,83
Promedio				2,60	2,56	2,68	1,78

Fuente: Elaboración Propia.



Figura 3.11. Árido saturado superficialmente seco.



Figura 3.12. Árido sumergido

3.2.3.6. Densidad Aparente Suelta y Compacta

De los ensayos realizados se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 3.9 y 3.10:

TABLA 3.9.
DENSIDAD APARENTE SUELTA.

Muestra N°	Peso Recipiente (gr.)	Volumen Recipiente (cm³)	Peso recipiente + muestra suelta (gr.)	Peso muestra suelta (gr.)	D. Aparente Suelta (gr/cm³)
1	4596,00	14109,00	27280,00	22684,00	1,608
2	4596,00	14109,00	26840,00	22244,00	1,577
3	4596,00	14109,00	27120,00	22524,00	1,596
Promedio					<u>1,59</u>

Fuente: Elaboración Propia.

TABLA 3.10.
DENSIDAD APARENTE COMPACTA.

Muestra N°	Peso Recipiente (gr.)	Volumen Recipiente (cm³)	Peso recipiente + muestra compacta (gr.)	Peso muestra compacta (gr.)	D. Aparente Compacta (gr/cm³)
1	4596,00	14109,00	28190,00	23594,00	1,672
2	4596,00	14109,00	28430,00	23834,00	1,689
3	4596,00	14109,00	28320,00	23724,00	1,681
Promedio					<u>1,68</u>

Fuente: Elaboración Propia.



Figura 3.13. Densidad Aparente Suelta.



Figura 3.14. Densidad Aparente Compacta

3.2.3.7. Porcentaje de Partículas planas y alargadas

Los ensayos fueron realizados en el Laboratorio de Suelos y Hormigones de la Universidad Juan Misael Saracho, al no contar con el equipo requerido para dichas pruebas se realizaron mediante simple inspección visual, es decir se escogió

manualmente las partículas planas y alargadas, dando como resultado los valores mostrados en la tabla 3.11 y 3.12:

TABLA 3.11.
PORCENTAJE DE PARTÍCULAS LAJEADAS.

Tamiz		Material Ret. (gr)	Cantidad Lajas (gr)	Lajas (%)
Pasa	Retenido			
3/4"	1/2"	1731,00	65,50	3,78
1/2"	3/8"	497,00	29,20	5,88
3/8"	Nº4	1953,00	46,60	2,39
Total		4181,00	141,30	3,38

Fuente: Elaboración Propia.

TABLA 3.12.
PORCENTAJE DE PARTÍCULAS ALARGADAS.

Tamiz		Material Ret. (gr)	Part. Alargadas (gr)	Part. Alargadas (%)
Pasa	Retenido			
3/4"	1/2"	1731,00	173,60	10,03
1/2"	3/8"	497,00	51,40	10,34
3/8"	Nº4	1953,00	229,40	11,75
Total		4181,00	454,40	10,87

Fuente: *Elaboración Propia.*

.1.1.1.1.1.1.1. Resistencia a la Abrasión

Este ensayo fue realizado en los Laboratorios del SEDECA, obteniendo así el resultado mostrado en la tabla 3.13, el procedimiento del ensayo se detalla en el anexo I:

TABLA 3.13.
DESGASTE DE LOS ÁNGELES.

Muestra N°	Tamiz Pasante	Tamiz Retenido	Cantidad (gr)	mi (gr)	mf (gr)	P (%)
1	3/4 "	1/2 "	2500	5000	3454	30,92
	1/2 "	3/8 "	2500			
2	3/4 "	1/2 "	2500	5000	3465	30,70
	1/2 "	3/8 "	2500			
3	3/4 "	1/2 "	2500	5000	3459	30,82
	1/2 "	3/8 "	2500			
Promedio						30,81

- Desgate = 30.81% (Árido de buena calidad).



Figura 3.15. Desgaste de Los Ángeles.



Figura 3.16. Muestra (antes y después del ensayo).

3.2.4. CENIZA DE CAÑA DE AZÚCAR

La muestra de ceniza de caña de azúcar fue traída de la Fábrica de azúcar I.A.B.S.A., la que se encuentra ubicada en la ciudad de Bermejo, ciudad que pertenece a la segunda sección de la provincia Arce ubicada en el extremo sur del departamento a 208 km de la ciudad de Tarija en la frontera con la República Argentina, está a 419 msnm, de clima caluroso y semiárido, con una temperatura media de 22,18 °C y 1.200 mm de precipitación pluvial concentrados en el periodo de lluvias (noviembre-abril).

La ciudad es muy conocida por el ingenio azucarero, ya que este provee una buena parte del consumo interno de azúcar de Bolivia.

Sus límites son:

- Norte = La serranía de San Telmo (río Tarija) y Colonia Ismael Montes.
- Sur = Río Bermejo y la República Argentina.
- Este = Río Grande de Tarija y la República Argentina.
- Oeste = Comunidad de San Telmo (río Bermejo) y la República Argentina.



Figura 3.17. Vista satelital del Ingenio Azucarero de Bermejo IABSA.

Todo el proceso azucarero deja como residuo final una ceniza que resulta directamente de la combustión del bagazo de caña de azúcar; esta ceniza puede ser aprovechada como una alternativa de adición sólida mineral en sustitución de cemento para la elaboración de concreto hidráulico.

La ceniza posee materias inertes finas de color negro o gris, las cuales durante la combustión son arrastradas por el vapor y atrapadas por una corriente de aire, que las conduce a un pozo de almacenamiento. El objetivo de esta operación es evitar emisiones de estas partículas a la atmosfera, por lo que una vez depositadas pozo son extraídas y depositadas a un lado de la fábrica donde forman parte de material de relleno o algunas veces son distribuidas en terrenos cercanos donde se cultiva caña de azúcar.

Los ensayos realizados están enfocados a conocer las propiedades físicas, químicas y mecánicas presentes en este material.

3.2.4.1. Tamaño Máximo

El T.M. de la ceniza corresponde al material que pasa el 100% de la muestra y es:

$$- \text{ T.M.} = \text{N}^{\circ}16 \text{ (1.18mm.)}.$$

3.2.4.2. Porcentaje De Finos

El porcentaje de finos fue determinado mediante el método del lavado de la muestra, es igual a:

- Porcentaje de Finos = 15.49%



Figura 3.18. Método de Lavado (ceniza).

3.2.4.3. Granulometría y Modulo de Fineza

Para la granulometría se utilizo los siguientes tamices: N°16, N°30, N°50, N°100. Los resultados se muestran en la tabla 3.14, el procedimiento del ensayo se detalla en el anexo I:



Figura 3.19. Granulometría de la ceniza.

TABLA 3.14:
GRANULOMETRÍA DE LA CENIZA DE CAÑA DE AZÚCAR

Identificación muestra: Ceniza		Tamaño máx. del agregado: 1.18 mm.	
Procedencia: I.A.B.S.A.		Laboratorista: Univ. Jimena C. Jurado A.	

Peso Total Muestra (gr) = 227,00

Tamices	Abertura (mm)	% Que pasa del total	Especificaciones ASTM C-33	
3/8	9,50	100,00	100	100
Nº4	4,75	100,00	95	100
Nº8	2,36	100,00	80	100
Nº16	1,18	100,00	50	85
Nº30	0,60	88,99	25	60
Nº50	0,30	59,47	10	30
Nº100	0,15	28,90	2	10
BASE		0,00		

CURVA GRANULOMÉTRICA

El gráfico muestra la curva granulométrica con el eje Y representando el % PASA (de 0 a 100) y el eje X representando el TAMIZ (mm) (de 9,50 a 0,15). La curva de ensayo (roja) comienza en 100% para tamices Nº 3/8 y Nº 4, y comienza a disminuir a partir del tamiz Nº 8, alcanzando aproximadamente 29% para el tamiz Nº 100. El límite superior (línea punteada) y el límite inferior (línea punteada) definen el rango de variación aceptable.

% DE HUMEDAD	
DATO	(gr.)
Peso Muestra Húmeda	275,20
Peso Muestra seca	269,20
Peso Agua	6,00
% de Humedad	2,23

% PASA Nº 200	
DATO	(gr.)
Peso Muestra Seca	269,20
Peso Muestra Seca Lavada	227,50
% Pasa Nº 200	15,49

- Modulo de Fineza = 1.23

Fuente: Elaboración Propia.

3.2.2. Densidad Real, Densidad Neta y Absorción

De los ensayos realizados, se obtuvo los resultados mostrados en la tabla 3.15, el procedimiento del ensayo se detalla en el anexo I:

TABLA 3.15.
DENSIDAD Y ABSORCIÓN.

N°	Masa de ceniza saturada M_{SSS} (gr)	Masa matraz con muestra + agua M_M (gr)	Masa de ceniza seca M_s (gr)	Masa de matraz con agua M_a (gr)	Densidad Real Sup. Seca P_{RT} (gr/cm ³)	Densidad Real de ceniza seca P_{RS} (gr/cm ³)	Densidad Neta P_N (gr/cm ³)	Absorción del Agua a (%)
1	300,00	1598,5	297,00	1441,9	2,09	2,07	2,12	1,01
2	300,00	1597,1	296,60	1441,9	2,07	2,05	2,10	1,15
3	300,00	1598,5	297,00	1441,9	2,09	2,07	2,12	1,01
Promedio					<u>2,09</u>	<u>2,06</u>	<u>2,11</u>	<u>1,06</u>

Fuente: Elaboración Propia.



Figura 3.20. Ceniza saturada superficialmente seca.

Figura 3.21. Ceniza saturada+agua+matraz

3.2.4.5. Densidad Aparente Suelta y Compacta

De los ensayos realizados, se obtuvo los resultados mostrados en la tabla 3.16 y 3.17, el procedimiento del ensayo se detalla en el Anexo I:

TABLA 3.16.
DENSIDAD APARENTE SUELTA

Muestra N°	Peso Recipiente (gr.)	Volumen Recipiente (cm ³)	Peso recipiente + muestra suelta (gr.)	Peso muestra suelta (gr.)	D. Aparente Suelta (gr/cm ³)
1	1345,00	2094,00	3487,00	2142,00	1,023
2	1345,00	2094,00	3494,00	2149,00	1,026
3	1345,00	2094,00	3500,00	2155,00	1,029
Promedio					1,03

Fuente: Elaboración Propia.

TABLA 3.17.
DENSIDAD APARENTE COMPACTA.

Muestra N°	Peso Recipiente (gr.)	Volumen Recipiente (cm ³)	Peso recipiente + muestra compacta (gr.)	Peso muestra compacta (gr.)	D. Aparente Compacta (gr/cm ³)
1	1345,00	2094,00	3770,00	2425,00	1,158
2	1345,00	2094,00	3775,00	2430,00	1,160
3	1345,00	2094,00	3781,00	2436,00	1,163
Promedio					1,16

Fuente: Elaboración Propia.



Figura 3.22. Densidad aparente suelta y compacta.

3.2.4.6. Contenido de Materia Orgánica

Como bien se sabe, el contenido de materia orgánica en cualquier material que sea parte del hormigón es perjudicial, afectando principalmente en su resistencia, por tal razón al observar que la muestra de ceniza contenía materia orgánica (pequeñas fibras de bagazo sin calcinar), se optó por conveniente realizar el ensayo de contenido de materia orgánica.



Figura 3.23. Deposito de ceniza de caña de azúcar.

El ensayo fue realizado según la Norma NB 075-74, en los Laboratorios del “CEANID” pertenecientes a la Universidad Juan Misael Saracho (Tarija), dando como resultado los valores mostrados en la tabla 3.18:

TABLA 3.18.
PORCENTAJE DE MATERIA ORGÁNICA.

Muestra	Parámetro	Temp. de Calcinación (°C)	Temp. de Ensayo (°C)	Ceniza de caña azúcar (%)	Materia Orgánica (%)
1	Ceniza	400 - 500	550	98.47	1.53
2	Ceniza	400 - 500	700	98.31	1.69

Fuente: Elaboración Propia.

3.2.4.7. Composición Mineralógica

Para determinar la composición mineralógica se realizaron análisis petrográficos que consistieron en la difracción de rayos X, determinación de PH, cantidad de POL (azúcar) y contenido de humedad.

Estos ensayos se realizaron en el laboratorio químico de “SPECTROLAB” pertenecientes a la Universidad Técnica de Oruro (U.T.O.)

- Difracción de Rayos X de especímenes de Polvo

Los procedimientos realizados por esta técnica no destructiva se fundamentan en la Norma ASTM C856, consistente en analizar minerales pulverizados, de tal modo que puedan atravesar una malla 325, garantizando que las partículas individuales del material sean menores a 4400 angstrom de diámetro. Cuando un haz de rayos X pasa a través del polvo mineral orientadas al azar, existirán algunos con orientaciones

adecuadas para producir la difracción de los rayos X desde cada grupo de los planos con espaciamiento característico.

Si se registran los ángulos de difracción y los espaciamientos, pueden calcularse y disponerse en secuencia con las intensidades relativas de los haces también indicadas. Por tanto los minerales de la muestra total pueden ser fácilmente identificados por la secuencia de espaciamientos y de las intensidades, sin tener en cuenta la orientación de los grupos de planos de los átomos.

Para obtener los resultados se requieren curvas de calibración basadas en mezclas conocidas de compuestos puros un estándar interno; una estimación del compuesto se realiza utilizando estas curvas y las relaciones de intensidad entre un pico seleccionado de difracción del compuesto y el estándar interno.



Figura 3.24. Equipo: Difractómetro de Rayos X Philips modelo X'Pert MPD PW 3040.

Los resultados de muestra de ceniza de bagazo de caña de azúcar son los observados en la tabla 3.19:

TABLA 3.19.
COMPOSICIÓN MINERALÓGICA.

Muestra	Parámetro	Fases minerales presentes	Composición Química	%	Descripción Macroscópica
1	Ceniza de caña de azúcar.	Cuarzo. Azufre.	SiO ₂ S	53 8	Muestra de color gris y café en forma fibrosa, los materiales crudos (café) todavía se observan, tienen más largas las fibras, minerales blancos redondeados.

Fuente: Laboratorio Químico de "SPECTROLAB" Universidad Técnica de Oruro (U.T.O.)

- Ensayos Complementarios

Estos ensayos fueron realizados con la finalidad de determinar características particulares presentes en la ceniza. En la tabla 3.20 se presentan los resultados obtenidos mediante el informe:

TABLA 3.20
PRUEBAS COMPLEMENTARIAS.

Prueba	Resultado
Determinación de PH	10.50
Cantidad de POL (Azúcar)	0.00
Contenido de Humedad	0.24%

Fuente: Laboratorio Químico de "SPECTROLAB" (U.T.O.)

Para respaldar el resumen de resultados señalados anteriormente, se observa en el anexo III el informe presentado por el laboratorio químico de "SPECTROLAB", en el cual se observa la grafica de la difracción de Rayos X, resaltando diferentes elevaciones de picos los cuales indican la presencia de los minerales existentes.

3.2.5. CARACTERÍSTICAS DEL AGUA DE MEZCLADO

Los ensayos se efectuaron con agua potable de la red, el análisis físico-químico fue realizado por el Laboratorio Bromato-Tecnológico de la Universidad Juan Misael Saracho, de donde se obtuvo el informe presentado en la tabla 3.21:

TABLA 3.21.
CARACTERÍSTICAS DEL AGUA.

ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO DEL AGUA		Especificaciones según NB
Aspecto	Limpia	
Olor	Sin Olor	
Color	5 u. c.	
PH.	7.30	≥ 5
Calcio	42.00 mgr. CaCo3/L	
Cloruros	7.62 mgr./L	≤ 6 gr/L
Sulfatos	70.00 mgr./L	≤ 1 gr/L
Alcalinidad	112.00 mgr. CaCo3/L	
Turbiedad	Mayor a 5 unit.	
Sólidos Totales	218.00 mgr./L	
Sólidos Solubles	129.00 mgr./L	

Fuente: Laboratorio Bromato-Tecnológico de la Universidad Juan Misael Saracho.

4. CARACTERÍSTICAS Y DISEÑO DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO

INTRODUCCIÓN

El criterio empleado para el diseño de las mezclas de Concreto, tanto la mezcla patrón como las mezclas con adición de ceniza de caña de azúcar en peso cementante, estará basado en la Norma ACI-211, en la Norma ASTM C618, en investigaciones realizadas por el Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto (ISCYC).

En esta etapa, se realizaron cinco diseños de mezcla de Concreto, cada mezcla está conformada por 10 probetas cilíndricas y 10 vigas rectangulares; una de ellas se diseña sin adición de ceniza para una resistencia a compresión de 270 kg/cm² y para una resistencia a tracción de 35 kg/cm² a los 28 días, esta mezcla es considerada en el estudio como la mezcla patrón de comparación; el segundo diseño de mezcla consiste en utilizar la ceniza de caña de azúcar en una proporción del 2% de peso del medio cementante en la mezcla de Concreto, así mismo en la tercera, cuarta y quinta mezcla se utiliza un 4%, 6% y 15% de ceniza.

El tipo de cemento utilizado es el IP-40, y la ceniza de caldera es adicionada sin humedad al cemento portland.

Las muestras diseñadas serán sometidas a ensayos de compresión y flexo-tracción a diferentes edades: 3, 7, 14, 28 y 60 días respectivamente.

Los resultados obtenidos, serán analizados y comparados gráficamente, para determinar si existe o no incidencia de la ceniza de caña de azúcar en el comportamiento físico-mecánico del Concreto para pavimentos rígidos.

4.1. CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO DE LA MEZCLA.

4.1.1. FUNDAMENTO DEL MÉTODO ACI-211.

La dosificación de mezclas de concreto es la determinación de la combinación más económica y práctica de agregados disponibles, cemento, agua y en este caso una adición mineral sólida, que producirá una mezcla trabajable con un endurecimiento adecuado.

La dosificación de la mezcla de prueba puede complementarse efectivamente con ensayos de laboratorio de los materiales relacionados con el concreto.

A continuación se explica la metodología de dosificación para hormigones, presentada por el comité ACI-211; así mismo, se debe tomar en cuenta que un diseño, en el sentido estricto de la palabra, no es posible, debido a que los materiales son esencialmente variables y muchas de sus propiedades no pueden ser tasadas con exactitud en forma cuantitativa. Por tal motivo, es necesario hacer mezclas de prueba para revisar y ajustar las proporciones de los materiales.

Por lo tanto, el diseño de mezclas se basa en el método de ensayo y error, que en este caso converge rápidamente con el sistema de ajuste y reajuste.

A continuación en la tabla 4.1, se muestra los pasos del método ACI-211, para el establecimiento de las proporciones de cada uno de los componentes por metro cúbico hormigón.

TABLA 4.1.
PROCEDIMIENTO DE DISEÑO ACI-211

Paso	Descripción
1	Selección del Asentamiento.
2	Selección de T.M. del agregado.
3	Estimación del Contenido de Aire.
4	Estimación del contenido de Agua de mezclado.
5	Determinación de la resistencia de diseño.
6	Selección de la Relación agua/cemento.
7	Calculo del Contenido de Cemento.
8	Estimación de las proporciones de los Agregados.
9	Ajuste por Humedad de los Agregados.
10	Ajuste a la Mezcla de Prueba.

4.1.2. SELECCIÓN DEL ASENTAMIENTO

El asentamiento es el principal parámetro para medir la consistencia que presenta el concreto en estado fresco, es por esta razón que antes de realizar cualquier dosificación en masa, se deben realizar primeramente pruebas de cono que sirven para corregir si es necesario la dosificación de la mezcla.

Las primeras consideraciones que se deben tener en cuenta para especificar una consistencia determinada en el concreto fresco son el tamaño de la sección que se va a construir, la cantidad y el tiempo de transporte si la elaboración de la mezcla no es in situ. Está claro que cuando la sección es estrecha y complicada o cuando hay

numerosas esquinas o partes inaccesibles, el concreto debe tener una alta manejabilidad de modo que pueda lograrse la mejor compactación posible con una cantidad razonable de esfuerzo.

El segundo aspecto que se debe considerar son las condiciones de colocación, ya que hoy en día existen múltiples sistemas de vaciado como el bombeo, las bandas transportadoras y las pavimentadoras, entre otros, que requieren de una mayor o menor plasticidad (cohesión) de la mezcla, que, como es sabido, dependen en gran parte del contenido de finos.

La Tabla 4.2 provee una guía empírica de la consistencia requerida por el concreto para diferentes tipos de construcción y sistemas de colocación y de compactación. Los valores de asentamiento indicados en esta tabla se aplican cuando el concreto va a ser consolidado por vibración. Si se emplean otros medios de compactación diferentes a la vibración mecánica, los de esta tabla se deben aumentar en 2.5 cm (1"). Como regla general y por razones de economía, el menor asentamiento que permita una adecuada colocación es el que debe ser seleccionado.

TABLA 4.2.

ASENTAMIENTOS RECOMENDADOS PARA DIVERSOS TIPOS DE CONSTRUCCIÓN Y SISTEMAS DE COLOCACIÓN Y COMPACTACIÓN.

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

Fuente: Adaptado del Método ACI.- 211.

4.1.3. SELECCIÓN DEL T.M. DEL AGREGADO GRUESO.

De acuerdo con el criterio de la ACI-211 los agregados bien gradados con mayor tamaño máximo tienen menos vacíos y menor área superficial que los de menor tamaño máximo; por consiguiente, si el tamaño máximo de los agregados en una mezcla de concreto se aumenta (para un mismo asentamiento) los contenidos de cemento y agua disminuirán. Por lo tanto, el tamaño máximo del agregado deberá ser el mayor económicamente disponible y compatible con las dimensiones de las estructuras.

Sin embargo, la mayoría de las veces son las características geométricas y las condiciones de refuerzo de las estructuras las que limitan el tamaño máximo del agregado que pueden utilizarse; pero existen otros aspectos relacionados como la producción, el transporte y la colocación del concreto que también puede influir para limitarlo.

La aplicación de estas limitaciones ocasiona el uso de agregados con tamaños máximos que por lo general varían entre 9.51 mm ($\frac{3}{8}$ ") y 76.1 mm (3"). Sin embargo, en algunos casos como grandes estructuras de concreto masivo (presas), con secciones muy amplias y poco o nada de refuerzo, la posibilidad de utilizar un tamaño máximo de grava es casi limitada, aunque normalmente se considere un tamaño de 152.2 mm (6") como el máximo tamaño práctico.

De acuerdo con lo anterior, y de manera muy general en la tabla 4.3 se dan algunas recomendaciones para la selección del tamaño máximo, según el tipo de construcción.

TABLA 4.3.

TAMAÑOS MÁXIMOS DE LOS AGREGADOS GRUESOS SEGÚN EL TIPO DE CONSTRUCCIÓN.

Dimensión mínima de la sección (cm)	Tamaño máximo en Pulg. (mm)			
	Muros reforzados Vigas y columnas	Muros sin refuerzo	Losas muy reforzadas	Losas sin refuerzo o poco reforzadas
6 – 15	$\frac{1}{2}$ "(12)- $\frac{3}{4}$ "(19)	$\frac{3}{4}$ "(19)	$\frac{3}{4}$ "(19)-1"(25)	$\frac{3}{4}$ "(19)-1 $\frac{1}{4}$ "(38)
19 – 29	$\frac{3}{4}$ "(19)-1 $\frac{1}{2}$ "(38)	1 $\frac{1}{2}$ "(38)	1 $\frac{1}{2}$ "(38)	1 $\frac{1}{2}$ "(38)-3"(76)
30 – 74	1 $\frac{1}{2}$ "(38)-3"(76)	3"(76)	1 $\frac{1}{2}$ "(38)-3"(76)	3"(76)
75 o mas	1 $\frac{1}{2}$ "(38)-3"(76)	6"(152)	1 $\frac{1}{2}$ "(38)-3"(76)	3"(76)-6"(152)

Fuente: Adaptado del Método ACI.- 211.

4.1.4. ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE AIRE

Como es sabido, durante la operación de mezclado queda aire naturalmente atrapado dentro del concreto.

Pero cuando se prevea que habrá condiciones de exposición severa, es conveniente incluir aire en el concreto, bajo estas condiciones el Comité ACI-211 indica las cantidades aproximadas de aire atrapado que pueden ser esperadas en concreto sin aire incluido y los niveles recomendados de aire intencionalmente incluido para diferentes tamaños máximos de agregado, y para los diferentes niveles de exposición que se muestran en la Tabla 4.4.

TABLA 4.4.

CANTIDAD APROXIMADA DE AIRE ESPERADO EN CONCRETO SIN AIRE INCLUIDO Y NIVELES DE AIRE INCLUIDO PARA DIFERENTES TAMAÑOS MÁXIMOS DE AGREGADO (A)

		Contenido de aire en porcentaje (por volumen)			
(mm.)	(Pulg.)	Naturalmente atrapado	Exposición ligera	Exposición moderada	Exposición severa
9.51	$\frac{3}{8}$	3.0	4.5	6.0	7.5
12.7	$\frac{1}{2}$	2.5	4.0	5.5	7.0
19.0	$\frac{3}{4}$	2.0	3.5	5.0	6.0
25.4	1	1.5	3.0	4.5	6.0
38.1	1½	1.0	2.5	4.5	5.5
50.8	2	0.5	2.0	4.0	5.0
76.1	3	0.3	1.5	3.5	4.5
152.0	6	0.2	1.0	3.0	4.0

Fuente: Adaptado del Método ACI.- 211.

Sin embargo, para efectos prácticos se sugiere que si el concreto no va a tener aire intencionalmente incluido, no se tome en consideración la cantidad de aire naturalmente atrapado indicado en la Tabla 4.4, ya que la cantidad es tan pequeña que más bien puede convertirse en un factor de seguridad, también pequeño.

4.1.5. ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DEL AGUA DEL MEZCLADO.

El agua de mezclado cumple dos funciones importantes en una mezcla de concreto: la primera es hidratar las partículas de cemento, y la segunda es producir la fluidez necesaria.

La cantidad de agua por unidad de volumen de concreto necesaria para obtener el asentamiento deseado, depende del tamaño máximo, perfil, textura y granulometría de los agregados, así como de la cantidad de aire incorporado, no siendo apreciablemente afectada por la cantidad de cemento.

La Tabla 4.5 proporciona una primera estimación del agua de mezclado para concretos hechos con diferentes tamaños máximos de agregado sin aire incorporado.

TABLA 4.5
REQUERIMIENTO APROXIMADO DE AGUA DE MEZCLADO PARA DIFERENTES
ASENTAMIENTOS Y TAMAÑOS MÁXIMOS DE AGREGADO, CON PARTÍCULAS DE FORMA
ANGULAR Y TEXTURA RUGOSA, EN HORMIGÓN SIN AIRE INCLUIDO

Asentamiento		Tamaño máximo nominal del agregado, en mm (Pulg.)							
		9,51 3/8"	12,70 1/2"	19,00 3/4"	25,40 1"	38,10 1 1/2"	50,80 2"	64,00 2 1/2"	76,10 3"
(mm).	(Pulg.).	Agua de mezclado en kg/m ³ de hormigón							
0	0	223	201	186	171	158	147	141	132
25	1	231	208	194	178	164	154	147	138
50	2	236	214	199	183	170	159	151	144
75	3	241	218	203	188	175	164	156	148
100	4	244	221	207	192	179	168	159	151
125	5	247	225	210	196	183	172	162	153
150	6	251	230	214	200	187	176	15	157
175	7	256	235	218	205	192	181	170	163
200	8	260	240	224	210	197	186	176	168

Fuente: Adaptado del Método ACI.- 211.

Como se observó en la Tabla 4.5 no toma en cuenta para la estimación del agua de mezclado las incidencias del perfil, textura y granulometría de los agregados.

Debemos hacer presente que estos valores tabulados son lo suficientemente aproximados para una primera estimación y que dependiendo del perfil, textura y granulometría de los agregados, los valores requeridos del agua de mezclado pueden estar algo encima o por debajo de estos valores.

4.1.6. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA DE DISEÑO

De acuerdo a la Norma ACI-211 el concreto para pavimentos rígidos debe diseñarse y producirse para asegurar una resistencia a la compresión mínima de 250 kg/cm^2 lo suficiente para resistir las diferentes cargas de tráfico.

En este trabajo de investigación se optó por tomar una resistencia característica a la compresión de 270 kg/cm^2 y 35 kg/cm^2 como resistencia a flexo-tracción, siendo este último el parámetro más importante para el control de concretos destinados a la construcción de pavimento rígidos.

4.1.7. SELECCIÓN DE LA RELACIÓN AGUA/CEMENTO.

Debido a que la resistencia del concreto se rige principalmente por la resistencia e interacción de sus fases constituyentes: pasta-agregado e interfaces de adherencia pasta-agregado, es común que los diferentes agregados y cementos produzcan resistencias distintas con la misma relación agua cemento. Por esta razón es importante conocer la correspondencia entre la resistencia y la relación agua cemento, para cada grupo de materiales en particular y para diferentes edades (por ejemplo: 3, 7, 14, 28, 56 y 90 días).

Para el caso colombiano, en una investigación desarrollada en la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana, se obtuvieron valores reproducidos en la Tabla 4.6. Allí se compararon los diferentes cementos Tipo I colombianos, en concretos sin aire incluido, diseñados y producidos bajo las mismas condiciones, con los mismos materiales y curados a temperatura y humedad normales.

Los límites superior e inferior de la mencionada gráfica de relación agua-cemento contra resistencia potencial desarrollada a los 28 días de edad hablan por sí mismos y corroboran la importancia de disponer de este tipo de información.

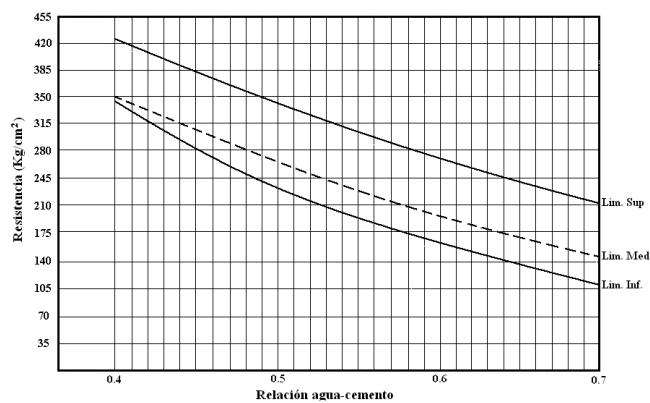


Figura 4.1. Correspondencia Entre la Resistencia a Compresión y la Relación Agua-Cemento Para los Cementos Portland Tipo I en Hormigones sin Aire Incluido

En el evento de que no se disponga de información previa, se puede tomar los valores de la tabla 4.6., que aunque aproximados, son relativamente seguros para concretos que contengan cemento portland tipo I.

TABLA 4.6.

CORRESPONDENCIA ENTRE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN A LOS 28 DÍAS DE EDAD Y LA RELACIÓN AGUA CEMENTO PARA LOS CEMENTOS, PORTLAND TIPO I, EN CONCRETOS SIN AIRE INCLUIDO.

Resistencia a Compresión (kg/cm ²)	Relación agua cemento en peso		
	Límite superior	Línea media	Límite inferior
140	-	0.72	0.65
175	-	0.65	0.58
210	0.70	0.58	0.53
245	0.64	0.53	0.49
280	0.59	0.48	0.45
315	0.54	0.44	0.42
350	0.49	0.40	0.38

Fuente: Adaptado del Método ACI.- 211.

Por otra parte, la relación agua-cemento no solo determina los requisitos de resistencia, también factores pertinentes a la durabilidad y propiedades para el acabado del concreto, debido a que este debe ser capaz de soportar aquellas exposiciones severas que puedan despojarlo de su capacidad de servicio, tales como congelación y deshielo, humedecimiento y secado, calentamiento y enfriamiento, agentes anticongelantes, resistencia a la abrasión y sustancias químicas agresivas, que se encuentran presentes para un pavimento rígido.

4.1.8. CALCULO DEL CONTENIDO DE CEMENTO.

Una vez que el contenido de agua de mezclado y la relación agua-cemento han sido determinados, el contenido de cemento por metro cubico de concreto es fácilmente establecido, al dividir el contenido de agua de mezclado entre la relación agua - cemento:

$$\text{Peso Cemento (} P_c \text{)} = \frac{A}{(a/c)}$$

$$\text{Volumen Cemento (} V_c \text{)} = \frac{P_c}{\gamma_c}$$

Donde:

P_c = Peso de cemento (kg/m³).

A = Requerimiento de agua de mezclado (kg/m³).

a/c = Relación agua cemento, por peso.

V_c = Volumen de cemento (lt/m³).

γ_c = Peso específico del cemento (gr/cm³).

4.1.9. ESTIMACIÓN DE LAS PROPORCIONES DE AGREGADOS

Por lo general, la estimación de las proporciones de los agregados está basada en su tamaño máximo y gradación, debido a que la combinación granulométrica total de ambos agregados, finos y gruesos, es de considerable importancia en relación con las propiedades del hormigón, tanto en estado fresco como en estado endurecido.

El Método de dosificación ACI-211 está basado en la expresión b/b_o que fue introducida por primera vez por Richard y Talbot entre 1921 y 1923 en los Estados Unidos de América.

El significado en esta expresión es la siguiente:

- b = Volumen Absoluto o sólido del agregado grueso, por unidad de volumen de concreto.
- b_o = Volumen absoluto o sólido del agregado grueso, por unidad del volumen compactado de agregado grueso.

- b/b_o = Volumen compactado de agregado grueso, por unidad de volumen de concreto.

El valor de b_o se puede calcular a partir de la masa unitaria seca y compactada con varilla del agregado grueso y de su peso específico saturado con superficie seca.

De acuerdo con A.M. Neville, el método A.C.I.-211 aprovecha el hecho de que la relación óptima del volumen seco y compactado del agregado grueso al volumen total del concreto depende únicamente del tamaño máximo del agregado y de la granulometría del agregado fino. En este caso, la forma de las partículas del agregado grueso no entra directamente en la relación, debido a que por ejemplo, el agregado triturado tiene un volumen aparente mayor para un mismo peso (es decir, masa unitaria menor) que un agregado bien redondeado. Por lo tanto, el factor de forma es automáticamente tomado en cuenta en la determinación de la masa unitaria.

En tabla 4.7 se dan los valores de b/b_o en función del tamaño máximo del agregado grueso y del módulo de finura de la arena.

En este método, el peso seco del agregado grueso requerido por m^3 de concreto, es simplemente igual al valor tomado de la tabla 4.7 multiplicado por su PUC en (kg/m^3). De modo que, después de obtener el peso seco del agregado grueso, los pesos de los demás ingredientes han sido estimados, excepto aquel del agregado fino.

TABLA 4.7.

VOLUMEN DE AGREGADO GRUESO POR VOLUMEN UNITARIO DE CONCRETO (b/b_o)

Volumen de agregado grueso ,seco y compactado con varilla (a) por volumen de concreto para diferentes módulos de finura de la arena (b)					
Tamaño máximo Nominal del agregado grueso		Módulo de finura de la arena			
mm	Pulg.	2.40	2.60	2.80	3.00
9.51	$\frac{3}{8}$ "	0.50	0.48	0.46	0.44
12.7	$\frac{1}{2}$ "	0.59	0.57	0.55	0.53
19.0	$\frac{3}{4}$ "	0.66	0.64	0.62	0.60
25.4	1"	0.71	0.69	0.67	0.65
38.1	1 $\frac{1}{2}$ "	0.75	0.73	0.71	0.69
50.8	2"	0.78	0.76	0.74	0.72
76.1	3"	0.82	0.80	0.78	0.76
152.0	6"	0.87	0.85	0.83	0.81

Fuente: Adaptado del Método ACI.- 211.

Pero el método más preciso y preferido es el “Método del volumen Absoluto “ el cual requiere de los conocimientos de los volúmenes absolutos desplazados por los ingredientes; es decir que los volúmenes absolutos de cemento, agua, contenido de aire y agregado grueso son sustraídos del volumen total, y que la diferencia hallada será el volumen absoluto del agregado fino. El volumen absoluto ocupado en el concreto por cada ingrediente es igual a su peso dividido por su peso específico, como se indica en la siguiente expresión:

$$V_i = \frac{P_i}{\gamma_i}$$

Donde:

V_i = Volumen Absoluto del material en (lt/m³).

P_i = Peso seco del material en (kg/m³).

γ_i = Peso específico del ingrediente (para los agregados debe de usarse el peso específico SSS).

Este método es aplicable a mezclas cuyos asentamientos sean al menos de 3 cm y cuando los agregados están bien controlados y gradados en concordancia con la norma ASTM C-33, la cual provee los límites granulométricos para agregado grueso y fino.

4.1.9.1. Estimación del Contenido de Agregado Grueso

El agregado grueso especialmente del mismo tamaño máximo y granulometría, producirá un concreto de mayor trabajabilidad, cuando un volumen dado de agregado grueso seco y compactado sea empleado por unidad de volumen de concreto.

El volumen de agregado grueso por unidad de volumen de concreto (b/bo), depende solamente de su tamaño máximo nominal y del módulo de fineza del agregado fino.

El peso seco del agregado grueso por metro cubico de concreto, en base al volumen seco y compactado del mismo, es igual al valor obtenido de la tabla 4.1, multiplicado por el peso unitario seco y compactado del agregado grueso.

$$\text{Peso Agregado Grueso (} P_{ag} \text{)} = (b/bo) \times \text{PUC}$$

$$\text{Volumen de Agregado Grueso (} V_{ag} \text{)} = \frac{P_{ag}}{\gamma_g}$$

Donde:

P_{ag} = Peso agregado grueso (kg/m³).

b/b_o = Vol. Agr. Grueso/Vol. Unit. Concreto.

PUC = Densidad aparente compacta agregado grueso (kg/m³).

V_{ag} = Volumen de agregado grueso (lt/m³).

γ_g = Peso específico SSS agregado grueso (gr/cm³).

4.1.9.2. Estimación del Contenido de Agregado Fino

El método de los volúmenes absolutos es el procedimiento más exacto para el cálculo de la cantidad de agregado fino por metro cúbico de concreto, implica el empleo de los volúmenes desplazados por los materiales o volúmenes absolutos de los mismos.

En este caso el volumen absoluto del agregado fino es igual a la diferencia entre el volumen unitario de concreto y la suma de los volúmenes absolutos de los materiales ya conocidos (cemento, agua, agregado grueso).

El volumen absoluto ocupado en el concreto por cualquier ingrediente, es igual a su peso, dividido por su peso específico.

$$\text{Volumen de Arena (} V_{af} \text{)} = 1000 - V_c - A - V_{ag}$$

$$\text{Peso del agregado fino (} P_{af} \text{)} = V_{af} \times \gamma_f$$

Donde:

V_{ag} = Volumen de agregado fino (lt/m³).

A = Agua de mezclado (kg/m³).

P_{af} = Peso agregado fino (kg/m³).

γ_g = Peso específico SSS agregado fino (gr/cm³).

4.1.10. AJUSTES POR HUMEDAD DE LOS AGREGADOS.

Debido a que los agregados pétreos presentan cierta porosidad (poros que están conectados a la superficie de las partículas), el agua de mezclado puede ser absorbida

dentro del cuerpo de las partículas. Por otra parte, la superficie de las partículas también puede retener agua formando una película de humedad.

Bajo estas consideraciones, si el agua de mezclado es absorbida por las partículas del agregado, la relación agua-cemento es rebajada y la manejabilidad del concreto reducida. Pero si las partículas del agregado presentan una película de agua sobre su superficie, el contenido de agua de mezclado es incrementado, lo cual conduce a una alta relación agua-cemento y a una alta trabajabilidad, reduciendo la resistencia.

Generalmente los agregados utilizados en la preparación de un concreto se encuentran húmedos por lo cual sus pesos secos se incrementan en el porcentaje de agua que contengan, tanto agua absorbida como superficial. Así el agua de mezclado añadida a la colada, debe ser reducida en una cantidad igual a la humedad libre aportada por los agregados, considerándose como tal el contenido total de humedad del agregado menos su porcentaje de absorción.

Por lo tanto:

$$\text{Peso Húmedo Agregado Grueso (} P_{hg} \text{)} = P_{ag} \times \left(1 + \frac{H_g}{100} \right)$$

$$\text{Peso Húmedo Agregado Fino (} P_{ha} \text{)} = P_{af} \times \left(1 + \frac{H_a}{100} \right)$$

Donde:

H_g = Humedad del agregado grueso (%).

H_a = Humedad del agregado fino (%).

$$\text{Agua corregida al Agregado Grueso (} A_{cg} \text{)} = P_{ag} \times (H_g - A_g)$$

$$\text{Agua corregida al Agregado Fino (} A_{cf} \text{)} = P_{af} \times (H_a - A_a)$$

Donde:

A_g = Absorción del agregado grueso (%).

A_a = Absorción del agregado fino (%).

$$\text{Agua Neta de Mezclado} = A - (A_{cg} + A_{cf})$$

Donde: A = Agua de mezclado inicial (de tabla) (kg/m³).

4.1.11. AJUSTE DE LA MEZCLA DE PRUEBA.

Habiendo estimado las proporciones de todos los ingredientes, el último paso es preparar una mezcla de prueba usando estas cantidades. Para hacer los ajustes pertinentes, el Comité ACI-211 recomienda lo siguiente:

- Verificar las proporciones calculadas de la mezcla por medio de mezclas de prueba preparadas y probadas de acuerdo con la norma A.S.T.M. C 192 (Fabricación y curado de muestras de hormigón para pruebas a flexión y a compresión en el laboratorio), o con mezclas de campo de tamaño completo.
- Verificar el peso unitario y el rendimiento del hormigón (A.S.T.M. C 138) así como el contenido de aire (A.S.T.M. C 138, C 173 o C 231). También debe observarse cuidadosamente que el hormigón posea la trabajabilidad y las propiedades de acabado adecuadas y que esté libre de segregación.

Se deberán hacer los ajustes pertinentes con las proporciones de las mezclas subsecuentes, siguiendo el procedimiento indicado a continuación:

- Se estima de nuevo la cantidad de agua de mezclado necesaria por metro cúbico de hormigón, dividiendo el contenido neto de agua de mezclado de la mezcla de prueba entre el rendimiento de la mezcla de prueba en metros cúbicos.
- Si el asentamiento de la mezcla de prueba no fue el correcto, se debe incrementar o disminuir el contenido de agua estimada en 2 lt/m^3 de concreto por cada incremento o disminución de 1 cm en el asentamiento deseado.
- Se calculan los nuevos pesos de la mezcla partiendo del primer paso, modificando el volumen de agregado grueso, si es necesario, para obtener una trabajabilidad adecuada.

4.2. DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO.

Las mezclas están diseñadas de acuerdo al procediendo del código ACI-211, las características tanto físicas como químicas de los materiales (agregados pétreos, cemento, agua y ceniza) se muestran detalladamente en el Capítulo III.

El agua, el cemento, la ceniza y los áridos, se dosifican en peso.

La adición mineral es calculada como un porcentaje del peso cementante, es decir, se sustituirá un determinado porcentaje de cemento (calculado para la mezcla patrón) por ceniza sin tomar en cuenta la humedad natural presente ya que el valor es mínimo y se pretende reemplazarla en las mismas condiciones que el cemento pese a que presenta menor finura; de acuerdo a estas condiciones se calcula la relación agua- cemento para cada mezcla en función de un parámetro fijo que en este caso será el asentamiento.

Las características de diseño fueron adoptadas de tablas descritas anteriormente.

El procedimiento de cálculo realizado para las diferentes dosificaciones, se detalla en Anexo II, por lo que a continuación se observan los pesos finales de los materiales, tanto en estado seco como húmedo y las proporciones que representa cada uno por m³ de concreto.

4.2.1.. CONCRETO PATRÓN.

PESOS HÚMEDOS DE LOS MATERIALES POR (m³) DE CONCRETO

Materiales	Peso Seco (kg/m³)	Peso Húmedo (kg/m³)
Cemento	350,00	350,00
Agua	205,45	173,54
Grava	1008,61	1034,43
Arena	756,03	790,43
<i>Total</i>	<i>2320,09</i>	<i>2348,40</i>

PROPORCIONES DE MEZCLA

Cemento	Arena	Grava
1,0	2,2	2,9

4.2.2.. CONCRETO CON 2% DE CENIZA DEL PESO CEMENTANTE.

PESOS HÚMEDOS DE LOS MATERIALES POR (m³) DE CONCRETO

Materiales	Peso Seco (kg/m³)	Peso Húmedo (kg/m³)
Cemento	343,00	343,00
Agua	208,89	171,24
Grava	1008,61	1030,69
Arena	753,18	797,01
<i>Total</i>	<i>2313,68</i>	<i>2341,95</i>

PROPORCIONES DE MEZCLA

Cemento	Arena	Grava
1,0	2,2	2,9

4.2.3. CONCRETO CON 4% DE CENIZA DEL PESO CEMENTANTE.

PESOS HÚMEDOS DE LOS MATERIALES POR (m³) DE CONCRETO

Materiales	Peso Seco (kg/m³)	Peso Húmedo (kg/m³)
Cemento	336,00	336,00
Agua	210,00	172,20
Grava	1008,61	1030,69
Arena	756,42	800,44
<i>Total</i>	<i>2311,03</i>	<i>2339,34</i>

PROPORCIONES DE MEZCLA

Cemento	Arena	Grava
1,0	2,3	3,0

4.2.4. CONCRETO CON 6% DE CENIZA DEL PESO CEMENTANTE.

PESOS HÚMEDOS DE LOS MATERIALES POR (m³) DE CONCRETO

Materiales	Peso Seco (kg/m³)	Peso Húmedo (kg/m³)
Cemento	329,01	329,01
Agua	212,21	180,28
Grava	1008,61	1034,43
Arena	756,78	791,21
<i>Total</i>	<i>2306,60</i>	<i>2334,92</i>

PROPORCIONES DE MEZCLA

Cemento	Arena	Grava
1,0	2,3	3,1

4.2.5. CONCRETO CON 15% DE CENIZA DEL PESO CEMENTANTE.

PESOS HÚMEDOS DE LOS MATERIALES POR (m³) DE CONCRETO

Materiales	Peso Seco (kg/m³)	Peso Húmedo (kg/m³)
Cemento	298,00	298,00
Agua	196,68	162,59
Grava	1008,61	1034,43
Arena	824,52	862,03
<i>Total</i>	<i>2327,80</i>	<i>2357,05</i>

PROPORCIONES DE MEZCLA

Cemento	Arena	Grava
1,0	2,8	3,4

4.3. ELABORACIÓN, CURADO Y ROTURA DE PROBETAS Y VIGAS DE CONCRETO.

Una vez determinada la dosificación más conveniente, se procede a la fabricación del concreto en masa. Para ello es necesario, almacenar las materias primas y disponer de instalaciones de dosificación adecuadas, así como del correspondiente equipo de mezclado.

4.3.1. ELABORACIÓN DE PROBETAS Y VIGAS DE PRUEBA

Abarca el procedimiento de preparación de la mezcla de concreto, el mismo que se realizó en el laboratorio de SOBOCE, bajo un control riguroso de pesos de materiales y condiciones de ensayo.

4.3.1.1. Preparación de los materiales

- a) El cemento adquirido fue “El Puente IP-40” de la misma fecha, con el fin de que las muestras sean uniformes durante todos los ensayos, se lo almacenó en un lugar seco y libre de humedad dentro del laboratorio.
- b) Por recomendación, los agregados (grava y arena) fueron humedecidos con agua y removidos por separado 24 horas antes de empezar los ensayos (Figura 4.2)
- c) Los agregados para cada mezcla de concreto estuvieron de acuerdo con la granulometría deseada, además fueron corregidos antes de su empleo, a fin de asegurar una condición de humedad definida y uniforme, esto se realizó con el procedimiento explicado anteriormente.



Figura 4.2. *Preparación de Áridos*

4.3.1.2. Pesaje de los materiales

Todos los materiales fueron pesados en balanzas precisas y sensibles al gramo, acorde con los requisitos exigidos en cuanto a sensibilidad recíproca y tolerancias exigidos por la norma.



Figura 4.3. Balanza para pesaje de materiales

4.3.1.3. Mezclado del concreto

a) El concreto fue elaborado en una mezcladora mediana, la misma que era adecuada para la cantidad de hormigón que se debía preparar, dicha cantidad debía ser suficiente para realizar la prueba de cono, el contenido de aire y el moldeo de probetas y vigas de ensayo.

b) Para tener una idea más clara del proceso de mezclado, a continuación se indica el orden y manera de introducir los materiales a la mezcladora para obtener una mezcla homogénea y satisfactoria:

1.- Se humedece la mezcladora y se introduce primeramente la mitad del agua de mezclado, se añade el agregado grueso y el fino, para que éstos sean mezclados hasta un estado homogéneo.

2.- Se añade el cemento, la ceniza y el agua sobrante para que se distribuya uniformemente en toda la mezcla.

3.- Se controla el tiempo de mezclado, contado a partir del instante en que todos los materiales han sido colocados en la hormigonera que será de 3 minutos, descritos de la siguiente manera: se controlara con un cronometro 2 minutos, se dejara reposar la

mezcla durante 1 minuto y se volverá a encender la mezcladora por 1 minuto más, logrando de este manera una mezcla trabajable y homogénea, sin segregación de los materiales dentro de la mezcla (Figura 4.4).

4.- Se deberá tomar el dato de temperatura en grados centígrados, del cemento, la ceniza, el agua, la mezcla de concreto y la temperatura ambiente; para cada bachada que se realice.

c) El método indicado es un buen parámetro para lograr una mezcla satisfactoria.



Figura 4.4. Proceso de mezclado

4.3.1.4. Consistencia del concreto

a) La consistencia de cada preparación de concreto se midió inmediatamente después de mezclar, realizando el ensayo de asentamiento, utilizando el Cono de Abrams.

b) Todo el concreto empleado para el ensayo de asentamiento es colocado en una fuente para realizar el control del mismo cada 20 minutos durante el lapso de 1 hora (Figura.4.5).



Figura 4.5. Ensayo de Asentamiento

4.3.1.5. Contenido de Aire en el concreto

a) Al igual que la consistencia, el contenido de aire de cada preparación de concreto se midió inmediatamente después de mezclar, realizando el ensayo mediante el presurímetro de vacíos (Figura 4.6).

b) Todo el concreto empleado para el ensayo de contenido de aire es desechado.



Figura 4.6. Presurímetro de Vacíos

4.3.1.6. Características del concreto fresco

Es necesario registrar en tablas (tabla 4.8 a 4.13), la cantidad necesaria de materiales para la dosificación por m^3 de concreto, la temperatura de los materiales, las características visuales de la mezcla de concreto fresco y las pruebas de cono necesarias; estos datos servirán para el análisis de comparación de mezclas en estado fresco, detallado en el Capítulo V.

TABLA 4.8.
CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO PATRÓN

DOSIFICACIÓN DE CONCRETO POR (m^3)				
Material:	Agua	Cemento	Grava	Arena
Procedencia:	Potable	El Puente (IP-40)	Planta Viracocha	Planta Viracocha
Cantidad real de ensayo (kg):	174	350	1034	790
Pesos Específicos (gr/cm^3):	1,00	2,98	2,56	2,59
Absorción del agua (%):	---	---	1,78	1,37
DATOS DE PRUEBA Y TEMPERATURAS		CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO FRESCO		
Asentamiento (cono) (cm.):	6,0	Apariencia :		Pastosa
Aire contenido (%):	1,8	Consistencia:		Semi-seca
Temp. Ambiente ($^{\circ}C$):	7,9	Acabado :		Bueno

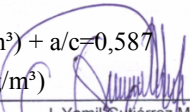
Temp. Hormigón (°C):	12,6	Varilleo :	Bueno	
Temp. Cemento (°C):	13,0	Exudación :	No	
Temp. Agua (°C):	11,1	Peso específico (gr/cm³):	2,33	
Peso Concreto (kg):	19,9	Fecha y hora de ensayo:	15-Jul-10	
Relación (a/c) real (s/u):	0,587		10:00 a.m.	
PRUEBAS DE CONO				
Tiempo:	Hrs:	Cono:	Temp. Hº (°C)	Temp. Amb.(°C)
0 min:	10:00	6,00	12,60	7,90
20 min:	10:20	5,00	12,50	8,10
40 min:	10:40	4,00	11,00	8,20
60 min:	11:00	3,00	10,50	8,20
<u>Observaciones:</u>				
– Dosificación N° 1: Concreto 270 (Kg/m³) + a/c=0,587				
– Cantidad de Cemento utilizada: 350 (kg/m³)				
 J. Yamir Gutiérrez M. Supervisor de Laboratorio SOBOCE S.A.				

TABLA 4.9.

CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO CON 2% DE CENIZA DEL PESO CEMENTANTE.

DOSIFICACIÓN DE CONCRETO POR (m³)					
Material:	Agua	Cemento	Ceniza	Grava	Arena
Procedencia:	Potable	El Puente (IP-40)	I.A.B.S.A.	Planta Viracocha	Planta Viracocha
Cantidad real de ensayo (kg):	171	343	7	1031	797
Pesos Específicos (gr/cm³):	1,00	2,98	2,11	2,56	2,59
Absorción del agua (%):	---	---	1,06	1,78	1,37
DATOS DE PRUEBA Y TEMPERATURAS		CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO FRESCO			
Asentamiento (cono) (cm.):	6,0	Apariencia :		Pastosa	
Aire contenido (%):	1,7	Consistencia:		Semi seca	
Temp. Ambiente (°C):	18,3	Acabado :		Bueno	
Temp. Hormigón (°C):	16,6	Varilleo :		Bueno	
Temp. Cemento (°C):	17,2	Exudación :		No	
Temp. Agua (°C):	14,2	Peso Concreto (kg):		19,87	
Temp. Ceniza (°C):	16,50	Peso específico (gr/cm³):		2,32	
Relación (a/c) inicial (s/u):	0,587	Fecha y hora de ensayo:		24-Ago-10	
Relación (a/c) real (s/u):	0,609			10:40 a.m.	
	PRUEBAS DE CONO				
	Tiempo:	Hrs:	Cono:	Temp. H° (°C)	Temp. Amb.(°C)
	0 min:	10:40	6,00	18,70	18,30
	20 min:	11:00	5,00	18,70	18,50
	40 min:	11:20	4,00	18,30	18,60
	60 min:	11:40	3,00	18,00	18,60

Observaciones:

- **Dosificación N° 2:** Concreto 270 (Kg/m³) + Ceniza 2% + a/c=0,609
- Cantidad de Cemento utilizada: 343 (kg/m³)
- Adición solida: Ceniza de caña de azúcar en 2% del valor cementante.

J. Yamil Gutiérrez M.
Supervisor de Laboratorio
SOBOCE S.A.

TABLA 4.10.

CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO CON 4% DE CENIZA DEL PESO CEMENTANTE.

DOSIFICACIÓN DE CONCRETO POR (m³)					
Material:	Agua	Cemento	Ceniza	Grava	Arena
Procedencia:	Potable	El Puente (IP-40)	I.A.B.S.A.	Planta Viracocha	Planta Viracocha
Cantidad real de ensayo (kg):	172	336	14	1031	800
Pesos Específicos (gr/cm³):	1,00	2,98	2,11	2,56	2,59
Absorción del agua (%):	---	---	1,06	1,78	1,37
DATOS DE PRUEBA Y TEMPERATURAS		CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO FRESCO			
Asentamiento (cono) (cm.):	6,0	Apariencia :			Pastosa
Aire contenido (%):	1,8	Consistencia:			Semi seca
Temp. Ambiente (°C):	20,6	Acabado :			Bueno
Temp. Hormigón (°C):	17,2	Varilleo :			Bueno
Temp. Cemento (°C):	18,7	Exudación :			No
Temp. Agua (°C):	15,1	Peso Concreto (kg):			20,00
Temp. Ceniza (°C):	17,80	Peso específico (gr/cm³):			2,34
Relación (a/c) inicial (s/u):	0,609	Fecha y hora de ensayo:			24-Ago-10
Relación (a/c) real (s/u):	0,625				15:30 p.m.
	PRUEBAS DE CONO				
	Tiempo:	Hrs:	Cono:	Temp. H° (°C)	Temp. Amb.(°C)
	0 min:	15:30	6,00	17,20	20,60
	20 min:	15:50	5,00	17,10	20,00
	40 min:	16:10	4,00	16,60	20,00
	60 min:	16:30	3,00	16,10	20,00

Observaciones:

- **Dosificación N° 3:** Concreto 270 (Kg/m³) + Ceniza 4% + a/c=0,625
- Cantidad de Cemento utilizada: 336 (kg/m³)
- Adición solida: Ceniza de caña de azúcar en 4% del valor cementante.

J. Yamil Gutiérrez M.
Supervisor de Laboratorio
SOBOCE S.A.

TABLA 4.11.

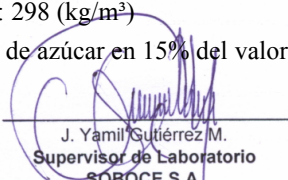
CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO CON 6% DE CENIZA DEL PESO CEMENTANTE.

DOSIFICACIÓN DE CONCRETO POR (m³)					
Material:	Agua	Cemento	Ceniza	Grava	Arena
Procedencia:	Potable	El Puente (IP-40)	I.A.B.S.A.	Planta Viracocha	Planta Viracocha
Cantidad real de ensayo (kg):	180	329	21	1034	791
Pesos Específicos (gr/cm³):	1,00	2,98	2,11	2,56	2,59
Absorción del agua (%):	---	---	1,06	1,78	1,37
DATOS DE PRUEBA Y TEMPERATURAS		CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO FRESCO			
Asentamiento (cono) (cm.):	6,0	Apariencia :		Pastosa	
Aire contenido (%):	1,6	Consistencia:		Semi seca	
Temp. Ambiente (°C):	10,5	Acabado :		Bueno	
Temp. Hormigón (°C):	13,0	Varilleo :		Bueno	
Temp. Cemento (°C):	10,2	Exudación :		No	
Temp. Agua (°C):	10,1	Peso Concreto (kg):		19,98	
Temp. Ceniza (°C):	10,40	Peso especifico (gr/cm³):		2,34	
Relación (a/c) inicial (s/u):	0,625	Fecha y hora de ensayo:		26-Jul-10	
Relación (a/c) real (s/u):	0,645			10:00 a.m.	
	PRUEBAS DE CONO				
	Tiempo:	Hrs:	Cono:	Temp. H° (°C)	Temp. Amb.(°C)
	0 min:	10:00	6,00	13,00	10,50
	20 min:	10:20	5,00	13,00	10,60
	40 min:	10:40	4,00	12,50	10,70
	60 min:	11:00	3,00	11,70	10,80
<u>Observaciones:</u>					
- Dosificación N° 4: Concreto 270 (Kg/m³) + Ceniza 6% + a/c=0,645					
- Cantidad de Cemento utilizada: 329 (kg/m³)					
- Adición solida: Ceniza de caña de azúcar en 6% del valor cementante.					
J. Yamil Gutiérrez M. Supervisor de Laboratorio SOBOCE S.A.					

TABLA 4.12.

CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO CON 15% DE CENIZA DEL PESO CEMENTANTE.

DOSIFICACIÓN DE CONCRETO POR (m³)					
Material:	Agua	Cemento	Ceniza	Grava	Arena
Procedencia:	Potable	El Puente (IP-40)	I.A.B.S.A.	Planta Viracocha	Planta Viracocha
Cantidad real de ensayo (kg):	174	298	53	1034	790
Pesos Específicos (gr/cm³):	1,00	2,98	2,11	2,56	2,59
Absorción del agua (%):	---	---	1,06	1,78	1,37
DATOS DE PRUEBA Y TEMPERATURAS		CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO FRESCO			
Asentamiento (cono) (cm.):	6,0	Apariencia :		Pastosa	
Aire contenido (%):	1,8	Consistencia:		Blanda	

Temp. Ambiente (°C):	12,6	Acabado :	Bueno	
Temp. Hormigón (°C):	11,0	Varilleo :	Bueno	
Temp. Cemento (°C):	8,8	Exudación :	Si	
Temp. Agua (°C):	12,5	Peso Concreto (kg):	19,85	
Temp. Ceniza (°C):	11,80	Peso específico (gr/cm³):	2,32	
Relación (a/c) inicial (s/u):	0,645	Fecha y hora de ensayo:	20-Jul-10	
Relación (a/c) real (s/u):	0,660		14:18 p.m.	
PRUEBAS DE CONO				
Tiempo:	Hrs:	Cono:	Temp. H° (°C)	Temp. Amb.(°C)
0 min:	14:18	6,00	11,00	12,60
20 min:	14:38	5,00	11,00	14,40
40 min:	14:58	4,00	11,00	15,30
60 min:	15:18	3,00	10,50	15,00
Observaciones:				
- Dosificación N° 5: Concreto 270 (Kg/m³) + Ceniza 15% + a/c=0,660				
- Cantidad de Cemento utilizada: 298 (kg/m³)				
- Adición solida: Ceniza de caña de azúcar en 15% del valor cementante.				
 J. Yamil Gutiérrez M. Supervisor de Laboratorio SOBOCE S.A.				

Nota: Las muestras a ser vaciadas con estas dosificaciones, corresponden a humedades naturales de los agregados obtenidas en laboratorio antes de realizar su elaboración y la muestra de ceniza es agregada sin humedad al concreto.

4.3.1.7. Número de probetas y vigas de prueba

Para cada condición de ensayo se prepararon un número igual de probetas y vigas, como base para obtener resultados de compresión y flexo-tracción, que sirven para el control de la dosificación y resistencia del concreto a diferentes edades (3, 7, 14, 28 y 60 días).

Para cada mezcla se realizó un número de diez probetas y diez vigas es decir que por cada edad se realizara la rotura de dos probetas y dos vigas simultáneamente.

4.3.1.8. Probetas para el ensayo de compresión

a) Forma y dimensiones.- Las probetas para el ensayo de compresión son de forma cilíndrica con una longitud igual a dos veces el diámetro. Las probetas cilíndricas Standard son de 15cm de diámetro y 30cm de alto para concreto con agregado grueso de tamaño nominal inferior a 2" (Figura 4.7).

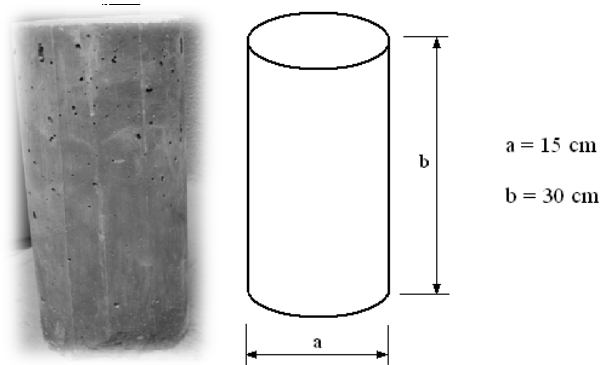


Figura 4.7. Forma y Dimensiones de la Probeta

b) Moldes para probetas

Los moldes para las probetas cilíndricas de ensayo, son de metal y están provistos de una placa metálica lisa y plana. El interior del molde y la placa metálica de la base se cubren con una capa delgada de aceite mineral o grasa antes de preparar cada cilindro de concreto, para evitar la mezcla se pegue al molde cuando comience su fraguado (Figura 4.8).



Figura 4.8. Molde para Probeta Cilíndrica

c) Procedimiento de vaciado y realización

- Los cilindros de ensayo son preparados colocando el concreto en el molde en 3 capas de aproximadamente igual volumen.
- Al colocar la mezcla en cada capa se debe observar que esta sea lo más homogénea posible.
- Cada capa se debe varillar 25 veces con una barra metálica de 5/8" de diámetro y 60cm de largo con punta redondeada (Figura 4.9).

- Los golpes son distribuidos uniformemente sobre la sección y de manera que penetren apenas en la capa de abajo, o en todo su espesor, si es la inferior. Después que la capa superior ha sido varillada, la superficie de la probeta debe ser alisada lo más uniforme posible con la varilla y luego con una plancha.
- Los cilindros de ensayo se remueven de los moldes 24 horas después de su preparación y son sumergidos en una piscina para su curado, a una temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 1$ hasta el momento de su rotura.



Figura 4.9. Rrealización de probetas

4.3.1.9. Vigas para el ensayo de flexo-tracción

a) Forma y dimensiones

Las vigas de flexo-tracción tienen una forma prismática de sección $a \times a$, como se muestra en la figura 4.10

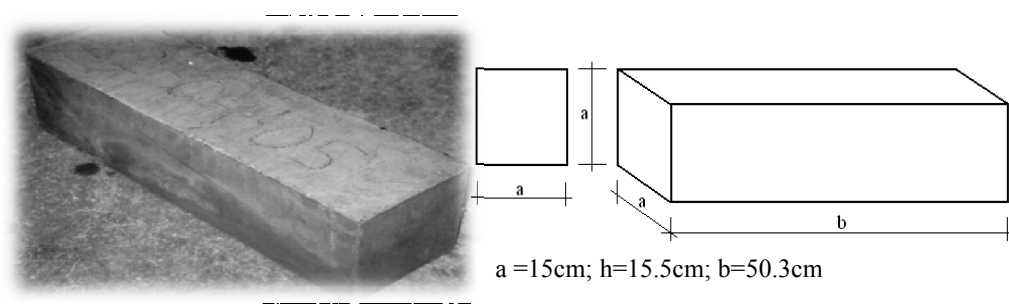


Figura 4.10. Forma y Dimensiones de la Viga

b) Moldes para vigas

Los moldes para las probetas de ensayo a la flexo-tracción son de metal rígido (plancha), no absorbentes y por lo menos 2 pulgadas mayores que la longitud de luz requerida por el ensayo de rotura.

Se asegura el molde a la placa metálica de la base con tornillos y perfiles. El molde y la placa de la base armados son herméticos y se cubren interiormente con una capa delgada de aceite mineral o grasa antes de su uso, para evitar que la mezcla se pegue al molde cuando comience a fraguar (Figura 4.11).

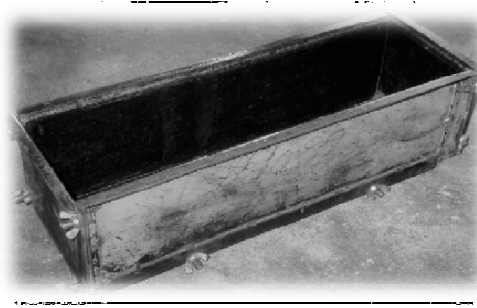


Figura 4.11. Molde para Viga

c) Procedimiento de vaciado y realización

- La viga de ensayo está formada con su eje longitudinal en posición horizontal.
- El hormigón es colocado en capas de aproximadamente 3 pulgadas de espesor y cada capa se golpea y penetra con una barra metálica 50 veces por cada pie cuadrado (0.30m x 0.30m) de superficie.
- Para la capa superior el molde deberá llenarse en exceso, hasta sobrepasarlo y garantizar la cantidad necesaria para la viga.
- Cada capa es golpeada y penetrada con la barra, el hormigón es enrasado a lo largo de los 4 lados guiándose por los bordes del molde.
- Los costados de los moldes se golpean con un combo de goma para cerrar los vacíos existentes.
- Después de completar las operaciones de consolidación indicadas antes, la capa superior o final se debe nivelar con una regla metálica y el alisado final se hace con una plancha metálica (Figura 4.12).

- Las vigas de ensayo se remueven de los moldes 48 horas después de su preparación y son sumergidas en una piscina para su curado, a una temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 1$ hasta el momento de su rotura.



Figura 4.12. Realización de vigas

4.3.2. CURADO DE PROBETAS Y VIGAS DE PRUEBA

De las operaciones necesarias para la ejecución de elementos de hormigón, posiblemente sea el curado la más importante, por la influencia decisiva que tiene en la resistencia y demás cualidades del elemento final.

El proceso de curado tanto de probetas como de vigas fue realizado en la sala de curado del laboratorio de SOBOCE. Se trata de un proceso simple de sumersión en las piscinas de curado, que se realiza inmediatamente después de remover las vigas o en su caso, las probetas de sus respectivos moldes. Se debe tener mucho cuidado de no golpear las probetas en el proceso ya que éstas siguen en un estado muy frágil y esto puede llegar a incidir en su futura resistencia.

Se sumergen las vigas o probetas completamente y en lo posible, en un orden tal que faciliten su posterior extracción de las piscinas, con el fin de no golpear o entorpecer el proceso de curado de las demás muestras (Figura 4.13).

Este proceso es de suma importancia, debido a que un buen curado aporta de gran manera a alcanzar las resistencias requeridas, por tanto agua de curado es agua potable, que cumple con los requisitos exigidos por la norma.

Esta sala contiene dos piscinas atemperadas, es decir se mantiene a una temperatura constante de $23^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ y es supervisada diariamente por un técnico de laboratorio.



Figura 4.13. Sala de Curado de muestras.

4.3.3. ENSAYOS DE ROTURA

4.3.3.1. Rotura de Probetas a Compresión

De acuerdo a edades ya establecidas, se realiza el ensayo a compresión de las probetas cilíndricas según la Norma ASTM C39 AASTHO T22.

a) Objeto

Este método abarca el procedimiento para los ensayos de compresión de cilindros de hormigón.

b) Equipo

Este ensayo se lo realiza en el laboratorio de SOBOCE, mediante una prensa que tiene la rigidez suficiente para resistir los esfuerzos del ensayo sin alterar las condiciones de distribución y ubicación de la carga y lectura de los resultados. Tiene un sistema de rótula que permite hacer coincidir la resultante de la carga aplicada con el eje de la probeta. Las superficies de aplicación de las cargas son lisas y planas. El diámetro de las placas de carga es igual que el diámetro de la probetas.

c) Procedimiento

- La placa inferior de apoyo se coloca sobre la platina de la Máquina de Ensayo directamente debajo de la placa superior de alojamiento esférico.

- Después de limpiar la cara de apoyo se coloca la probeta de ensayo sobre ella. El eje de la probeta se alinea en forma cuidadosa con el centro de empuje de la placa de alojamiento esférico.
- A medida que la placa superior es traída en contacto con la probeta, su porción movable se hace girar a mano en forma suave de modo de obtener un apoyo uniforme.
- La carga se aplica continuamente, sin sacudidas o choques a una velocidad constante entre 1.4 a 2.1 Kg. /cm² por segundo. Durante la aplicación de la primera mitad de la carga máxima se permite una velocidad mayor de aplicación de la carga.
- La carga se aumenta hasta que la probeta se rompe y se anota la carga máxima llevada por el hormigón durante el ensayo, así como el tipo de rotura y la apariencia del hormigón (Figura 4.14).

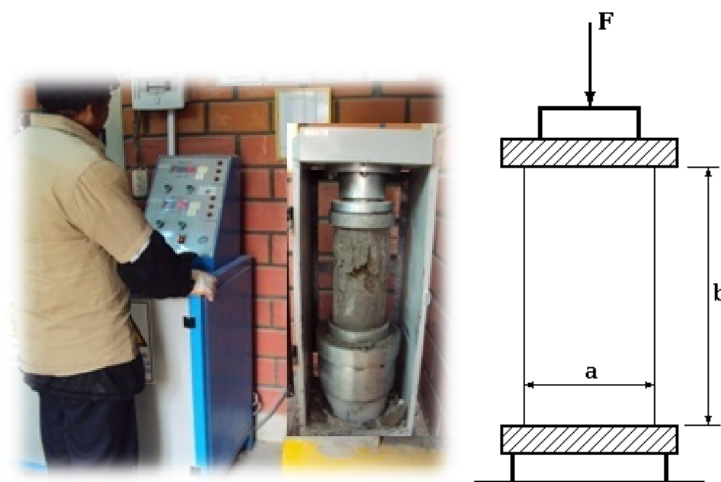


Figura 4.14. Ensayo de Resistencia a Compresión Simple en Probetas.

d) Cálculos

Se mide el diámetro (a) y la altura (b) de la probeta, además se la debe pesar antes de colocarla a la prensa para realizar su rotura.

Una vez rota la probeta se registra la carga máxima (P), expresada en KN.

Finalmente se calcula la resistencia a la compresión como la tensión de rotura según la siguiente fórmula:

$$R_c = \frac{102 \times P}{A}$$

Donde:

R_c = Resistencia media a compresión (Kg/cm²).

P = Carga máxima aplicada (KN)

102 = Factor de conversión (KN a Kg).

A = Área de la sección de ensayo (cm²).

4.3.3.2. Rotura de Vigas a flexo-tracción.

De acuerdo a edades ya establecidas, se realiza paralelamente al ensayo de compresión el ensayo de flexo-tracción a vigas rectangulares simplemente apoyadas según la Norma ASTM C78 AASTHO T97 y T77.

a) Objeto

Este método de ensayo abarca el procedimiento para determinar la resistencia a la flexión del hormigón por el uso de una simple viga (de 15cm x 15.3cm de sección y 50.7cm como mínimo de longitud) cuando se aplica la carga en los puntos tercios de la longitud efectiva.

b) Equipo

La prensa para el ensayo de flexo-tracción cuenta con piezas para apoyo de las vigas y piezas para aplicar la carga, con sus correspondientes accesorios, los que cumplen con los siguientes requisitos:

- Los elementos de contacto con la viga tienen la superficie cilíndrica (de este modo se logra un contacto rectilíneo).
- Se aplica la carga y sus reacciones en forma vertical están dispuestas de modo que las líneas de contacto son paralelas entre si y perpendiculares a la luz de ensayo.
- Cuenta con accesorios que permiten fijar y mantener la luz de ensayo.
- Tiene rotulas regulables, a fin de evitar excentricidades y una regla graduada de 1m de longitud.

c) Procedimiento

- Las vigas se rompen a flexión mediante la aplicación de dos cargas iguales y simétricas, colocadas a los tercios de la luz (Fig.4.15).

- El mecanismo para la aplicación de la carga se compone de dos rodillos de acero de 20mm de diámetro, y otros dos para el apoyo de la viga.
- Es importante que las vigas se apoyen y reciban la carga sobre las dos caras laterales que estuvieron en contacto con el molde; primero, porque así no es necesario alisarlas; y segundo, porque se elimina la influencia de la distinta compacidad del concreto junto al fondo y en la superficie.
- La carga puede aplicarse de forma continua sin choques bruscos, a velocidad normal de 30 Kg/cm² hasta un 50% de la carga de rotura aproximadamente, después de lo cual se aplicará una velocidad menor de 10.5 Kg/cm² por minuto.

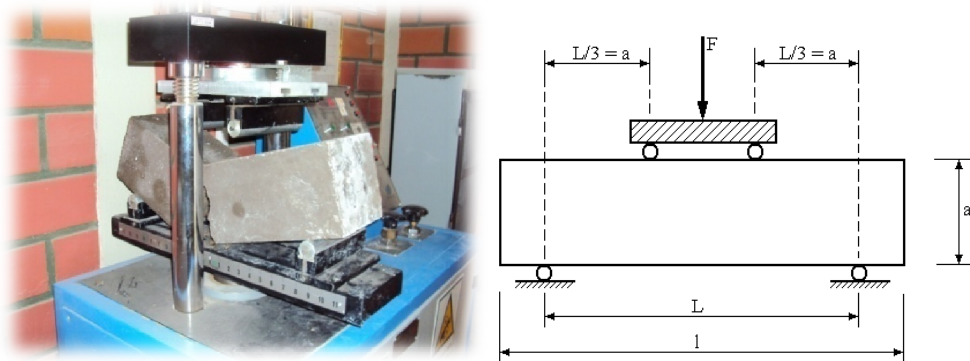


Figura 4.15. Ensayo de Flexo-tracción en Vigas.

d) Cálculos

Se calcula la resistencia a flexo-tracción como la tensión a rotura según la siguiente fórmula:

$$R_{FT} = \frac{102 \times P \times L}{b \times h^2}$$

Donde:

R_{FT} = Resistencia a Flexo-tracción (Kg/cm²).

P = Carga máxima aplicada (KN).

L = Longitud efectiva de la viga (45.00 cm).

b = Ancho de la viga (15.30 cm).

h = Altura de la viga (15.00 cm).

Si la rotura ocurre fuera del tercio central de la luz libre a una distancia mayor del 5% de la luz libre, los resultados del ensayo serán descartados.

4.3.4. DIAGRAMAS DE BARRAS.

A continuación, mediante diagramas de barras se realiza una comparación grafica entre las resistencias medias a compresión y flexo-tracción presentadas por cada una de las pruebas a la misma edad; todas las planillas que contienen los datos de roturas tanto de probetas como vigas, y su correspondiente cálculo y resultado para la resistencia se detallan en el anexo IV.

DIAGRAMA DE BARRAS N°1

COMPARACIÓN ENTRE RESISTENCIAS A COMPRESIÓN A LOS 3 DÍAS

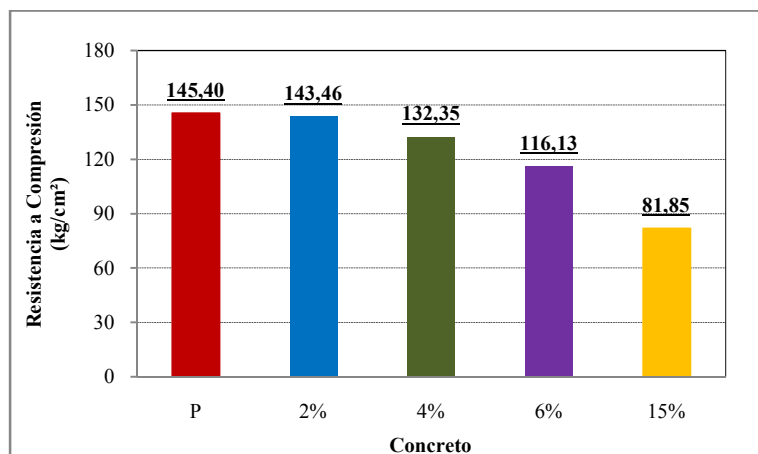


DIAGRAMA DE BARRAS N°2

COMPARACIÓN ENTRE RESISTENCIAS A COMPRESIÓN A LOS 7 DÍAS

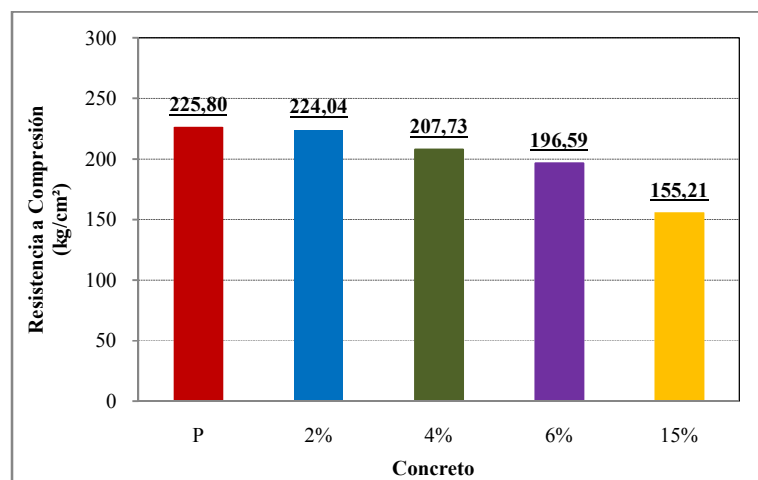


DIAGRAMA DE BARRAS N°3
COMPARACIÓN ENTRE RESISTENCIAS A COMPRESIÓN A LOS 14 DÍAS

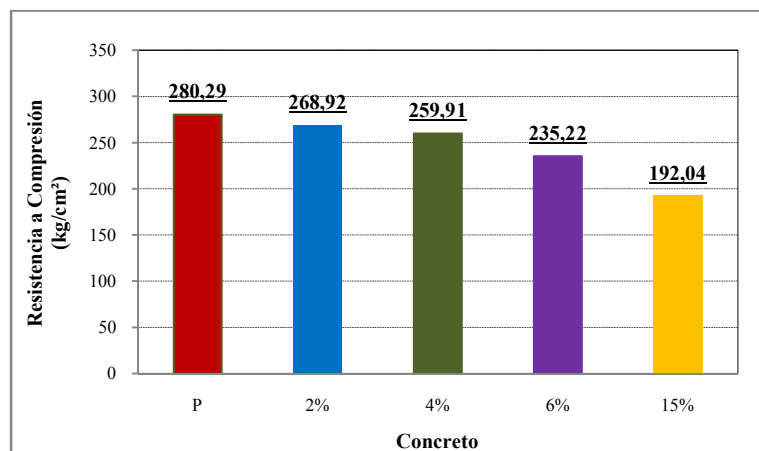


DIAGRAMA DE BARRAS N°4
COMPARACIÓN ENTRE RESISTENCIAS A COMPRESIÓN A LOS 28 DÍAS

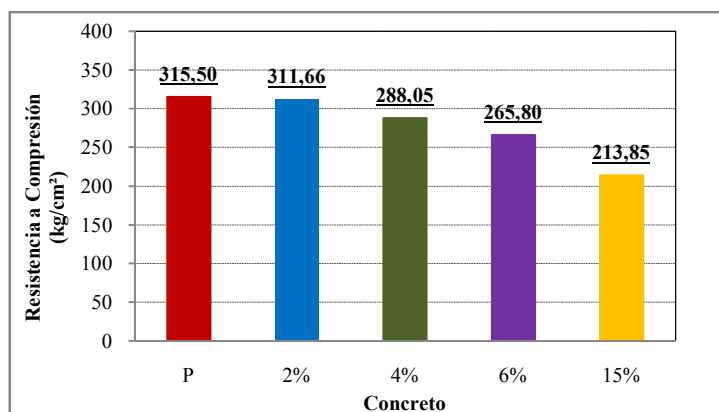


DIAGRAMA DE BARRAS N°5
COMPARACIÓN ENTRE RESISTENCIAS A COMPRESIÓN A LOS 60 DÍAS

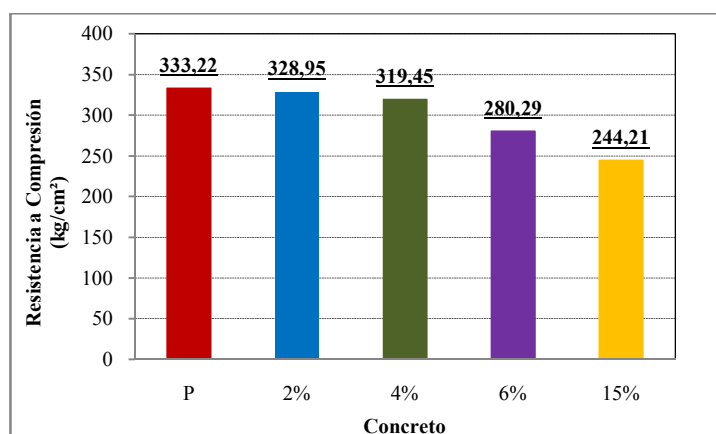


DIAGRAMA DE BARRAS N°6

RESISTENCIAS MEDIAS OBTENIDAS A COMPRESIÓN EN EL CONCRETO

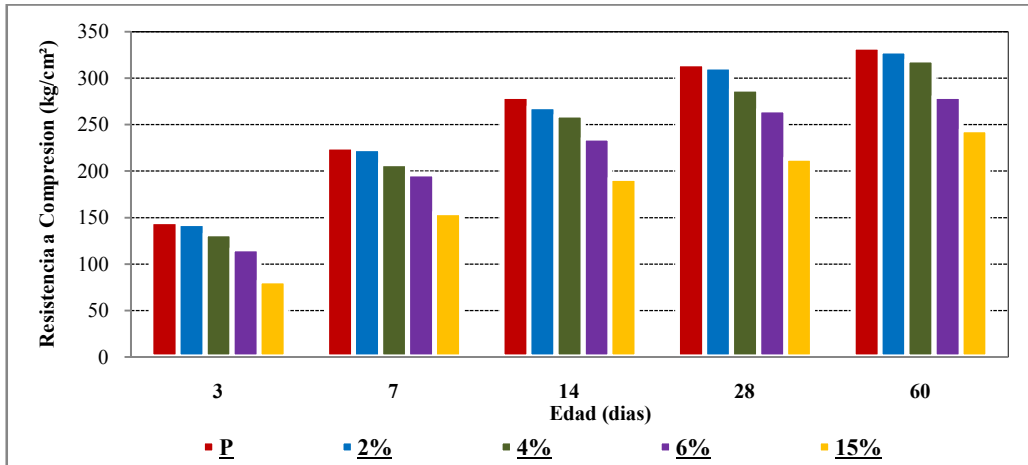


DIAGRAMA DE BARRAS N°7

COMPARACIÓN ENTRE RESISTENCIAS A FLEXO-TRACCION A LOS 3 DÍAS

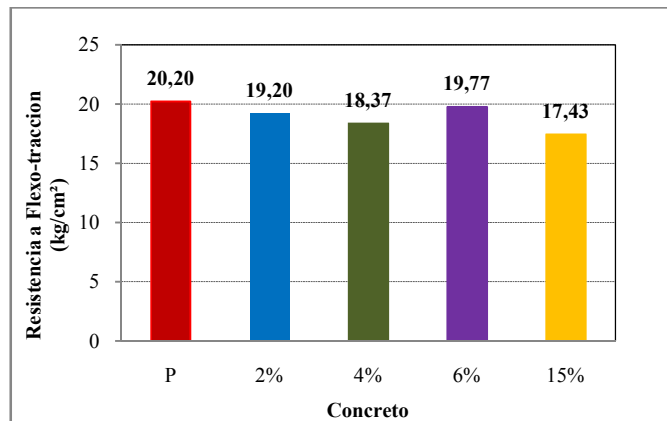


DIAGRAMA DE BARRAS N°8

COMPARACIÓN ENTRE RESISTENCIAS A FLEXO-TRACCION A LOS 7 DÍAS

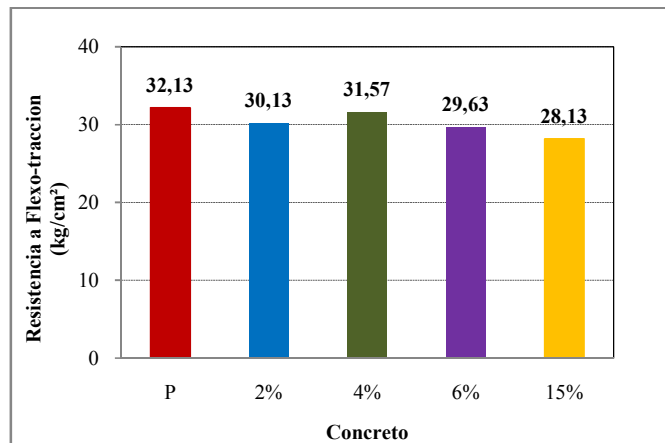


DIAGRAMA DE BARRAS N°9
COMPARACIÓN ENTRE RESISTENCIAS A FLEJO-TRACCION A LOS 14 DÍAS

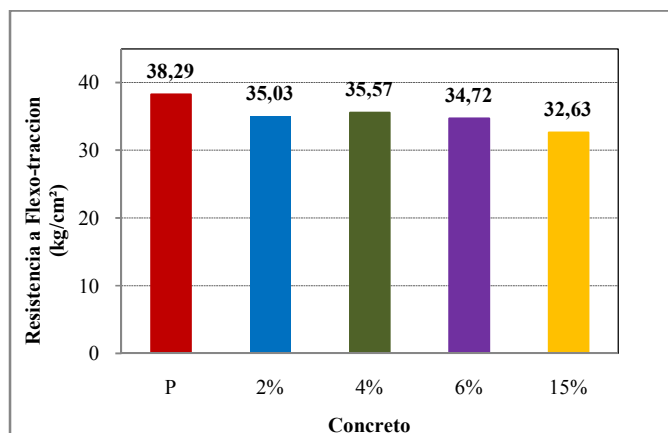


DIAGRAMA DE BARRAS N°10
COMPARACIÓN ENTRE RESISTENCIAS A FLEJO-TRACCION A LOS 28 DÍAS

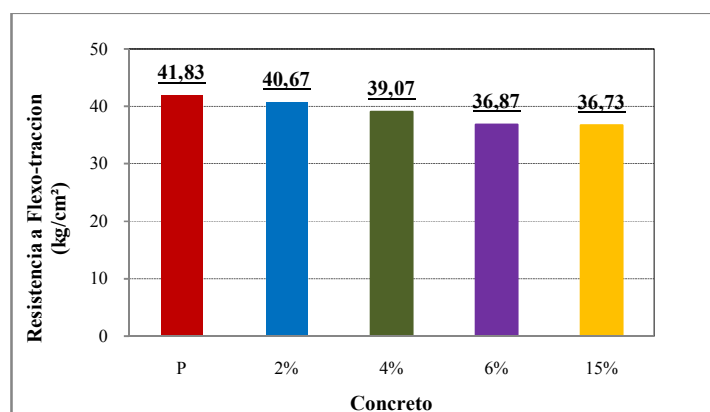


DIAGRAMA DE BARRAS N°11
COMPARACIÓN ENTRE RESISTENCIAS A FLEJO-TRACCION A LOS 60 DÍAS

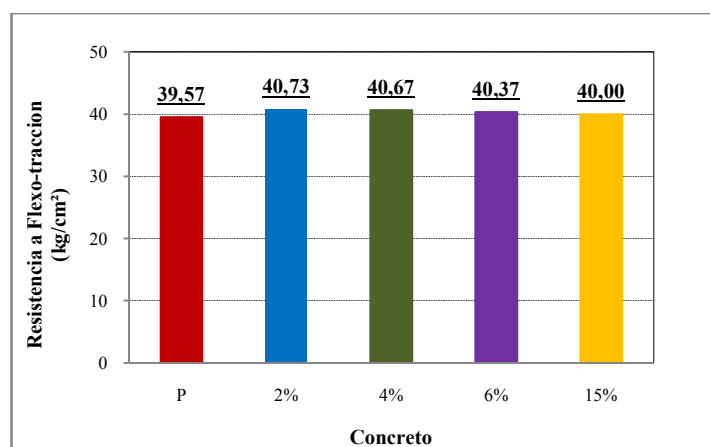
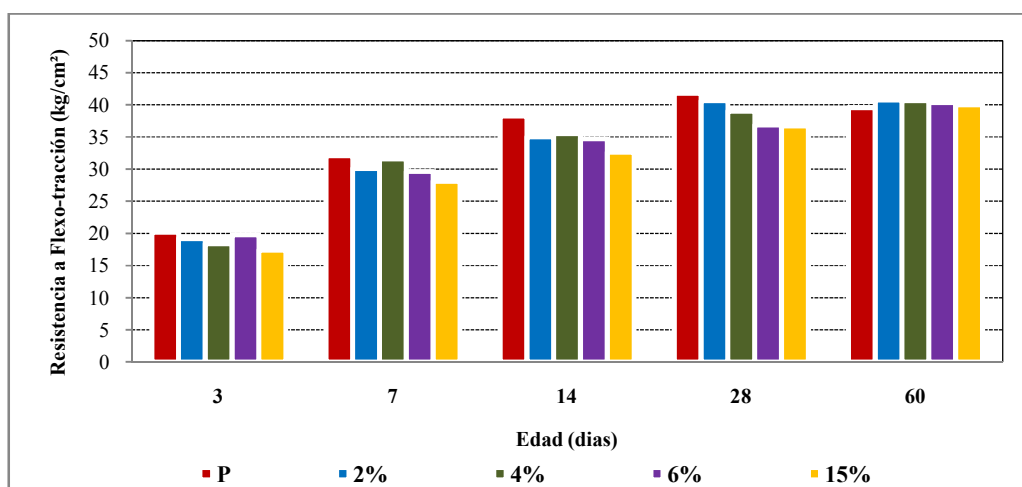


DIAGRAMA DE BARRAS N°12
RESISTENCIAS OBTENIDAS A FLEXO-TRACCION EN EL CONCRETO



5.1 ANÁLISIS METODOLÓGICO Y COMPARATIVO

El análisis metodológico que se realizará en el presente proyecto adoptará un carácter principalmente de relación y comparación, entre el comportamiento del concreto ante la resistencia a compresión y flexo- tracción y las características de sus componentes.

Los parámetros de análisis para dicho estudio se definen cuidadosamente en el apartado (5.3), para posteriormente definir conclusiones del análisis realizado y los resultados obtenidos.

Para el presente estudio se determina tres variables bien definidas, que son:

- Resistencia a compresión del concreto.
- Resistencia a flexo-tracción del concreto.
- Edad del concreto

Relacionando estas variables, se obtendrá gráficos y ábacos consistentes en curvas ajustadas, que darán una idea real de cuál es el comportamiento de las diferentes mezclas de concreto, al tener una idea clara de dicho comportamiento, se podrá compararlo con los parámetros de estudio definidos en apartado 5.3.

Se adopta una metodología de relación y comparación por ser práctica y demostrativa, logrando así un mejor entendimiento del comportamiento del concreto con diferentes porcentajes de ceniza de caña de azúcar, ante esfuerzos de compresión y flexo-tracción que son medidos en diferentes edades.

5.2 . CONTROL ESTADÍSTICO DE RESULTADOS

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

El uso de los diferentes métodos que nos proporciona la estadística es general, por lo que la rama de la Ingeniería Civil, ciencia en la que el profesional encargado de diseñar, construir, controlar la calidad de los materiales a utilizar en una determinada obra; no puede dejar de hacer uso de estos métodos, ya que los mismos le permiten contar con una herramienta de control y toma de decisiones.

En este trabajo de investigación, no se pretende describir ampliamente estos métodos; sino, se trata de exponer en forma resumida algunas definiciones y métodos que se utilizarán en los siguientes capítulos que permitan interpretar correctamente los resultados y valores obtenidos en el presente trabajo.

5.2.1 MEDIDAS DESCRIPTIVAS

5.2.1.1 Muestra

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

5.2.1.2 Media aritmética ($\bar{x}$)

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

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

Donde:

$\bar{x}$ = Media aritmética

5.2.1.3 Desviación estándar (S)

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

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

Para > 30 datos

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

Para < 30 datos

5.2.1.4 Varianza ($V(x)$)

La varianza de un conjunto de valores se define, como el promedio de los desvíos al cuadrado con respecto a su media.

$$V(x) = S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n} \quad (5.4)$$

5.2.1.5 Coeficiente de variación (CV)

El coeficiente de variación se define como la variación entre la desviación estándar y la media.

$$CV = \frac{S}{x} * 100...[\%] \quad (5.5)$$

5.2.2 AJUSTE DE CURVAS Y EL MÉTODO DE MÍNIMOS CUADRADOS.

5.2.2.1 Relación entre variables

En los capítulos siguientes, dentro del proceso de análisis de los resultados, encontraremos con frecuencia la relación existente entre dos variables, por ejemplo, datos de resistencia a compresión o flexo-tracción del concreto vs. datos de edad del concreto; esto hace necesario que las mismas sean expresadas en forma matemática determinando una ecuación que conecte a las variables para una mayor interpretación de las mismas.

5.2.2.2 Ajuste de curvas

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

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

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

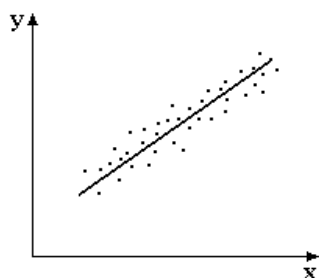


Figura 5.1 Aproximación Lineal

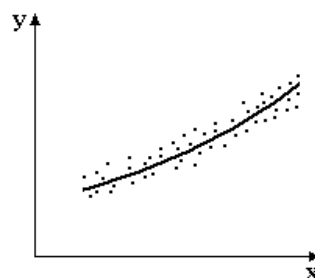


Figura 5.2 Aproximación no Lineal

5.2.2.3 Ecuaciones de curvas apróximantes

Varios tipos comunes de curvas apróximantes y sus ecuaciones se presentan en la lista adjunta para facilitar posteriores referencias. Todas las letras excepto la “x” e “y” representan constantes. Las variables “x” e “y” se llaman independiente y dependiente, respectivamente, aunque estos papeles se pueden intercambiar.

- | | |
|------------------------|-------------------|
| 1) $y = a + bx$ | Línea recta |
| 2) $y = a + bx + cx^2$ | Curva cuadrática |
| 3) $y = ab^x$ | Curva exponencial |
| 5) $y = a + b \ln(x)$ | Curva Logarítmica |

De las ecuaciones de curvas presentadas, se pondrá mayor interés en la ecuación N° 5 (Curva Logarítmica); en ésta ecuación “y” representa “R”, que es la resistencia de las probetas y vigas de concreto, “x” representa la edad del concreto (Variables), a y b son parámetros o constantes a ser estimados.

5.2.2.4 Método de los mínimos cuadrados

La función básica y estimadora de la recta es:

$$y_i = a + bx_i \quad (5.6) \quad \text{Es:} \quad Y_i = \alpha + \beta X_i \quad (5.7)$$

Para esto habrá que escoger un conjunto de datos respecto a los valores de “x” e “y” y tener una tabla como la siguiente:

x_i	x_1	x_2	x_3	...	...	x_n
y_i	y_1	y_2	y_3	...	...	y_n

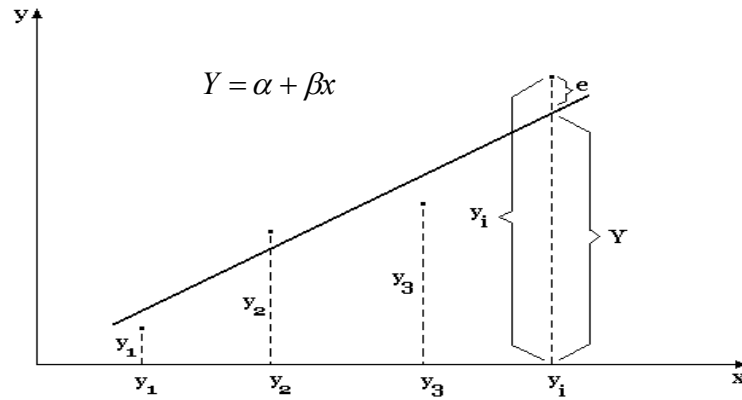


Figura. 5.3. Gráfica Base “Mínimos Cuadrados”

Para un valor de x_i el valor observado es y_i , en general no coincidirá con el valor estimado Y_i , su diferencia se llama error de estimación, es decir:

$$\text{Error de estimación} = \text{Valor observado} - \text{Valor estimado}$$

$$e_i = y_i - Y_i \quad (5.8)$$

El criterio más empleado para calcular la recta estimada es el criterio llamado de los **Mínimos Cuadrados**, y consiste en elegir la recta que haga mínima la suma de los cuadrados de los errores de estimación:

$$e_i = y_i - \alpha - \beta x_i \quad (5.9)$$

$$\sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \alpha - \beta x_i)^2 \quad (5.10)$$

Se trata de calcular los valores de α y β que haga mínima la suma anterior; para esto, se halla las derivadas parciales respecto a α y β , igualamos a cero y se ve un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas.

En resumen, los parámetros de $\hat{\alpha}$ y $\hat{\beta}$ se los determina con las siguientes ecuaciones:

$$\alpha = \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right) \left(\sum_{i=1}^n y_i \right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n x_i y_i \right)}{n \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (5.11)$$

$$\beta = \frac{n \left(\sum_{i=1}^n x_i y_i \right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)}{n \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (5.12)$$

5.2.2.5 Coeficiente de correlación (r)

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

$$r = \pm \sqrt{\frac{\text{variación.explicada}}{\text{variación.total}}} = \pm \sqrt{\frac{\sum (Y - \bar{y})^2}{\sum (y - \bar{y})^2}} \quad (5.13)$$

El coeficiente de correlación varía entre -1 y +1.

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

$$r = \frac{n \left(\sum_{i=1}^n x_i y_i \right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right) \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)}{\sqrt{n \left(\sum_{i=1}^n x_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} * \sqrt{n \left(\sum_{i=1}^n y_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2}} \quad (5.14)$$

5.2.2.6 Coeficiente de determinación (r^2)

El coeficiente de determinación es la razón en la variación total explicada y la variación total. Este coeficiente da un mediado respecto a si la recta estimada es o no un buen ajuste.

Así por ejemplo si $r^2 = 0.80$, esto significa que la recta de regresión explica el 80% de la variación total.

5.3 PLANTEAMIENTO DE CURVAS, ÁBACOS Y PLANILLAS

5.3.1 DETERMINACIÓN DE ABACOS DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y FLEJO-TRACCIÓN Vs. EDAD DEL CONCRETO

Para realizar el ajuste de los datos obtenidos en los ensayos de compresión y flexo- tracción, con el objeto de determinar las curvas de mejor ajuste de la relación resistencia a compresión y flexo- tracción vs. edad del concreto, se utilizó el método de **mínimos cuadrados**, explicado ampliamente en el apartado 5.2.2.

Dentro del proceso de ajuste de los datos se utilizó como base la ecuación de regresión simple cuya expresión matemática es la siguiente:

$$Y = a + bX_i \quad (7.9)$$

Donde:

X_i = Representa la variable independiente cuyos valores son predeterminados por el experimentador como ser: $X_1, X_2, \dots, X_n$, en este caso ésta variable viene a representar la edad del concreto, es decir X_i = Edad del concreto.

Y_i = Representa la variable aleatoria dependiente, cuyos valores están en función a la variable X_i , los valores de Y_i , determinados experimentalmente son $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$, en nuestro caso $Y_i = R$ = Resistencia promedio de los ensayos a compresión y flexo- tracción.

Con la finalidad de dar una explicación teórica, del tratamiento que se dio en el ajuste de los datos a funciones de tipo logarítmica, a continuación se explica la relación aplicada:

- Curva Logarítmica: $y = a + b \ln(x) = R$

- Ecuación básica: $Y = \alpha + \beta X$

Donde: $Y = y = R$ $\alpha = a$ $\beta = b$ $X = \ln(x)$

Por ser el coeficiente de determinación (r^2) uno de los parámetros más utilizados como índice comparativo en el ajuste de curvas, en la tabla 5.2 se exponen los valores obtenidos de éste parámetro, en el ajuste de los datos a funciones de tipo lineal, cuadrática, potencial y logarítmica.

TABLA 5.1

RESUMEN DE COEFICIENTES DE DETERMINACIÓN (R^2) PARA RESISTENCIAS A COMPRESIÓN.

Probetas	REGRESIÓN			
	Lineal	Cuadrática	Potencial	Logarítmica
Patrón	0.644	0.923	0.890	0.944
2% Ceniza	0.672	0.933	0.903	0.957
4% Ceniza	0.696	0.917	0.907	0.964
6% Ceniza	0.616	0.897	0.859	0.926
15% Ceniza	0.694	0.896	0.877	0.958

TABLA 5.2

RESUMEN DE COEFICIENTES DE DETERMINACIÓN (R^2) PARA RESISTENCIAS A FLEXO-TRACCIÓN.

Vigas	REGRESIÓN			
	Lineal	Cuadrática	Potencial	Logarítmica
Patrón	0.473	0.844	0.787	0.834
2% Ceniza	0.556	0.894	0.833	0.889
4% Ceniza	0.524	0.858	0.801	0.865
6% Ceniza	0.605	0.918	0.873	0.922
15% Ceniza	0.680	0.899	0.889	0.952

Como se puede observar, los coeficientes de determinación obtenidos en el ajuste de la función logarítmica, son más elevados (próximos a la unidad) que los obtenidos en los otros tipos de regresión realizados. Por lo tanto, las ecuaciones estimadas que se utilizarán en el análisis de los datos, serán obtenidas mediante el ajuste de tipo logarítmico.

A continuación se presentan dos ábacos diferenciados por el tipo de resistencia (compresión y flexo-tracción), observando en ambos ecuaciones logarítmicas y curvas de comportamiento (del concreto patrón y el concreto con diferentes porcentajes de ceniza), resultantes de correlacionar las curvas obtenidas en el ajuste logarítmico de cada una de las muestras a través del método de los mínimos cuadrados. El proceso de cálculo se muestra detalladamente en el Anexo V.

TABLA 5.3.

ECUACIONES Y CURVAS AJUSTADAS PARA RESISTENCIAS A COMPRESIÓN EN PROBETAS DE CONCRETO

Estructura	Ecuación
Hormigón Patrón (H27)	$R = 94.0481 + 63.2732 \ln(x)$
Hº con 2% de ceniza del peso cementante.	$R = 91.2202 + 62.3151 \ln(x)$
Hº con 4% de ceniza del peso cementante.	$R = 78.5955 + 62.0949 \ln(x)$
Hº con 6% de ceniza del peso cementante.	$R = 76.6784 + 54.2526 \ln(x)$
Hº con 15% de ceniza del peso cementante.	$R = 39.1908 + 52.4889 \ln(x)$

**ÁBACO N° 1:
COMPORTAMIENTO DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO
RESISTENCIA A COMPRESIÓN Vs EDAD**

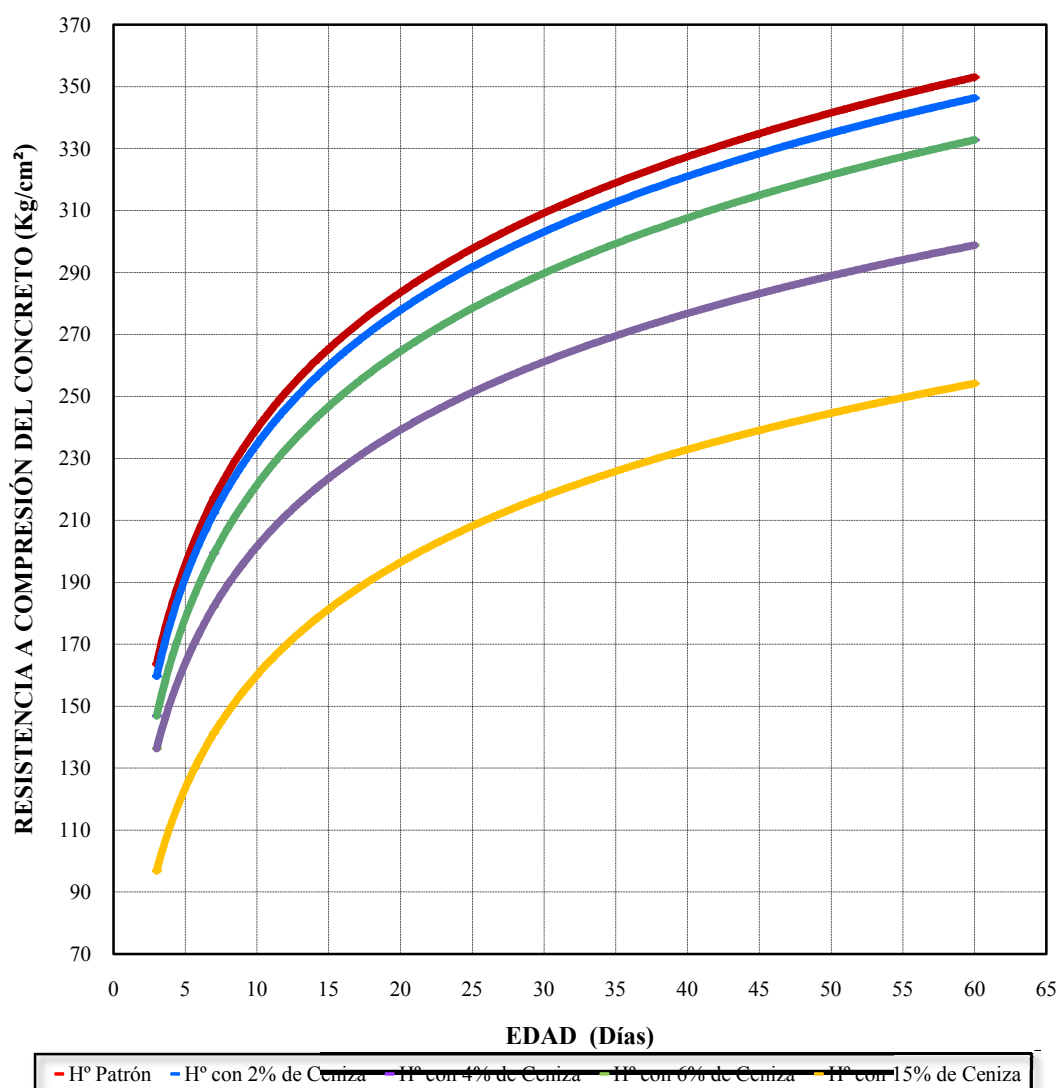
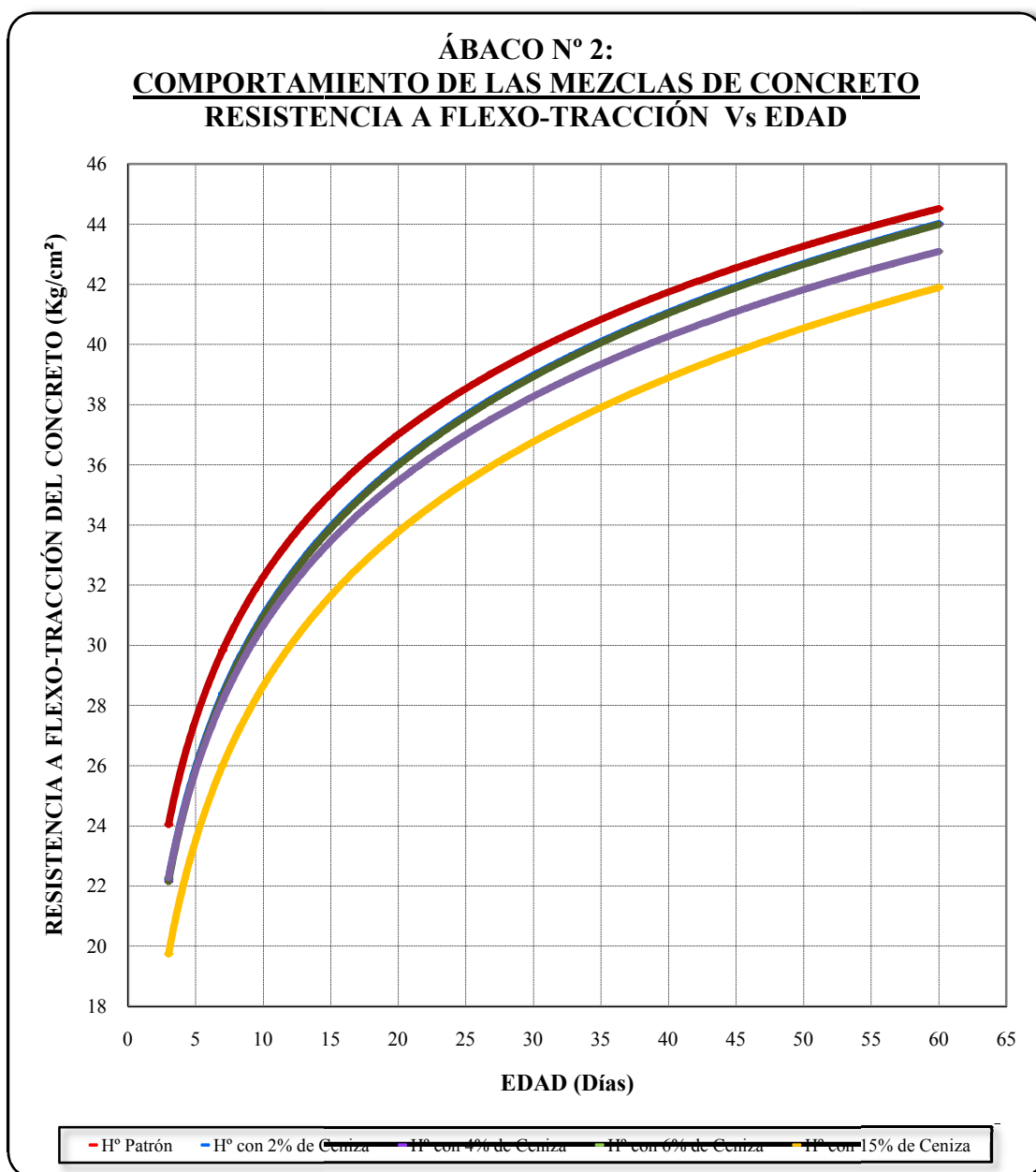


TABLA 5.4.

ECUACIONES Y CURVAS AJUSTADAS PARA RESISTENCIAS FLEJO-TRACCIÓN EN VIGAS DE CONCRETO

Estructura	Ecuación
Hormigón Patrón (H27)	$R = 16.5360 + 6.8348 \ln(x)$
H° con 2% de ceniza del peso cementante.	$R = 14.2529 + 7.2695 \ln(x)$
H° con 4% de ceniza del peso cementante.	$R = 14.1433 + 7.2903 \ln(x)$
H° con 6% de ceniza del peso cementante.	$R = 14.6523 + 6.9467 \ln(x)$
H° con 15% de ceniza del peso cementante.	$R = 11.6146 + 7.3967 \ln(x)$



5.4. IDENTIFICACIÓN Y DEFINICIÓN DE PARÁMETROS DE ANÁLISIS

5.4.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS COMPONENTES DEL CONCRETO

Los componentes del concreto (cemento, grava, arena, agua y ceniza) que intervinieron en la preparación de estas mezclas de prueba, son materiales convencionales que se encuentran en nuestro medio, cuyas características y valores están dentro de las especificaciones con las que se manejan (manual de la A.S.T.M.), por lo que es confiable relacionar cualquier valor de alguna característica presentada en las planillas, con la resistencia y el comportamiento del concreto, pero sin dejar de lado la afinidad que debe existir entre dicho valor observado y el conjunto del concreto en sí.

5.4.2. CENIZA DE CAÑA DE AZÚCAR (adición mineral)

Después de realizadas todas las pruebas propuestas en el concreto y haber conseguido los resultados satisfactoriamente, se puede apreciar muy claramente en las planillas finales y en los gráficos, que al agregar al concreto un determinado porcentaje de ceniza en peso cementante, esta ocasiona que la resistencia a compresión y flexo-tracción disminuyan pero es posible observa que esa disminución no es relevante por lo que concreto sigue siendo de Tipo A.

MARGEN DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN ENTRE H° CON DIFERENTES %s DE CENIZA DE CAÑA DE AZÚCAR Y H° PATRÓN

TABLA 5.5.

MARGEN DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN ENTRE H° CON 2% DE CENIZA EN PESO CEMENTANTE Y H° PATRÓN

Edad (días)	3	7	14	28	60
Resistencia promedio H° Patrón (kg/cm ²)	145,30	225,88	280,29	315,34	332,95
Resistencia promedio H° con 2% de ceniza (kg/cm ²)	143,45	222,36	268,84	309,67	328,74
Margen de Resistencia (%)	<u>1,27</u>	<u>1,56</u>	<u>4,09</u>	<u>1,80</u>	<u>1,26</u>

TABLA 5.6

MARGEN DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN ENTRE H° CON 4% DE CENIZA EN PESO CEMENTANTE Y H° PATRÓN

Edad (días)	3	7	14	28	60
Resistencia promedio H° Patrón (kg/cm ²)	145,30	225,88	280,29	315,34	332,95
Resistencia promedio H° con 4% de ceniza (kg/cm ²)	131,64	207,77	259,95	288,25	319,44
Margen de Resistencia (%)	<u>9,40</u>	<u>8,02</u>	<u>7,26</u>	<u>8,59</u>	<u>4,06</u>

TABLA 5.7.

MARGEN DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN ENTRE H° CON 6% DE CENIZA EN PESO CEMENTANTE Y H° PATRÓN

Edad (días)	3	7	14	28	60
Resistencia promedio H° Patrón (kg/cm ²)	145,30	225,88	280,29	315,34	332,95
Resistencia promedio H° con 6% de ceniza (kg/cm ²)	116,13	196,59	235,79	265,81	280,33
Margen de Resistencia (%)	<u>20,08</u>	<u>12,97</u>	<u>15,88</u>	<u>15,71</u>	<u>15,80</u>

TABLA 5.8.

MARGEN DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN ENTRE H° CON 15% DE CENIZA EN PESO CEMENTANTE Y H° PATRÓN

Edad (días)	3	7	14	28	60
Resistencia promedio H° Patrón (kg/cm ²)	145,30	225,88	280,29	315,34	332,95
Resistencia promedio H° con 15% de ceniza (kg/cm ²)	81,75	153,11	191,57	213,80	243,86
Margen de Resistencia (%)	<u>43,74</u>	<u>32,22</u>	<u>31,65</u>	<u>32,20</u>	<u>26,76</u>

TABLA 5.9.

RESUMEN: MÁRGENES DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN

Margen de Resistencia a Compresión (%)	Edad (días)				
	3	7	14	28	60
H° con 2% de ceniza en peso cementante y H° Patrón	1,27	1,56	4,09	1,80	1,26
H° con 4% de ceniza en peso cementante y H° Patrón	9,40	8,02	7,26	8,59	4,06
H° con 6% de ceniza en peso cementante y H° Patrón	20,08	12,97	15,88	15,71	15,80
H° con 15% de ceniza en peso cementante y H° Patrón	43,74	32,22	31,65	32,20	26,76

MARGEN DE RESISTENCIA A FLEXO-TRACCIÓN ENTRE H° CON DIFERENTES %s DE CENIZA DE CAÑA DE AZÚCAR Y H° PATRÓN

TABLA 5.10.

MARGEN DE RESISTENCIA A FLEXO-TRACCIÓN ENTRE H° CON 2% DE CENIZA EN PESO CEMENTANTE Y H° PATRÓN

Edad (días)	3	7	14	28	60
Resistencia promedio H° Patrón (kg/cm ²)	20,18	32,13	38,37	40,78	40,82
Resistencia promedio H° con 2% de ceniza (kg/cm ²)	18,97	30,98	35,22	40,64	40,76
Margen de Resistencia (%)	<u>5,97</u>	<u>3,60</u>	<u>8,22</u>	<u>0,33</u>	<u>0,16</u>

TABLA 5.11.

MARGEN DE RESISTENCIA A FLEXO-TRACCIÓN ENTRE H° CON 4% DE CENIZA EN PESO CEMENTANTE Y H° PATRÓN

Edad (días)	3	7	14	28	60
Resistencia promedio H° Patrón (kg/cm ²)	20,18	32,13	38,37	40,78	40,82
Resistencia promedio H° con 4% de ceniza (kg/cm ²)	18,29	31,58	35,58	40,27	40,58
Margen de Resistencia (%)	<u>9,36</u>	<u>1,73</u>	<u>7,27</u>	<u>1,25</u>	<u>0,60</u>

TABLA 5.12.

MARGEN DE RESISTENCIA A FLEXO-TRACCIÓN ENTRE H° CON 6% DE CENIZA EN PESO CEMENTANTE Y H° PATRÓN

Edad (días)	3	7	14	28	60
Resistencia promedio H° Patrón (kg/cm ²)	20,18	32,13	38,37	40,78	40,82
Resistencia promedio H° con 6% de ceniza (kg/cm ²)	19,80	29,84	34,70	39,56	40,42
Margen de Resistencia (%)	<u>1,87</u>	<u>7,12</u>	<u>9,57</u>	<u>2,98</u>	<u>0,98</u>

TABLA 5.13.

MARGEN DE RESISTENCIA A FLEXO-TRACCIÓN ENTRE H° CON 15% DE CENIZA EN PESO CEMENTANTE Y H° PATRÓN

Edad (días)	3	7	14	28	60
Resistencia promedio H° Patrón (kg/cm ²)	20,18	32,13	38,37	40,78	40,82
Resistencia promedio H° con 15% de ceniza (kg/cm ²)	17,42	28,09	32,60	36,71	40,22
Margen de Resistencia (%)	<u>13,66</u>	<u>12,59</u>	<u>15,05</u>	<u>9,97</u>	<u>1,47</u>

TABLA 5.14.

RESUMEN: MÁRGENES DE RESISTENCIA A FLEXO-TRACCIÓN RESPECTO AL H° PATRÓN.

Margen de Resistencia a FLEXO-TRACCIÓN (%)	Edad (días)				
	3	7	14	28	60
H° con 2% de ceniza en peso cementante y H° Patrón	5,97	3,60	8,22	0,33	0,16
H° con 4% de ceniza en peso cementante y H° Patrón	9,36	1,73	7,27	1,25	0,60
H° con 6% de ceniza en peso cementante y H° Patrón	1,87	7,12	9,57	2,98	0,98
H° con 15% de ceniza en peso cementante y H° Patrón	13,66	12,59	15,05	9,97	1,47

Esta diferencia de rendimientos reflejada en porcentajes, nos indica que en todas las edades características del concreto (3, 7, 14, 28 y 60 días), la ceniza reacciona químicamente con el concreto pero no de la manera esperada.

Como parámetro, se denota que a los 28 días de edad (tiempo de fraguado máximo nominal), se observa una disminución en la resistencia a compresión entre el concreto patrón y la mezclas, de 1.80% para el 2% de adición, 8.59% para

el 4% de adición, 15.71% para el 6% de adición, y 32.20% para el 15% de adición de ceniza.

Por otra parte se observa una disminución más pequeña en la resistencia a flexotracción entre el concreto patrón y la mezclas, de 0.33% para el 2% de adición, 1.25% para el 4% de adición, 2.98% para el 6% de adición, y 9.97% para el 15% de adición de ceniza.

Observando las tablas 5.7 y 5.12 es posible hacer notar que a la edad de 60 días, los porcentajes de diferencias entre resistencias del concreto patrón y el concreto elaborado con ceniza, disminuyen considerablemente, demostrando así que la ceniza obtiene mayor resistencia a mayor edad pese al grado de finura que presenta.

5.4.3. DIFERENCIA ENTRE LOS RESULTADOS OBTENIDOS Y LOS RESULTADOS ESPERADOS

El Instituto Salvadoreño del Cemento y del Concreto (ISCYC) en un estudio realizado el año 2001 en el Salvador, presenta los siguientes resultados obtenidos de su investigación, para 6 % de adición de ceniza de caña de azúcar en porcentajes cementantes en el concreto:

ENSAYO DE RESISTENCIA DEL CONCRETO A LA COMPRESIÓN									
Probeta Nº	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm ²)	Peso (kg)	Peso Vol. (kg/m ³)	Edad (días)	Cono (Pulg.)	Carga (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)
C-1	15.2	30.3	181.1	12.768	2322.0	7	2	36700.0	202
C-2	15.2	30.2	181.46	12.680	2314.0	7	2	41607.0	229
C-3	15.3	30.6	183.85	12.704	2258.0	7	2	34350.0	187
C-4	15.2	30.5	181.46	12.732	2300.0	7	2	35200.0	194
C-5	15.3	30.6	183.85	12.790	2273.0	14	2	45395.0	247
C-6	15.3	30.6	183.85	12.768	2269.0	14	2	56430.0	307
C-7	15.5	30.5	188.69	12.798	2224.0	28	2	53170.0	282
C-8	15.3	30.5	183.85	12.721	2269.0	28	2	53170.0	289
C-9	15.5	30.3	188.69	12.710	2223.0	28	2	67957.0	360

Cilindros Nº C-3, C-4 y C-7 corresponden a la mezcla patrón sin adiciones.

Cilindros Nº C-1, C-5 y C-8 corresponden a la mezcla con 6% de adición de ceniza.

Cilindros Nº C-2, C-6 y C-9 corresponden a la mezcla con 15% de adición de ceniza.

ENSAYO DE RESISTENCIA A FLEXO-TRACCIÓN DE VIGAS DE CONCRETO (CARGA APLICADA EN EL TERCIO MEDIO)									
Vigueta Nº	Alto Efectivo (cm)	Ancho Efectivo (cm)	Longitud Efectiva (cm)	Peso (kg)	Peso Vol. (kg/m ³)	Edad (días)	Cono (Pulg.)	Carga (kg)	Esfuerzo (kg/cm ²)
V-1	14.9	15.1	45.0	31.430	2328.0	7	2	2055.0	28
V-2	15.2	15.4	45.0	31.675	2278.0	7	2	2370.0	30
V-3	15.1	15.0	45.0	30.880	2268.0	7	2	2365.0	31
V-4	15.0	15.4	45.0	31.315	2237.0	7	2	2020.0	26
V-5	15.3	15.3	45.0	31.600	2242.0	14	2	2400.0	30
V-6	15.0	15.5	45.0	32.390	2314.0	14	2	2530.0	33
V-7	15.2	15.2	45.0	31.370	2286.0	28	2	2615.0	34
V-8	15.4	15.6	45.0	31.770	2186.0	28	2	2870.0	35
V-9	15.0	15.4	45.0	31.270	2245.0	28	2	3280.0	43

Vigas Nº C-3, C-4 y C-7 corresponden a la mezcla patrón sin adiciones.

Vigas Nº C-1, C-5 y C-8 corresponden a la mezcla con 6% de adición de ceniza.

Vigas Nº C-2, C-6 y C-9 corresponden a la mezcla con 15% de adición de ceniza.

Por fuentes certificadas se entiende que para estos estudios se aplicaron métodos de realización muy parecidos a los utilizados en el presente trabajo, la diferencia radica en que la ceniza de caña de azúcar utilizada se encontraba con una finura promedio de sus partículas 45µm muy parecida a la del cemento, por lo que es muy importante hacer un análisis de los resultados obtenidos respecto a los valores esperados, que anteriormente fueron citados.

5.5. ANALISIS ECONOMICO

El análisis económico realizado nos dará una idea de cuánto es posible reducir el costo por m³ de concreto, cuando se reemplaza diferentes porcentajes estudiados de ceniza de caña de azúcar por cemento.

La cantidad de materiales para 1m³ de concreto fue calculada en el capítulo IV (apartado 4.2.1 a 4.2.5).

A continuación se detalla el análisis económico para determinar el costo de materiales para 1m³ de cada prueba de concreto.

Concreto Patrón:

Materiales	Unidad	Cantidad	Precio Productivo	Costo Total (Bs.)
Cemento "El Puente Ip-40"	kg	350,00	1,040	364,00
Agua Potable	lt	173,54	0,001	0,17
Grava (3/4")	kg	1034,43	0,048	49,26
Arena (Nº4)	kg	790,43	0,037	29,53
Costo total de materiales para 1m³ de concreto				442,96

Concreto con 2% de ceniza de caña de azúcar:

Materiales	Unidad	Cantidad	Precio Productivo	Costo Total (Bs.)
Cemento "El Puente Ip-40"	kg	343,00	1,040	356,73
Agua Potable	lt	171,24	0,001	0,17
Grava (3/4")	kg	1030,69	0,048	49,08
Arena (Nº4)	kg	797,01	0,037	29,77
Ceniza de caña de azúcar	kg	7,00	0,400	2,80
Costo total de materiales para 1m³ de concreto				438,55

Concreto con 4% de ceniza de caña de azúcar:

Materiales	Unidad	Cantidad	Precio Productivo	Costo Total (Bs.)
Cemento "El Puente Ip-40"	kg	336,00	1,040	349,44
Agua Potable	lt	172,20	0,001	0,17
Grava (3/4")	kg	1030,69	0,048	49,08
Arena (Nº4)	kg	800,44	0,037	29,90
Ceniza de caña de azúcar	kg	14,00	0,400	5,60
Costo total de materiales para 1m³ de concreto				434,19

Concreto con 6% de ceniza de caña de azúcar:

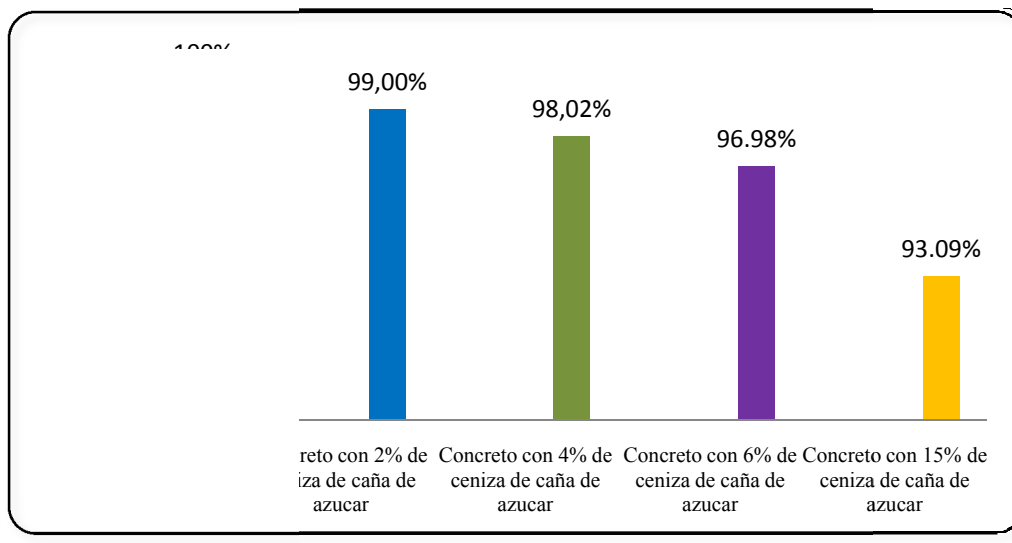
Materiales	Unidad	Cantidad	Precio Productivo	Costo Total (Bs.)
Cemento "El Puente Ip-40"	kg	329,01	1,040	342,17
Agua Potable	lt	180,28	0,001	0,18
Grava (3/4")	kg	1034,43	0,048	49,26
Arena (Nº4)	kg	791,21	0,037	29,56
Ceniza de caña de azúcar	kg	20,99	0,400	8,40
Costo total de materiales para 1m³ de concreto				429,56

Concreto con 15% de ceniza de caña de azúcar:

Materiales	Unidad	Cantidad	Precio Productivo	Costo Total (Bs.)
Cemento "El Puente Ip-40"	kg	298,00	1,040	309,92
Agua Potable	lt	162,59	0,001	0,16
Grava (3/4")	kg	1034,43	0,048	49,26
Arena (Nº4)	kg	862,03	0,037	32,20
Ceniza de caña de azúcar	kg	52,00	0,400	20,80
Costo total de materiales para 1m³ de concreto				412,34

TABLA 5.15.
RESUMEN: DIFERENCIA DE COSTO DE MATERIALES PARA ELABORAR 1m³
DE CONCRETO.

Estructura	Costo de materiales para 1m ³ de concreto (Bs.)	Diferencia (Bs.)	Diferencia (%)
Concreto Patrón	<u>442,96</u>	---	0
Concreto con 2% de ceniza de caña de azúcar	<u>438,55</u>	4,41	<u>1,00</u>
Concreto con 4% de ceniza de caña de azúcar	<u>434,19</u>	8,77	<u>1,98</u>
Concreto con 6% de ceniza de caña de azúcar	<u>429,56</u>	13,40	<u>3,02</u>
Concreto con 15% de ceniza de caña de azúcar	<u>412,34</u>	30,62	6,91



5.6. VALORACIÓN DEL ANÁLISIS

- Al ser un trabajo de investigación y además experimental se asegura la veracidad de todos los resultados obtenidos, tanto de caracterización de cada uno de sus componentes (grava, arena, cemento, ceniza y agua) como de las resistencias obtenidas (compresión y flexo-tracción).
- El poder representar los resultados de resistencia en graficas y además en ábacos que correlacionan las distintas mezclas, ayuda bastante y de forma práctica en el mejor entendimiento del comportamiento del concreto ante los esfuerzos sometidos.
- Una ventaja muy importante del análisis, es haber obtenido los costos por m³ de material utilizado en cada mezcla, comparando un concreto patrón y un concreto elaborado con ceniza, quedando demostrado que este último es más económico.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

De acuerdo con el estudio correspondiente al análisis experimental del uso de ceniza de caña de azúcar en concreto para pavimento rígido y en base a los resultados obtenidos y el análisis de los mismos, se requiere dar a conocer como conclusiones lo que a continuación se expone:

- ∅ Al inicio de esta Investigación se plantearon objetivos, los cuales están seguros de haber sido cumplidos, ya que se da a conocer la innovación para realizar estudios a alternativas de adición mineral (puzolanas artificiales), no solo por los beneficios que se le daría al concreto en las carreteras, sino también porque se estaría contribuyendo a utilizar de un manera practica un material considerado como desecho residual y de problemas para su disposición final.
- ∅ La relación a/c es el factor principal para lograr el asentamiento requerido, por lo cual fue calculada en función a dos parámetros seleccionados como principales e importantes.

Los parámetros de dosificación seleccionados son: el asentamiento (6cm), y la cantidad de cemento calculado para la mezcla patrón (350 kg/m³). Para calcular las nuevas relaciones a/c, se opto por reemplazar ceniza de caña de azúcar en porcentaje cementante (2, 4, 6 y 15%) e ir calculando por tanteo la cantidad de agua de mezclado necesaria para finalmente verificar el asentamiento de cada mezcla mediante el ensayo del cono de Abrams.

ESTRUCTURA	Relación (a/c)
Concreto Patrón (H27)	0,587
Concreto con 2% de ceniza del peso cementante.	0,609
Concreto con 4% de ceniza del peso cementante.	0,625
Concreto con 6% de ceniza del peso cementante.	0,645
Concreto con 15% de ceniza del peso cementante.	0,660

- ∅ De acuerdo a la tabla 4.4 extraída de la Norma ACI-211 donde se observa el porcentaje aproximado de aire naturalmente atrapado en una mezcla de concreto fresco para un tamaño máximo nominal de $\frac{3}{4}$ " = 2%, se puede afirmar que los valores obtenidos en laboratorio mediante el presurímetro de vacíos para las

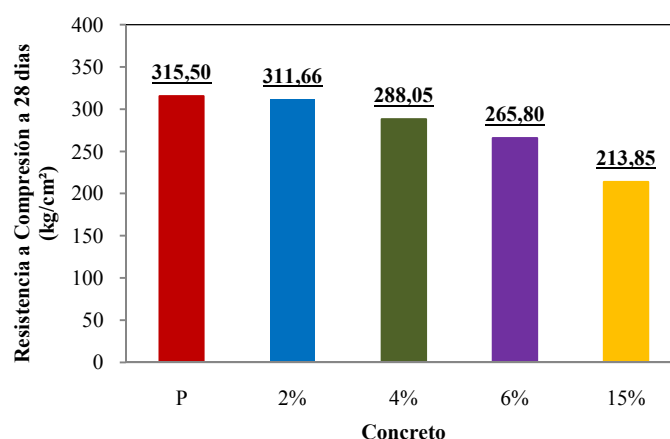
cinco pruebas son aceptables, indicando de esta manera las partículas de los materiales utilizados cohesionan entre sí (existe unión de materiales).

ESTRUCTURA	Contenido de Aire (%)
H° Patrón (H27)	1,80
H° con 2% de ceniza del peso cementante.	1,70
H° con 4% de ceniza del peso cementante.	1,80
H° con 6% de ceniza del peso cementante.	1,60
H° con 15% de ceniza del peso cementante.	1,80

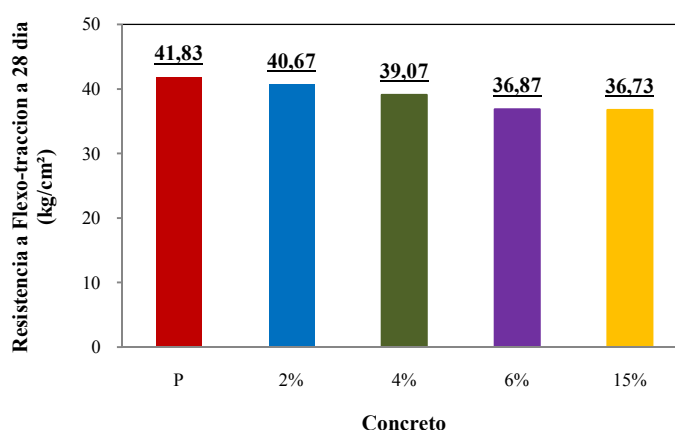
- ∅ Las características observadas para todas las mezclas, como ser: apariencia, consistencia, exudación y densidad no tuvieron cambios significativos, por lo que se observo y calculo.

ESTRUCTURA	Apariencia	Consistencia	Exudación	Densidad (kg/m³)
H° Patrón (H27)	Pastosa	Semi seca	No	2,33
H° con 2% de ceniza del peso cementante.	Pastosa	Semi seca	No	2,32
H° con 4% de ceniza del peso cementante.	Pastosa	Semi seca	No	2,34
H° con 6% de ceniza del peso cementante.	Pastosa	Semi seca	No	2,34
H° con 15% de ceniza del peso cementante	Pastosa	Semi seca	Si	2,32

- ∅ La adición mineral solida puede mejorar ciertamente las propiedades de un concreto, pero no deberá esperarse compensar con ella la pobre calidad de los agregados utilizados o un proporcionamiento pobre de mezcla.
- ∅ El análisis mineralógico que se le realizo a la ceniza de caña de azúcar, el valor del **PH=10.5** y los diferentes ensayos de caracterización y rotura realizados a cada una de las cuatro mezclas de concreto con porcentajes diferentes de ceniza, afirman que es compatible con los diversos materiales utilizados en la elaboración de concretos, siendo favorable su desempeño a largo plazo (adquiere mayor resistencia 60 días).
- ∅ Como parámetro, se denota que a los 28 días de edad (tiempo de fraguado máximo nominal), se observa una disminución en la resistencia a compresión entre el concreto patrón y la mezclas, de 1.80% para el 2% de adición, 8.59% para el 4% de adición, 15.71% para el 6% de adición, y 32.20% para el 15% de adición en peso cementante de ceniza.



También en la resistencia a flexo-tracción se observa una disminución pero más pequeña en la resistencia entre el concreto patrón y la mezclas, de 0.33% para el 2% de adición, 1.25% para el 4% de adición, 2.98% para el 6% de adición, y 9.97% para el 15% de adición en peso cementante de ceniza.



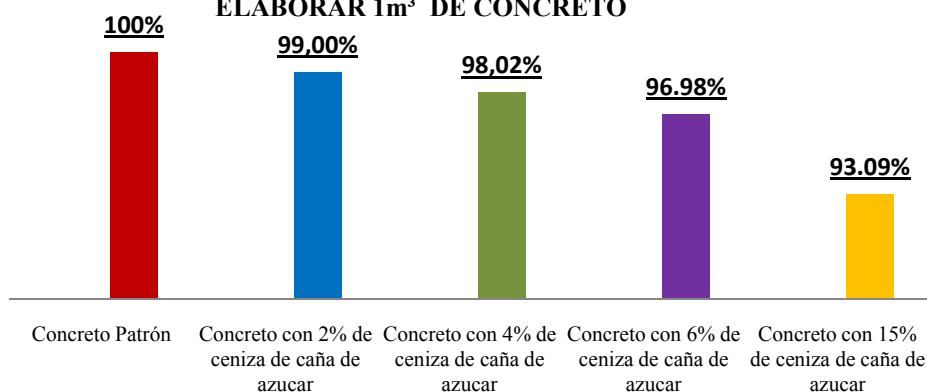
La explicación para que el concreto con adición de ceniza presente resistencias por debajo del patrón se deba a la poca finura que presentaba la ceniza utilizada, pese a eso la resistencia flexo-tracción sigue manteniéndose más aun con el transcurso del tiempo, por lo que es recomendable su uso en concretos utilizados para la construcción de pavimentos rígidos, donde tiene más influencia la resistencia a flexo-tracción que la de compresión.

- Se realizó un **análisis económico** comparativo entre el costo por m³ de materiales para cada una de las pruebas, en base a las cantidades de materiales calculadas para la dosificación; dando como resultado, un costo por m³ de concreto con adición menor al concreto normal. Estos valores obtenidos demuestran que en grandes cantidades de masa de concreto se hace posible disminuir costos si se reemplaza como máximo un 6% de ceniza de caña de

azúcar en peso cementante; todo esto tomando en cuenta el transporte y la molienda de la ceniza.

Estructura	Costo de materiales para 1m ³ de concreto (Bs.)	Diferencia (Bs.)	Diferencia (%)
Concreto Patrón	<u>442,96</u>	---	0
Concreto con 2% de ceniza de caña de azúcar	<u>438,55</u>	4,41	<u>1,00</u>
Concreto con 4% de ceniza de caña de azúcar	<u>434,19</u>	8,77	<u>1,98</u>
Concreto con 6% de ceniza de caña de azúcar	<u>429,56</u>	13,40	<u>3,02</u>
Concreto con 15% de ceniza de caña de azúcar	<u>412,34</u>	30,62	6,91

DIFERENCIA ENTRE COSTO DE MATERIALES PARA ELABORAR 1m³ DE CONCRETO



∅ Como **conclusión técnica** en base a los resultados obtenidos, es posible concluir que es factible elaborar un concreto tipo A, utilizando un menor porcentaje de cemento portland y reemplazándolo por ceniza de caña de azúcar hasta un 6%, optimizando con esto el uso del cemento y logrando menores probabilidades de fisuras por contracción, mayor resistencia a flexo-tracción, incremento de la impermeabilidad por la reducción de grietas en el fraguado y mayor durabilidad del concreto para pavimento rígido.

∅ Como **conclusión química**, se determina que al reemplazar ceniza por cemento se hace que el concreto retarde la velocidad de adquisición de resistencia, esta reacción química es debido a que el cemento contiene aluminatos y silicatos reaccionando los aluminatos con el agua a edades tempranas; pero al reemplazar la ceniza solamente se le adiciona silicatos los cuales hacen que la mezcla retarde su hidratación total, adquiriendo resistencia a mayores edades.

∅ El uso de mezclas de concreto con ceniza de caña de azúcar, no alteran los procedimientos usados normalmente en los trabajos de pavimentación, porque sus características en estado fresco son similares a las de un concreto normal.

- ☞ El aplicar un método comparativo al momento de analizar datos y resultados es una forma muy práctica y demostrativa de explicar los principales aspectos e incógnitas de un estudio, ya que se aplicaron estándares y valores normalizados para relacionarlos con los obtenidos en experimentos, procedimientos y experiencias propias.
- ☞ El análisis realizado tuvo una base matemática y estadística, dándonos como resultado una serie de curvas y gráficas que se correlacionan en dos ábacos finales. Los resultados se presentan de esa manera con el fin de comprobar el logro del objetivo principal del proyecto y también por motivos de practicidad al momento de hacer uso de ellos.

6.2. RECOMENDACIONES

Para viabilizar futuras experiencias y estudios sobre el tema me permito realizar las siguientes recomendaciones:

- ∅ El proceso de dosificación de un concreto prueba realizado en el laboratorio, principalmente si se trata de la adición de nuevos materiales debe ser realizado con suma precisión y controlado con las pruebas necesarias (asentamiento y porcentaje de vacíos) para no tener problemas al momento de dosificar el concreto en masa.
- ∅ Se debe tener mucho cuidado con la temperatura ambiente en el momento de realizar las mezclas, porque los climas extremos verdaderamente pueden llegar a afectar los procedimientos y resultados esperados tanto en el concreto fresco como en el endurecido.
- ∅ La ceniza de caña de azúcar al ser considerada como una adición sólida mineral, se recomienda que su finura sea igual o parecida a la del cemento para que en reemplazo del mismo dentro de la masa de concreto pueda reaccionar químicamente y cohesionar de la mejor manera posible con los demás componentes del concreto, por lo que es necesario realizar una molienda muy controlada hasta lograr la fineza necesaria.
- ∅ La ceniza es considerada como un desecho sólido (desperdicio) por la industria azucarera, por lo cual no se le realiza una quema controlada, resultante de este proceso es que presenta materia orgánica sin ser calcinada, por lo que se recomienda realizar una quema sumamente controlada (600 - 700°C) al momento de realizar la quema del bagazo.
- ∅ Al resultar favorable el uso de la ceniza de caña de azúcar en el concreto para pavimento rígido, se recomienda realizar la primera puesta en obra en vías de acceso pertenecientes a la ciudad de Bermejo ya que la fábrica de azúcar IABSA se encuentra en esta ciudad.
- ∅ Se hace una recomendación dirigida hacia el manejo y procesamiento de los datos que son producto de la caracterización y ensayos de rotura en general. Un procesamiento de datos debe ser consistente en analizar la información obtenida, comenzando por un simple control de datos faltantes y dispersos, seguido por

una depuración estadística y finalmente exponiendo de forma clara todos los métodos matemáticos y estadísticos para adquirir de forma tabulada y gráfica los resultados propuestos.

- ⌘ Esta investigación queda abierta a posteriores estudios, ya que existen todavía muchas variables por investigar que se encuentran fuera del alcance de este trabajo, como por ejemplo el comportamiento a largo plazo, datos módulos de elasticidad, comportamiento ante ataque de sulfatos, y otros. Sin embargo existen muchas posibilidades de que se comporte satisfactoriamente, ya que su composición mineralógica es compatible con todos los componentes de una mezcla de concreto y no contiene minerales que pudieran reaccionar negativamente, ocasionando daños en el concreto endurecido.
- ⌘ “Es importante resaltar que todos los ensayos y análisis realizados estuvieron acordes con las normas y límites que rigen un estudio de este tipo, por lo que los resultados obtenidos son de total credibilidad, si bien no se obtuvieron resultados de resistencias por encima del patrón, se comprobó que reemplazando un máximo de 6% de ceniza de caña de azúcar (de 1.18mm de tamaño máximo) por cemento se obtienen resistencias por encima de la mínima requerida para pavimentos rígidos (250 kg/cm^2 a compresión y 35 kg/cm^2 a flexotracción) siendo esta última la más favorable, por lo que **se recomienda su uso en concretos para pavimento rígido**”.