

CAPITULO I

EL OBJETO DE CONOCIMIENTO

1.- ELEMENTO DEL OBJETO DE LA PROPUESTA

1.1. – Problema.

1.1.1. – Antecedentes.

El principal problema del hormigón es su peso propio, este tiene un peso específico de 2400 kg/m³, lo cual puede ser muy problemático en algunos casos, debido a que genera una mayor solicitud de carga muerta esto conlleva un mayor dimensionamiento es decir mayor cantidad de aridos, cemento, armaduras, etc en resumen un mayor costo.

Por otro lado en la actualidad existen un gran auge por la conservación del medio ambiente, dentro de los principales problemas que deterioran la ecología del planeta, uno de los más importantes es la producción desmedida y la disposición irresponsable de grandes volúmenes de plástico, en la ciudad de Tarija el 85% de desechos plásticos corresponden al grupo de polietileno de baja densidad (bolsas plásticas).

Anteriormente, gran parte de la basura era quemada, lo que ocasionó una explosión incontrolable de Dióxido de Carbono; por ser llevada a tiraderos, se generó una sobrepoblación de basura que en estos momentos representa un gran problema, pues la capacidad de los denominados tiraderos sanitarios, ha sido rebasada.

Una alternativa para atenuar, al menos parcialmente la problemática señalada respecto a la basura, y consiste en la reconversión de los desechos plásticos en materiales que puedan ser de utilidad en la construcción.

1.1.2. - Planteamiento.

Los componentes de un hormigón se caracterizan principalmente por su gran resistencia a compresión que varía entre (150 a 500 kg/cm²) y una densidad de 2350kg/m³ por otro lado los PEBD poseen una resistencia a compresión de (500 a 2.500 Kg/ cm²) y una densidad aproximada de 920kg/m³.

De 70 a 75% del hormigón está formado por agregados finos y gruesos dependiendo de la dosificación, es por ello que podemos predecir por cálculos probabilísticos que al sustituir el agregado grueso por agregado de PEBD el peso del hormigón reducirá en función al porcentaje de sustitución del agregado.

1.1.3. – Formulación.

Como puedo disminuir el peso del hormigón y a la vez la contaminación ambiental?

Los hormigones ligeros son realmente interesantes cuando por necesidades estructurales es necesario reducir el peso del mismo. Por otro lado, su baja conductividad los hace ideales como aislante térmico.

Existen tres formas de conseguir hormigones ligeros:

- Empleando áridos de baja densidad (hormigón de árido ligero)
- Eliminando los elementos finos o arena del hormigón tradicional (hormigón sin finos)
- Incorporando burbujas de gas en su masa (hormigón celular)

En este caso optaremos por el primer método, empleando un agregado de PEBD reciclado que a laves resulta de gran ayuda social por el hecho de que al disminuir el peso del hormigón estaremos eliminando los desechos tipo PEBD arrojados al medio ambiente.

1.1.4. - Sistematización.

Al optar por el método (empleando áridos de baja densidad) procedemos a la elaboración de nuestro agregado, el cual será modificado en textura y forma, con la finalidad de obtener el máximo rendimiento posible que este pueda brindar como agregado en el hormigón.

1.1.4.1.- Variables independientes.

Las materias primas utilizadas en la elaboración del hormigón son: Cemento, Agua, Grava y arena.

Peso de agregados pétreos.- La grava y la arena, también conocidos como agregados, representan del 60 al 75% aproximadamente del volumen total del concreto, y varían en tipo y tamaño dependiendo del tipo de concreto deseado.

Los agregados de calidad deben cumplir ciertas reglas para darles un uso ingenieril optimo: deben consistir en partículas durables, limpias, duras, resistentes y libres de productos químicos absorbidos, recubrimientos de arcilla y otros materiales finos que pudieran afectar la hidratación y la adherencia la pasta del cemento.

Nuestra variable que será modificada en este caso será la **grava**.

Peso del cemento.- El Cemento, aunque ocupa aproximadamente un 15% de la mezcla, es el material más importante porque es el que proporciona resistencia, al ser hidratado se produce la reacción química es por ello que esta variable no puede ser reemplazada.

Peso del acero.- las secciones varían de acuerdo a la solicitud de cargas, por efecto si reducimos el peso del hormigón, paralelamente se reducirán las secciones de las barras, es decir a menor peso de hormigón menor cantidad de hierro.

1.1.4.2.- Alternativas de solución.

Dentro de las posibles soluciones empleando agregados de menor densidad y a la vez de contribución al medio ambiente podemos citar los siguientes trabajos de investigación.

Hormigón ligero con hojuelas de plástico PET reciclado.

Se llevó a cabo en España, con el finalidad de reducir los desechos tipo PET empleándolo con agregado en el hormigón, sin embargo resulto ser contraproducente, a partir del elevado costo en su trituración y las grandes pérdidas mecánicas que generaba al hormigón, principalmente por la poca adherencia que este material podía experimentar, *reemplazando el 50% del agregado grueso por hojuelas de PET se adquirió una resistencia en laboratorio a 28 días de 17.4kg/cm²* muy por debajo de lo previsto.

Hormigón ligero a base de papel mache.

Este experimento se llevó a cabo en la U.A.J.M.S con fines de eliminar los residuos de la prensa escrita y paralelo a ello obtener un hormigón las ligero, sin embargo el banco de materia prima para este experimento es muy escaso, además los residuos de papel mache tienen diversos usos en la sociedad y por ello un costo de 8bs el kilo para su adquisición, técnicamente si es una alternativa posible para reducir el peso en estructuras pero económicamente no.

Hormigón ligero con residuos de goma.

Es un hormigón enfocado 100% en reducir la contaminación ambiental, los efectos positivos menor densidad en un 40%, sin embargo la inclusión de este material produce

perdida de la resistencia a compresión en un 80 a 90%, no se adhiere a ningún material por lo que se considera de grado incompatible y su estado físico permanente deformable.

Hormigón ligero utilizando agregado (PEBD) reciclado.

Es un método nuevo que se pretende estudiar como alternativa de aligerar el hormigón y paralelo a ello descontaminar el medio ambiente, el banco de material (PEBD) es abundante, el proceso de obtención de agregado es fácil y económico, es un estudio que abre las puertas para futuros posibles usos de este material, es 2.5 veces más ligero que los agregados pétreos, su textura y forma están sujetos a poder modificarse con el fin de adquirir el mejor desempeño mecánico.

1.1.4.3.- Alternativa seleccionada.

De los métodos posibles para aligerar el hormigón y ayudar al medio ambiente optamos por su facilidad y viabilidad el utilizar agregado (PEBD) reciclado.

1.2. - Objetivos

1.2.1. - Objetivo General

Viabilizar la utilización del agregado de polietileno de baja densidad (PEBD) en el hormigón, pudiendo demostrar de forma teórica y práctica que el mismo puede dar como resultados un hormigón ligero, competitivo a par de otros y de apoyo a la preservación y descontaminación del medio ambiente.

1.2.2. - Objetivos Específicos

- Reciclar grandes cantidades de polietileno de baja densidad.
- Viabilizar la técnica Baño María (en aceite comestible reciclado), como proceso para la conversión del (PEBD).
- Crear el agregado de PEBD a partir de moldes fabricados.
- Modificar la textura del agregado de PEBD, para que este sea capaz de adherirse al hormigón.

- Realizar los ensayos de laboratorios necesarios para caracterizar los agregados que formaran parte de esta investigación.
- Diseñar la mezcla.
- Elaborar las probetas para 0%; 25%; 50%; 75% y 100% de agregado de PEBD, necesarias que estarán sujetas al ensayo de compresión simple.
- Evaluar a resistencia característica del hormigón a los 7, 14 y 28 días, reemplazando el agregado grueso en un 25%, 50%, 75% y 100%.
- Evaluar la disminución del peso específico del hormigón a los diferentes porcentajes de reemplazo del agregado grueso.
- Generar las ecuaciones empíricas correspondientes en función al porcentaje de agregado de (PEBD) con peso específico del hormigón y la resistencia característica a compresión.
- Identificar las posibles aplicaciones del hormigón con agregado de (PEBD), en función a sus características físicas y mecánicas.

1.3.-Justificación.

1.3.1.- Teórica.

Este trabajo de investigación en la actualidad no se realizó, por lo que se requerirá de teorías generales que estén relacionadas de alguna forma con los materiales involucrados que puedan servir de apoyo o complementación a la investigación, trabajos de como aligerar el hormigón utilizando materiales poco o nada compatibles con el hormigón, esto nos permite explorar y utilizar como ayuda las teorías existentes, para anticipar y poder solucionar los posibles problemas que podamos encontrar a medida que realicemos esta práctica, además debido a la diversidad de factores que intervienen el trabajo este se hace amplio en cuanto a conocimiento requerido habido y por haber entre ellos podemos mencionar:

- Hormigones de menor densidad (ligeros)
- Estudios e investigaciones para aligerar el hormigón
- Contaminación ambiental.
- Tipos, usos y características de los plásticos.

1.3.2.-Metodológica.

Para poder cumplir con los objetivos, es necesario realizar un análisis en base a la información recopilada y que esto nos permita el estudio y aplicación de nuevos métodos prácticos como medio para obtener los resultados deseados, ya que la mayor parte de la investigación contempla el empleo, validación de pruebas en laboratorio de hormigones, además de métodos que no fueron considerados anteriormente en este tipo de trabajos y que ahora serán puestos a prueba.

1.3.3.- Práctica.

La investigación dará como resultado una solución viable al campo de la ingeniería, aportando una alternativa para disminuir el peso en el hormigón además de generar un "impacto positivo directo para la obtención y acreditación de una licencia ambiental" para la construcción de una obra , sustituyendo uno de sus componentes en este caso el agregado grueso además el estudio y aplicación de un nuevo agregado generara una diversidad de ideas en el campo de la ingeniería pudiendo abrir las puertas para un enorme campo de estudio y otros usos de este material contaminante.

1.3.4.-Social.

El proyecto abre las puertas a una serie de efectos favorables a la sociedad entre ellos podemos mencionar:

- La creación de fuentes de empleo para el reciclado del material de PEBD.
- La creación de fuentes de empleo para la elaboración del agregado de PEBD.
- La limpieza de los tiraderos de basura y zonas afectadas con este material.

1.3.5.- Ambiental.

Uno de los efectos más considerables es el aporte que se dará al medio ambiente, ya que utilizando este material de PEBD en el hormigón, estaríamos recolectando los residuos que fueron arrojados y que hoy en día se siguen acumulando generando grandes daños irreversibles al ambiente en donde habitamos.

1.4.- Hipótesis.

El PEBD mediante un proceso de reciclado mecánico pasara a ser un agregado resistente y ligero, capaz de compatibilizar con el hormigón de buena manera y que a medida que este agregado sustituya en diferentes porcentajes al agregado grueso convencional, el resultado será una pérdida de peso considerable en el hormigón y paralelo a ello una disminución de la resistencia a compresión, con el fin de alcanzar un **HORMIGÓN LIGERO** cuya densidad no excede los 2000 kg/m³.

Variable independiente.- APEBD.

Variable dependiente.- Reducción de la masa específica de hormigones convencionales.

Variable interviniente.- Análisis de propiedades físico-mecánicas en laboratorio.

1.5.- Alcance de estudio.

Disminuir el peso del hormigón en función al porcentaje de agregado grueso sustituido por agregado plástico de PEBD, Estudios previos demostraron que el agregado de PEBD posee una densidad de 0.9gr/cm³ es decir 3.25 veces más ligero que el agregado grueso común, además que este puede adquirir la forma, textura del agregado grueso y es capaz de soportar esfuerzos de (38-40kg/cm²).

1.5.1.-Tipo de Estudio.

En este trabajo, donde es relevante la investigación para tener la información necesaria para el cumplimiento de sus objetivos, se puede afirmar que se realizaran dos tipos de estudios que son: en primera instancia un estudio exploratorio y luego concluir con un estudio descriptivo.

El estudio exploratorio nos ayudara a ubicar mejor las características más relevantes del contexto de la investigación y familiarizarnos con los fenómenos relativamente desconocidos.

El estudio descriptivo tendrá como principal propósito dar continuidad a la primera investigación iniciada con un estudio exploratorio. Este estudio permitirá especificar las propiedades importantes de los fenómenos del contexto. Es decir permitirá medir y

evaluar diversos aspectos, dimensiones y componentes relevantes de la investigación.

1.5.2.-Aspectos Metodológicos.

1.5.2.1.- Fuentes y Técnicas para la Recolección de Información

Se tiene fuentes secundarias de algunos estudios realizados con anterioridad, de las cuales se tomaron algunos conceptos y métodos para la elaboración de la propuesta, definición de alternativas e hipótesis de estudio, pero en el desarrollo del estudio se pretende tener información primaria generada de forma personal en base a los ensayos que se realizaron, las pruebas y comparaciones expuestas, de manera que se pueda validar o desmentir la información obtenida por fuentes secundarias.

1.5.2.2.- Desarrollo de la Experiencia

A manera de concluir con la investigación en un semestre calendario de la gestión 2016 se llevara a cabo en primera instancia la elaboración del agregado APEBD, caracterización de los materiales, dosificación y hormigonado de las probetas en laboratorio y garantizar el envejecimiento del hormigón para los posteriores ensayos de laboratorio y de esta manera realizar un estudio técnico y económico de hormigones aligerados con agregado de polietileno de baja densidad.

1.5.2.3.-Consideraciones de Diseño

Para la elaboración del APEBD se realizara el acopio de la materia prima de distintos lugares; botadero municipal, barrios alejados donde se pudo evidenciar grandes cantidades de bolsas plásticas, etc. a manera de reciclar el material, ya que el mismo no es biodegradable y constituye una de las fuentes más grandes que generan contaminación en todo el mundo.

El material en la mayoría de los casos se encuentra con tierra y sustancias que estos contenían, es por ello que se procederá al lavado con detergente y lavandina para quitar todos aquellos materiales perjudiciales para el proceso.

Una vez el material este limpio se procede a realizar el baño María a una temperatura de 120 °C por 10 segundos para que la estructura del PEBD pase a un estado semilíquido.

Se ara prefabricar un molde de fibra de vidrio y/o fundición para que este de forma al agregado con una variación de su tamaño dependiendo de los estudios de granulometrías.

Como punto de partida la resistencia del hormigón deberá ser de 210kg/cm² y un peso específico de 2400 kg/m³, que según la Código Boliviano de Hormigón (CBH-87) es la resistencia característica permitida para la construcción de edificaciones, además que al poseer este una mayor cantidad de cemento podremos garantizar la durabilidad de nuestros elementos.

| Evolución de la Resistencia a compresión de un Hormigón Portland normal | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|
| Edad del hormigón en días | 3 | 7 | 28 | 90 | 360 |
| Resistencia a compresión | 0,40 | 0,65 | 1,00 | 1,20 | 1,35 |

Se realizaran pruebas de ensayo y error para la correcta dosificación del hormigón patrón, garantizando de esta manera obtener una resistencia característica.

La prueba de compresión será realizada en probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro y 30 cm de alto.

Luego del hormigonado proceder con el curado para finalmente realizar el descimbre de probetas.

Posteriormente se llevara a cabo las pruebas de laboratorio, iniciando con los ensayos a compresión de las muestras mediante rotura de probetas, las que serán ensayadas a una edad de 7, 14 y 28 días.

Normas.

- La dosificación del hormigón será realizada con la Norma Americana ACI-211.
- Los ensayos de laboratorio será controladas según la Norma Estándar Americana ASTM.
- Requisitos de Reglamento para Concretos Estructurales ACI 318S-05.

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2. MARCO TEORICO

2.1 El hormigón.

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

El aglomerante es en la mayoría de las ocasiones cemento (generalmente cemento Portland) mezclado con una proporción adecuada de agua para que se produzca una reacción de hidratación. Las partículas de agregados, dependiendo fundamentalmente de su diámetro medio, son los áridos (que se clasifican en grava, gravilla y arena). La sola mezcla de cemento con arena y agua (sin la participación de un agregado) se denomina mortero. Existen hormigones que se producen con otros conglomerantes que no son cemento, como el hormigón asfáltico que utiliza betún para realizar la mezcla.

El cemento es un material pulverulento que por sí mismo no es aglomerante, y que, mezclado con agua, al hidratarse se convierte en una pasta moldeable con propiedades adherentes, que en pocas horas fragua y se endurece, tornándose en un material de consistencia pétreo. El cemento consiste esencialmente en silicato cálcico hidratado (S-C-H). Este compuesto es el principal responsable de sus características adhesivas. Se denomina cemento hidráulico cuando el cemento, resultante de su hidratación, es estable en condiciones de entorno acuoso. Además, para poder modificar algunas de sus características o comportamiento, se pueden añadir aditivos y adiciones (en cantidades inferiores al 1 % de la masa total del hormigón), existiendo una gran variedad de ellos: colorantes, aceleradores y retardadores de fraguado, fluidificantes, impermeabilizantes, fibras, etc.

El hormigón o concreto convencional, normalmente usado en pavimentos, edificios y otras estructuras, tiene un peso específico (densidad, peso volumétrico, masa unitaria) que varía

de 2200 hasta 2400 kg/m³ (137 hasta 150 libras/piés³). La densidad del concreto varía dependiendo de la cantidad y la densidad del agregado, la cantidad de aire atrapado (ocluido) o intencionalmente incluido y las cantidades de agua y cemento. Por otro lado, el tamaño máximo del agregado influye en las cantidades de agua y cemento. Al reducirse la cantidad de pasta (aumentándose la cantidad de agregado), se aumenta la densidad. Algunos valores de densidad para el hormigón fresco se presentan En el diseño del hormigón armado (reforzado), el peso unitario de la combinación del concreto con la armadura normalmente se considera 2400 kg/m³ (150 lb/ft³).

Dependiendo de las proporciones de cada uno de sus constituyentes existen varios tipos de hormigones. Se considera *hormigón pesado* aquel que posee una densidad de más de 3200 kg/m³, debido al empleo de agregados densos (empleado protección contra las radiaciones), el *hormigón normal*, empleado en estructuras, que posee una densidad de 2200 kg/m³, y el *hormigón ligero*, con densidades de 1800 kg/m³.

La principal característica estructural del hormigón es que resiste muy bien los esfuerzos de compresión, pero no tiene buen comportamiento frente a otros tipos de esfuerzos (tracción, flexión, cortante, etc.), y por este motivo es habitual usarlo asociado a ciertas armaduras de acero, recibiendo en este caso la denominación de *hormigón armado*, o *concreto pre reforzado* en algunos lugares. Este conjunto se comporta muy favorablemente ante las diversas sollicitaciones o esfuerzos mencionados anteriormente. Cuando se proyecta una estructura de hormigón armado se establecen las dimensiones de los elementos, el tipo de hormigón, los aditivos y el acero que hay que colocar en función de los esfuerzos que deberá soportar y de las condiciones ambientales a que estará expuesto.

A finales del siglo XX, ya era el material más empleado en la industria de la construcción. Se le da forma mediante el empleo de moldes rígidos denominados: encofrados. Su empleo es habitual en obras de arquitectura e ingeniería, tales como edificios, puentes, diques, puertos, canales, túneles, etc. Incluso en aquellas edificaciones cuya estructura principal se realiza en acero, su utilización es imprescindible para conformar la cimentación. La variedad de hormigones que han ido apareciendo a finales del siglo XX, ha permitido que existan por ejemplo: hormigones reforzados con fibras de vidrio (GRC),

hormigones celulares que se aligeran con aire, aligerados con fibras naturales, autocompactantes.

Características y comportamiento del hormigón.

El hormigón muestra en una de sus secciones muchas escalas de agregación. Resulta necesario investigar en las propiedades microscópicas del hormigón si se desea conocer sus propiedades mecánicas.

El hormigón es el material resultante de unir áridos con la pasta que se obtiene al añadir agua a un conglomerante. El conglomerante puede ser cualquiera, pero cuando nos referimos a hormigón, generalmente es un cemento artificial, y entre estos últimos, el más importante y habitual es el cemento portland. Los áridos proceden de la desintegración o trituración, natural o artificial de rocas y, según la naturaleza de las mismas, reciben el nombre de áridos silíceos, calizos, graníticos, etc. El árido cuyo tamaño sea superior a 5 mm se llama árido grueso o grava, mientras que el inferior a 5 mm se llama árido fino o arena. El tamaño de la grava influye en las propiedades mecánicas del hormigón.

La pasta formada por cemento y agua es la que confiere al hormigón su fraguado y endurecimiento, mientras que el árido es un material inerte sin participación directa en el fraguado y endurecimiento del hormigón. El cemento se hidrata en contacto con el agua, iniciándose diversas reacciones químicas de hidratación que lo convierten en una pasta maleable con buenas propiedades adherentes, que en el transcurso de unas horas, derivan en el fraguado y endurecimiento progresivo de la mezcla, obteniéndose un material de consistencia pétreo.

Una característica importante del hormigón es poder adoptar formas distintas, a voluntad del proyectista. Al colocarse en obra es una masa plástica que permite rellenar un molde, previamente construido con una forma establecida, que recibe el nombre de encofrado

Características mecánicas

La principal característica estructural del hormigón es resistir muy bien los esfuerzos de compresión. Sin embargo, tanto su resistencia a tracción como al esfuerzo cortante son relativamente bajas, por lo cual se debe utilizar en situaciones donde las sollicitaciones por tracción o cortante sean muy bajas. Para determinar la resistencia se preparan ensayos mecánicos (*ensayos de rotura*) sobre probetas de hormigón.

Para superar este inconveniente, se "arma" el hormigón introduciendo barras de acero, conocido como hormigón armado, o concreto reforzado, permitiendo soportar los esfuerzos cortantes y de tracción con las barras de acero. Es usual, además, disponer barras de acero reforzando zonas o elementos fundamentalmente comprimidos, como es el caso de los pilares. Los intentos de compensar las deficiencias del hormigón a tracción y cortante originaron el desarrollo de una nueva técnica constructiva a principios del siglo XX, la del hormigón armado. Así, introduciendo antes del fraguado alambres de alta resistencia tensados en el hormigón, este queda comprimido al fraguar, con lo cual las tracciones que surgirían para resistir las acciones externas, se convierten en descompresiones de las partes previamente comprimidas, resultando muy ventajoso en muchos casos. Para el pretensado se utilizan aceros de muy alto límite elástico, dado que el fenómeno denominado fluencia lenta anularía las ventajas del pretensado. Posteriormente se investigó la conveniencia de introducir tensiones en el acero de manera deliberada y previa al fraguado del hormigón de la pieza estructural, desarrollándose las técnicas del hormigón pretensado y el hormigón postensado.

Los aditivos permiten obtener hormigones de alta resistencia; la inclusión de monómeros y adiciones para hormigón aportan múltiples mejoras en las propiedades del hormigón.

Cuando se proyecta un elemento de hormigón armado se establecen las dimensiones, el tipo de hormigón, la cantidad, calidad, aditivos, adiciones y disposición del acero que hay que aportar en función los esfuerzos que deberá resistir cada elemento. Un diseño racional, la adecuada dosificación, mezcla, colocación, consolidación, acabado y curado, hacen del hormigón un material idóneo para ser utilizado en construcción, por ser resistente, durable, incombustible, casi impermeable, y requerir escaso mantenimiento. Como puede ser

moldeado fácilmente en amplia variedad de formas y adquirir variadas texturas y colores, se utiliza en multitud de aplicaciones.

Características físicas

Las principales características físicas del hormigón, en valores aproximados, son:

- Densidad: en torno a 2350 kg/m^3
- Resistencia a compresión: de 150 a 500 kg/cm^2 (15 a 50 MPa) para el hormigón ordinario. Existen hormigones especiales de alta resistencia que alcanzan hasta 2000 kg/cm^2 (200 MPa).
- Resistencia a tracción: proporcionalmente baja, es del orden de un décimo de la resistencia a compresión y, generalmente, poco significativa en el cálculo global.
- Tiempo de fraguado: dos horas, aproximadamente, variando en función de la temperatura y la humedad del ambiente exterior.
- Tiempo de endurecimiento: progresivo, dependiendo de la temperatura, humedad y otros parámetros.
- De 24 a 48 horas, adquiere la mitad de la resistencia máxima; en una semana $3/4$ partes, y en 4 semanas prácticamente la resistencia total de cálculo.

Dado que el hormigón se dilata y contrae en magnitudes semejantes al acero, pues tienen parecido coeficiente de dilatación térmico, resulta muy útil su uso simultáneo en obras de construcción; además, el hormigón protege al acero de la oxidación al recubrirlo.

Fraguado y endurecimiento

La pasta del hormigón se forma mezclando cemento artificial y agua debiendo beber totalmente a los áridos. La principal cualidad de esta pasta es que fragua y endurece progresivamente, tanto al aire como bajo el agua.

El proceso de fraguado y endurecimiento es el resultado de reacciones químicas de hidratación entre los componentes del cemento. La fase inicial de hidratación se llama fraguado y se caracteriza por el paso de la pasta del estado fluido al estado sólido. Esto se observa de forma sencilla por simple presión con un dedo sobre la superficie del hormigón.

Posteriormente continúan las reacciones de hidratación alcanzando a todos los constituyentes del cemento que provocan el endurecimiento de la masa y que se caracteriza por un progresivo desarrollo de resistencias mecánicas.

El fraguado y endurecimiento no son más que dos estados separados convencionalmente; en realidad solo hay un único proceso de hidratación continuo.^[11]

En el cemento portland, el más frecuente empleado en los hormigones, el primer componente en reaccionar es el aluminato tricálcico con una duración rápida y corta (hasta 7-28 días). Después el silicato tricálcico, con una aportación inicial importante y continua durante bastante tiempo. A continuación el silicato bicálcico con una aportación inicial débil y muy importante a partir de los 28 días.

El fenómeno físico de endurecimiento no tiene fases definidas. El cemento está en polvo y sus partículas o granos se hidratan progresivamente, inicialmente por contacto del agua con la superficie de los granos, formándose algunos compuestos cristalinos y una gran parte de compuestos micro cristalino asimilable a coloides que forman una película en la superficie del grano. A partir de entonces el endurecimiento continúa dominado por estas estructuras coloidales que envuelven los granos del cemento y a través de las cuales progresa la hidratación hasta el núcleo del grano.

El hecho de que pueda regularse la velocidad con que el cemento amasado pierde su fluidez y se endurece, lo hace un producto muy útil en construcción. Una reacción rápida de hidratación y endurecimiento dificultaría su transporte y una cómoda puesta en obra rellenando todos los huecos en los encofrados. Una reacción lenta aplazaría de forma importante el desarrollo de resistencias mecánicas. En las fábricas de cemento se consigue controlando la cantidad de yeso que se añade al clinker de cemento. En la planta de hormigón, donde se mezcla la pasta de cemento y agua con los áridos, también se pueden añadir productos que regulan el tiempo de fraguado.

En condiciones normales un hormigón portland normal comienza a fraguar entre **30 y 45 minutos después de que ha quedado en reposo en los moldes y termina el fraguado trascurridas sobre 10 ó 12 horas**. Después comienza el endurecimiento que lleva un ritmo

rápido en los primeros días hasta llegar al primer mes, para después aumentar más lentamente hasta llegar al año donde prácticamente se estabiliza. En el cuadro siguiente se observa la evolución de la resistencia a compresión de un hormigón tomando como unidad la resistencia a 28 días, siendo cifras orientativas.

Resistencia característica.

En el proyecto previo de los elementos, la *resistencia característica* (f_{ck}) del hormigón es aquella que se adopta en todos los cálculos como resistencia a compresión del mismo, y dando por hecho que el hormigón que se ejecutará resistirá ese valor, se dimensionan las medidas de todos los elementos estructurales.^[14]

La *resistencia característica de proyecto* (f_{ck}) establece por tanto el límite inferior, debiendo cumplirse que cada amasada de hormigón colocada tenga esa resistencia como mínimo. En la práctica, en la obra se realizan ensayos estadísticos de resistencias de los hormigones que se colocan y el 95 % de los mismos debe ser superior a f_{ck} , considerándose que con *el nivel actual de la tecnología del hormigón, una fracción defectuosa del 5 % es perfectamente aceptable.*

La resistencia del hormigón a compresión se obtiene en ensayos de rotura por compresión de probetas cilíndricas normalizadas realizados a los 28 días de edad y fabricadas con las mismas amasadas puestas en obra. La Instrucción española (EHE) recomienda utilizar la siguiente serie de resistencias características a compresión a 28 días (medidas en Newton/mm²): 20; 25; 30, 35; 40; 45 y 50. Por ello, las plantas de fabricación de hormigón suministran habitualmente hormigones que garantizan estas resistencias.

Constituyentes del hormigón

Áridos

Los áridos en el hormigón corresponden a los componentes inertes del hormigón y constituyen entre el 60 y 80 % del volumen del hormigón, teniendo como funciones importantes:

* proveer al hormigón una masa de partículas capaz de resistir los esfuerzos físicos a que ser sometido.

* desplazar volumen con una masa de partículas resistentes a los esfuerzos mecánicos.

* Disminución de los cambios volumétricos (retracciones), como resultado de los procesos de fraguado,

Endurecimiento y cambios de humedad de la pasta de cemento.

* Disminución de las temperaturas de fraguado.

Producción mundial de hormigón

La producción mundial del cemento fue de más de 2.500 millones de toneladas en 2007. Estimando una dosificación de cemento entre 250 y 300 kg de cemento por metro cúbico de hormigón, significa que se podrían producir de 8.000 a 10.000 millones de metros cúbicos, que equivalen a 1,5 metros cúbicos de hormigón por persona. Ningún material de construcción ha sido usado en tales cantidades y en un futuro no parece existir otro material de construcción que pueda competir con el hormigón en magnitud de volumen.

2.2 Recuento Histórico.

Historia del hormigón

La historia del hormigón constituye un capítulo fundamental de la historia de la construcción. Cuando se optó por levantar edificaciones utilizando materiales arcillosos o pétreos, surgió la necesidad de obtener pastas o morteros que permitieran unir dichos mampuestos para poder conformar estructuras estables. Inicialmente se emplearon pastas elaboradas con arcilla, yeso o cal, pero se deterioraban rápidamente ante las inclemencias atmosféricas. Se idearon diversas soluciones, mezclando agua con rocas y minerales triturados, para conseguir pastas que no se degradasen fácilmente. Así, en el Antiguo Egipto se utilizaron diversas pastas obtenidas con mezclas de yesos y calizas disueltas en agua, para poder unir sólidamente los sillares de piedra; como las que aún perduran entre los bloques calizos del revestimiento de la Gran Pirámide de Guiza.

En la Antigua Grecia, hacia el 500 a. C., se mezclaban compuestos de caliza calcinada con agua y arena, añadiendo piedras trituradas, tejas rotas o ladrillos, dando origen al primer

hormigón de la historia, usando tobas volcánicas extraídas de la isla de Santorini. Los antiguos romanos emplearon tierras o cenizas volcánicas, conocidas también como puzolana, que contienen sílice y alúmina, que, al combinarse químicamente con la cal, daban como resultado el denominado cemento puzolánico (obtenido en Pozzuoli, cerca del Vesubio). Añadiendo a su masa trozos de cerámicas u otros materiales de baja densidad (piedra pómez) obtuvieron el primer hormigón aligerado.^[3] Con este material se construyeron desde tuberías a instalaciones portuarias, cuyos restos aún perduran. Destacan construcciones como los diversos arcos del Coliseo romano, los nervios de la bóveda de la Basílica de Majencio, con luces de más de 25 metros, las bóvedas de las Termas de Caracalla, y la cúpula del Panteón de Agripa, de unos 43 metros de diámetro, la de mayor luz durante siglos.

Tras la caída del Imperio romano, el hormigón fue poco utilizado, posiblemente debido a la falta de medios técnicos y humanos, la mala calidad de la cocción de la cal, y la carencia o lejanía de tobas volcánicas. No se encuentran muestras de su uso en grandes obras hasta el siglo XIII, en que se vuelve a utilizar en los cimientos de la Catedral de Salisbury, o en la célebre Torre de Londres, en Inglaterra. Durante el Renacimiento su empleo fue escaso y muy poco significativo.

En algunas ciudades y grandes estructuras, construidas por mayas y aztecas en México o las de Machu Pichu en el Perú, se utilizaron materiales cementantes.

En el siglo XVIII se reaviva el afán por la investigación. John Smeaton, un ingeniero de Leeds fue comisionado para construir por tercera vez un faro en el acantilado de Edystone, en la costa de Cornualles, empleando piedras unidas con un mortero de cal calcinada para conformar una construcción monolítica que soportara la constante acción de las olas y los húmedos vientos; fue concluido en 1759 y la cimentación aún perdura.

El siglo XIX: cemento Portland y hormigón armado

Joseph Aspdin y James Parker patentaron en 1824 el *Portland Cement*, obtenido de caliza arcillosa y carbón calcinados a alta temperatura –denominado así por su color gris verdoso oscuro, muy similar a la piedra de la isla de Pórtland. Isaac Johnson obtiene en 1845 el

prototipo del cemento moderno elaborado de una mezcla de caliza y arcilla calcinada a alta temperatura, hasta la formación del clinker; el proceso de industrialización y la introducción de hornos rotatorios propiciaron su uso para gran variedad de aplicaciones, hacia finales del siglo XIX.

El hormigón, por sus características pétreas, soporta bien esfuerzos de compresión, pero se fisura con otros tipos de sollicitaciones (flexión, tracción, torsión, cortante); la inclusión de varillas metálicas que soportaran dichos esfuerzos propició optimizar sus características y su empleo generalizado en múltiples obras de ingeniería y arquitectura.

La invención del hormigón armado se suele atribuir al constructor William Wilkinson, quien solicitó en 1854 la patente de un sistema que incluía armaduras de hierro para «la mejora de la construcción de viviendas, almacenes y otros edificios resistentes al fuego». El francés Joseph Monier patentó varios métodos en la década de 1860, pero fue François Hennebique quien ideó un sistema convincente de hormigón armado, patentado en 1892, que utilizó en la construcción de una fábrica de hilados en Tourcoing, Lille, en 1895.^[7] Hennebique y sus contemporáneos basaban el diseño de sus patentes en resultados experimentales, mediante pruebas de carga; los primeros aportes teóricos los realizan prestigiosos investigadores alemanes, tales como Wilhelm Ritter, quien desarrolla en 1899 la teoría del «Reticulado de Ritter-Mörsch». Los estudios teóricos fundamentales se gestarán en el siglo XX.

El siglo XX: auge de la industria del hormigón

Puente de hormigón sobre el río Ulla, en Vedra, Galicia, España. El arco principal presenta la ventaja de ser un arco catenario.

Ópera de Sídney, edificio diseñado por el arquitecto danés Jørn Utzon en 1957 e inaugurado en el año 1973, en Sídney, Australia.

A principios del siglo XX surge el rápido crecimiento de la industria del cemento, debido a varios factores: los experimentos de los químicos franceses Louis Vicat y Le Chatelier y el alemán Michaélis, que logran producir cemento de calidad homogénea; la invención del horno rotatorio para calcinación y el molino tubular; y los métodos de transportar hormigón

fresco ideados por Juergen Hinrich Magens que patenta entre 1903 y 1907. Con estos adelantos pudo elaborarse cemento Portland en grandes cantidades y utilizarse ventajosamente en la industria de la construcción.^[3]

Robert Maillart proyecta en 1901 un puente en arco de 38 metros de luz sobre el río Inn, en Suiza, construido con *vigas cajón* de hormigón armado; entre 1904 y 1906 diseña el puente de Tavanasa, sobre el río Rin, con 51 metros de luz, el mayor de Suiza. Claude A.P. Turner realiza en 1906 el edificio *Bovex* de Mineápolis (Estados Unidos), con los primeros pilares fungiformes (de amplios capiteles).

Le Corbusier, en los años 1920, reclama en *Vers une Architecture* una producción lógica, funcional y constructiva, despojada de retóricas del pasado; en su diseño de *Casa Domino*, de 1914, la estructura está conformada con pilares y forjados de hormigón armado, posibilitando fachadas totalmente diáfanas y la libre distribución de los espacios interiores.

Los hangares de Orly (París), diseñados por Freyssinet entre 1921 y 1923, con 60 metros de luz, 9 de flecha y 300 de longitud, se construyen con láminas parabólicas de hormigón armado, eliminando la división funcional entre paredes y techo. En 1929 Frank Lloyd Wright construye el primer rascacielos en hormigón.

En la década de 1960 aparece el hormigón reforzado con fibras, incorporadas en el momento del amasado, dando al hormigón isotropía y aumentando sus cualidades frente a la flexión, tracción, impacto, fisuración, etc. En los años 1970, los aditivos permiten obtener hormigones de alta resistencia, de 120 a más de 200 MPa; la incorporación de monómeros genera hormigones casi inatacables por los agentes químicos o indestructibles por los ciclos hielo-deshielo, aportando múltiples mejoras en diversas propiedades del hormigón.

Los grandes progresos en el estudio científico del comportamiento del hormigón armado y los avances tecnológicos, posibilitaron la construcción de rascacielos más altos, puentes de mayor luz, amplias cubiertas e inmensas presas. Su empleo será insustituible en edificios públicos que deban albergar multitudes: estadios, teatros, cines, etc. Muchas naciones y

ciudades competirán por erigir la edificación de mayor dimensión, o más bella, como símbolo de su progreso que, normalmente, estará construida en hormigón armado.

Los edificios más altos del mundo poseen estructuras de hormigón y acero, tales como las Torres Petronas, en Kuala Lumpur, Malasia (452 metros, 1998), el edificio Taipei 101 en Taiwán (509 metros, 2004), o el Burj Dubai de la ciudad de Dubái (818 metros, 2009), en el siglo XXI.

El siglo XXI: la cultura medioambiental

El uso de *materiales reciclados* como ingredientes del hormigón ha ganado popularidad debido a la cada vez más severa legislación medioambiental, así como la progresiva concienciación de la sociedad. Los ingredientes reciclados más empleados son las cenizas volantes, un subproducto de las centrales termoeléctricas alimentadas por carbón. El impacto ambiental de la industria del cemento es significativo, pero mediante el empleo de estos nuevos materiales se posibilita la reducción de canteras y vertederos, ya que actúan como sustitutos del cemento, y reducen la cantidad necesaria para obtener un buen hormigón. Puesto que uno de los efectos nocivos para el medio ambiente es que la producción de cemento genera grandes volúmenes de dióxido de carbono, la tecnología de sustitución del cemento desempeña un importante papel en los esfuerzos por aminorar las emisiones de dióxido de carbono. Se suele incluir en las mezclas ciertos catalizadores que permiten su 'auto lavado' como es el caso del dióxido de titanio.

También se utiliza para confinar desechos radiactivos. Entre ellos, el más importante es el del reactor nuclear que colapsó en la central de Chernobil, el cual fue cubierto de hormigón para evitar fugas radiactivas.

2.3 Clasificación del hormigón.

Podemos clasificar el hormigón de acuerdo a las siguientes características.

2.3.1 Por consistencia

La consistencia es la mayor o menor facilidad que tiene el hormigón fresco para deformarse y consiguientemente para ocupar todos los huecos del molde o encofrado. Influyen en ella distintos factores, especialmente la cantidad de agua de amasado, pero también el tamaño máximo del árido, la forma de los áridos y su granulometría

La consistencia se fija antes de la puesta en obra, analizando cual es la más adecuada para la colocación según los medios que se dispone de compactación. Se trata de un parámetro fundamental en el hormigón fresco.

Entre los ensayos que existen para determinar la consistencia, el más empleado es *el cono de Abrams*. Consiste en llenar con hormigón fresco un molde troncocónico de 30 cm de altura. La pérdida de altura que se produce cuando se retira el molde, es la medida que define la consistencia.

Los hormigones se clasifican por su consistencia en secos, plásticos, blandos y fluidos tal como se indica en la tabla siguiente:

| Consistencia de los hormigones frescos | | |
|---|---------------------------------------|-------------------------|
| <i>Consistencia</i> | <i>Asiento en cono de Abrams (cm)</i> | <i>Compactación</i> |
| <i>Seca</i> | 0-2 | Vibrado |
| <i>Plástica</i> | 3-5 | Vibrado |
| <i>Blanda</i> | 6-9 | Picado con barra |
| <i>Fluida</i> | 10-15 | Picado con barra |
| <i>Líquida</i> | 16-20 | Picado con barra |

Tabla 2.1 consistencia para hormigones

FUENTE: especificaciones estándar para el hormigón

2.3.2 Por resistencia

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

Las resistencias deberían de ser medidas 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.

En la mayoría de los países del mundo se mide la resistencia pro medio de morteros hechos con materiales específicos y en condiciones muy controladas, las pruebas de resistencia son a compresión, tensión y flexión, siendo la primera la más impórtate puesto que lo restante tiene un valor muy pequeño relativo a la compresión.

De acuerdo al punto de vista de la resistencia a compresión a los 28 días en hormigón se puede clasificar en:

| tipo | resistencia (kg/cm2) | | edad días |
|------------------------|----------------------|----------|-----------|
| | minimo | maximo | |
| normal | 140 | 350 | 28 |
| alta resistencia | 350 | 1000 | 28 |
| ultra alta resistencia | 1000 | superior | 28 |

Tabla 2.2 resistencia para hormigones

FUENTE: tecnología del hormigón

En nuestro caso trabajaremos con un hormigón normal cuya resistencia a los 28 días es de 210kg/cm2, este valor se encuentra entre los rangos.

2.3.3 Por peso unitario

| tipo | peso unitario kg/m3 |
|------------------------|---------------------|
| <i>hormigon ligero</i> | > 2000 |
| <i>hormigon normal</i> | 2000 a 2600 |
| <i>hormigon pesado</i> | <2600 |

Tabla 2.3 clasificación del hormigón por peso unitario

FUENTE: norma CBH-87

2.3.3.1 hormigón ligero (liviano)

Se designa convencionalmente como hormigones livianos a aquellos que poseen características propias, que mediante métodos en su elaboración se ha hecho más ligero que el hormigón convencional de cemento, arena y grava, el cual durante muchos años ha sido empleado como el material principal en el área de la construcción.

El hormigón liviano fue clasificado e identificado durante mucho tiempo por la densidad que presenta, debido a que este es inferior a 2400 kg/m³ que es la densidad que fluctúa el hormigón normal. La característica más evidente del hormigón liviano es, por supuesto su densidad, la cual es considerablemente menor que la del hormigón normal y con frecuencia es una fracción de la misma.

Se presentan muchas ventajas al tener materiales de baja densidad, como por ejemplo:

- Se reduce la carga muerta
- Mayor rapidez en la construcción
- Menores costos de transporte
- Conductividad térmica relativamente baja

Una conductividad térmica baja, reduce el consumo de energía de los aires acondicionados, el hormigón liviano por su baja conductividad térmica mejora el ambiente y mantiene una temperatura confortable dentro de ellos.

2.3.3.1.1 Origen e historia

Los primeros hormigones livianos utilizados para construir edificaciones surgieron en el Imperio Romano en los años 20 a.C, estos primeros hormigones eran resultados de la mezcla de materiales cementales formados a partir de limos quemados con materiales de baja densidad como lo es la piedra pómez.

Entre las obras realizadas con este tipo de hormigones destacan: la cúpula del panteón de Agripa (25 a.C) , los arcos del coliseo Romano (70 d.C), con luces mayores a los 25 metros.

Los primeros edificios construidos con hormigones estructurales livianos aparecieron luego de la primera guerra mundial. En el año 1922 se construyó la ampliación del gimnasio de la escuela de deportes acuáticos de la ciudad de Kansas y fue este el primer edificio construido con hormigón liviano estructural en la historia. El suelo donde se cimento este

edificio tenía una capacidad portante muy baja, por esta razón se optó por utilizar un hormigo liviano y poder así aligerar el peso que se descargaba en el suelo.

Para el año 1928 se realizó un estudio para incrementar el número de pisos del edificio de oficinas de la compañía de teléfono Southwestern Bell en la ciudad de Kansas .Originalmente el edificio constaba con 14 pisos , se realizaron estudios en la cimentación y se determinó que a la estructura se la podía adicionar 8 pisos más utilizando hormigón convencional . Pero debido a que se utilizó hormigón liviano fabricado con arcillas expandidas se pudo aumentar la estructura hasta 14 pisos más.

Con los avances de la tecnología se experimentaron con nuevos tipos de agregados livianos como las arcillas, pizarras y escorias expandidas procedentes de plantas industriales, también se ha experimentado con agregados artificiales plásticos como el poli estireno y agregados ricos en sílice como la cascarilla de arroz.

Para la década del 50 y 60, se instalaban en el mundo plantas de agregados livianos. En Latinoamérica, Venezuela, para el año 1969 se instalaba también una planta sobre un yacimiento de 50 Has de arcilla que aun constituye su materia prima.

2.3.3.1.2 Definición y clasificación

Se designa convencionalmente como hormigones livianos a aquellos que producen una densidad que fluctúa entre 300 kg/m^3 y los 1900 kg/m^3 . Ya que los normales presentan una densidad normal de 2400 kg/m^3 .

Por su aplicación el hormigón liviano se clasifica en:

➤ **Hormigón de relleno.**

Es aquel cuya densidad está comprendida entre 300 kg/m^3 y los 1000 kg/m^3 . estos hormigones son buenos aislantes térmicos, pero poseen bajas resistencias por lo que no son utilizados en elementos estructurales. El hormigón de relleno es una mezcla fluida que tiene la finalidad de solidarizar las armaduras con la mampostería, llenando los huecos donde se encuentra. El tamaño máximo del agregado debe ser

de 25mm a fin de evitar que quede oquedades en la estructura, el hormigón de relleno deberá de tener la fluidez necesaria para obtener un llenado integrado.

➤ **Hormigón aislante.**

Es aquel cuya densidad es menor a los 800kg/m^3 , su resistencia a la compresión está comprendida entre $0,7\text{ MPa}$ y 7MPa , además se clasifican en función al coeficiente de conductividad térmica que debe de estar por debajo de los $0,3\text{ J/ms}^\circ\text{C}$ y su densidad es más baja que para los hormigones livianos estructurales. Además centra sus características en la incorporación como componente fundamental del poli estireno expandido, el cual le confiere al hormigón sus prestaciones desde el punto de vista de aislamiento y acústico.

➤ **Hormigón estructural o de alto desempeño.**

El hormigón estructural liviano comparado con el hormigón estructural tradicional es de 25% a un 35% más liviano. Se clasifica en función de una resistencia mínima, una densidad en estado seco que generalmente no excede los 1840 kg/m^3 .

Se obtiene a partir de:

- Agregados livianos y cuyo peso unitario seco esta entre 1600 kg/m^3 y 1760 kg/m^3 y su esfuerzo mínimo a la compresión a los 28 días es de $12,5\text{ MPa}$.
- Arena natural y agregado grueso liviano cuyo peso unitario seco esta entre los 1680 kg/m^3 y los 1840 kg/m^3 y su esfuerzo mínimo a la compresión a los 28 días es de 17 Mpa .
- Se lo emplea en edificios de estructuras de acero, hormigón de edificios y estructuras de estacionamiento. Elementos pre fabricados de hormigón como vigas doble Te, paneles de planchas de hormigón y bóvedas entre otros. Estructuras marinas, muelles flotantes, puentes, buques y plataformas de petróleo.

2.3.3.1.3 Tipos de hormigón liviano de acuerdo a su tipo de producción

Para la construcción de hormigón liviano básicamente se da por la inclusión de aire en su estructura, por lo cual podemos clasificar al hormigón por su tipo de producción en tres maneras:

a) Hormigón de agregado ligero

Uso de agregados livianos porosos de baja gravedad específica aparente, es decir substituyendo los agregados naturales que tiene una densidad promedio de 2600 kg/m^3 por agregados de baja densidad aparente que pueden llegar a valores de 10 kg/m^3 como en el caso de poliestireno expandido, o de 1250 kg/m^3 , como por ejemplo la escoria de horno.



Figura 2.1 Agregado grueso arcilla expandida

FUENTE: Elaboración propia

b) Hormigón aireado, celular, espumoso o gaseoso

Se logra introduciendo vacíos dentro del hormigón que se distinguen de los huecos producidos por el arrastre de aire, es decir produciendo burbujas de aire en gran

cantidad dentro de un mortero de hormigón, de manera que al fraguar quede con una estructura celular esponjosa.



Figura 2.2 hormigón aireado

FUENTE: Elaboración propia

c) Hormigón sin finos

Se omite de agregados finos, por lo que gran número de vacíos intersticiales están presentes, los agregados gruesos son de peso específico normal.

2.3.3.1.4 características físicas y químicas (ventajas y desventajas)

Las características físicas y químicas que se generan por los agregados o el tipo de mezcla para la elaboración de hormigón liviano presentan ciertas ventajas las cuales se ponen a consideración del ingeniero para el tipo de proyecto que se tenga en mente.

Las ventajas que presenta este tipo de hormigón son:

- ✓ *Permite disminuir el peso en estructuras y cargas a cimentación.*
- ✓ *Por sus características termo-acústicas.*

Ofrece un ahorro significativo en el consumo de energía eléctrica, en particular en sitios con clima extremo.
- ✓ *No requiere compactación; su colocación y acabado son más económicos.*
- ✓ *Fraguado uniforme y controlado.*
- ✓ *Baja densidad.*

Los hormigones livianos presentan densidades que varían entre los 300kg/m^3 , dando facilidad para realizar obras que al igual volumen de hormigón normal produzcan menor peso.

✓ ***Buena aislación térmica.***

El coeficiente de conductividad térmica, decrece al disminuir la densidad del hormigón, esto se debe por la utilización de agregado de baja densidad o por la generación de burbujas de aire que se incorpora durante el proceso de mezclado.

✓ ***Buena aislación acústica.***

Dicha absorción de sonidos se debe a la existencia de cámaras de aire en la textura de los hormigones de agregados livianos que hace que estos ofrezcan resistencia al paso del sonido.

✓ ***Mejor resistencia al fuego que el concreto convencional.***

Este tipo de hormigones tiene una gran resistencia al fuego debido a que posee un abajo coeficiente de dilatación y una elevada aislación térmica.

✓ ***Excelente trabajabilidad.***

Debido al bajo peso que presentan los hormigones livianos contribuyen a las condiciones de trabajo, logrando mayor rapidez y mejor desempeño del trabajador.

✓ ***Bajo módulo de elasticidad.***

Ayuda a resistir mejor las cargas de impacto.

✓ ***Absorción.***

Regulan la humedad del ambiente e impiden la condensación superficial.

Las desventajas que presenta este tipo de hormigón son:

- ✓ los agregados livianos podrían ser más caros que la grava común , pero esta diferencia podría ser compensada con un menor costo de transporte e incluso puede influir en tipo de cimentación favorablemente
- ✓ .debido a que el módulo de elasticidad es bajo se puede producir mayores deformaciones a las de un hormigón convencional.
- ✓ No se puede determinar el grado de incidencia en la relación de agua/ cemento debido a su gran o poca absorción.

- ✓ La falta de experiencia en el uso del hormigón liviano lo cual genere inconvenientes en su uso y elaboración.

2.3.3.1.5 Uso y aplicaciones.

La aplicación que se le puede dar al hormigón liviano se basa exclusivamente en el diseño que se le dé además de los agregados ecológicos para la elaboración del mismo.

El hormigón liviano es ideal para la construcción de elementos secundarios en edificios o viviendas, que requieran de ser ligeros a fin de reducir las cargas muertas; para colar elementos de relleno que no soporten cargas estructurales; para la construcción de viviendas con características de aislamiento térmico.

Entre las aplicaciones más importantes para el hormigón liviano podemos resaltar lo siguiente:

- Losas y muros para casas.
- Construcción de bloques de mampostería.
- Ductos de ventilación
- Vigas y paneles pre-fabricados.
- Edificios en zonas sísmicas.
- Puentes.
- Muros divisorios.
- Capas de nivelación de losas y pisos.
- Rellenos para nivelar y como aislante.
- Otros.

2.4 Componentes del hormigón.

El hormigón se compone por: cemento, arena, grava y agua.

2.4.1 Cemento

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

Hay varios tipos de cementos. Las propiedades de cada uno de ellos están íntimamente asociadas a la composición química de sus componentes iniciales, que se expresa en forma de sus óxidos, y que según cuales sean formaran compuestos resultantes distintos en las reacciones de hidratación.

Cada tipo de cemento está indicado para unos usos determinados; también las condiciones ambientales determinan el tipo y clase del cemento afectando a la durabilidad de los hormigones. Los tipos y denominaciones de los cementos y sus componentes están normalizados y sujetos a estrictas condiciones. La norma española establece los siguientes tipos: cementos comunes, los resistentes a los sulfatos, los resistentes al agua de mar, los de bajo calor de hidratación, los cementos blancos, los de usos especiales y los de aluminato de calcio. Los cementos comunes son el grupo más importante y dentro de ellos el portland es el habitual. En España solo pueden utilizarse los cementos legalmente comercializados en la Unión Europea y están sujetos a lo previsto en leyes específicas.

Además del tipo de cemento, el segundo factor que determina la calidad del cemento, es su clase o resistencia a compresión a 28 días. Esta se determina en un mortero normalizado y expresa la resistencia mínima, la cual debe ser siempre superada en la fabricación del cemento. No es lo mismo, ni debe confundirse la resistencia del cemento con la del hormigón, pues la del cemento corresponde a componentes normalizados y la del hormigón dependerá de todos y cada uno de sus componentes. Pero si el hormigón está bien dosificado a mayor resistencia del cemento corresponde mayor resistencia del hormigón.

El cemento se encuentra en polvo y la finura de su molido es determinante en sus propiedades conglomerantes, influyendo decisivamente en la velocidad de las reacciones químicas de su fraguado y primer endurecimiento. Al mezclarse con el agua los granos de cemento se hidratan solo en una profundidad de 0,01 mm, por lo que si los granos fuesen muy gruesos el rendimiento de la hidratación sería pequeño al quedar en el interior un núcleo inerte. Sin embargo una finura excesiva provoca una retracción y calor de

hidratación elevados. Además dado que las resistencias aumentan con la finura hay que llegar a una solución de compromiso, el cemento debe estar finamente molido pero no en exceso.

El almacenamiento de los cementos a granel se realiza en silos estancos que no permitan la contaminación del cemento y deben estar protegidos de la humedad. En los cementos suministrados en sacos, el almacenamiento debe realizarse en locales cubiertos, ventilados, protegidos de la lluvia y del sol. Un almacenamiento prolongado puede provocar la hidratación de las partículas más finas por meteorización perdiendo su valor hidráulico y que supone un retraso del fraguado y disminución de resistencias

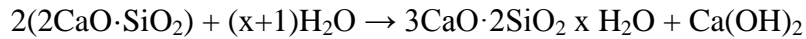
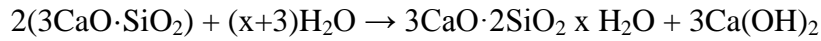
2.4.1.1 Cemento Portland

El cemento Portland se obtiene al calcinar a unos 1500 °C mezclas preparadas artificialmente de calizas y arcillas. El producto resultante, llamado clinker, se muele añadiendo una cantidad adecuada de regulador de fraguado, que suele ser piedra de yeso natural.

La composición química media de un portland, según Calleja, está formada por un 62,5 % de CaO (cal combinada), un 21 % de SiO₂ (sílice), un 6,5 % de Al₂O₃ (alúmina), un 2,5 % de Fe₂O₃ (hierro) y otros minoritarios. Estos cuatro componentes son los principales del cemento, de carácter básico la cal y de carácter ácido los otros tres. Estos componentes no se encuentran libres en el cemento, sino combinados formando silicatos, aluminatos y ferritos cálcicos, que son los componentes hidráulicos del mismo o componentes potenciales. Un clinker de cemento portland de tipo medio contiene

- Silicato tricálcico (3CaO·SiO₂)..... 40 % a 50 %
- Silicato bicálcico (2CaO·SiO₂)..... 20 % a 30 %
- Aluminato tricálcico (3CaO·Al₂O₃)..... 10 % a 15 %
- Aluminato ferrito tetracálcico (4CaO·Al₂O₃·Fe₂O₃)..... 5 % a 10 %

Las dos principales reacciones de hidratación, que originan el *proceso de fraguado y endurecimiento* son:



El silicato tricálcico es el compuesto activo por excelencia del cemento pues desarrolla una resistencia inicial elevada y un calor de hidratación también elevado. Fragua lentamente y tiene un endurecimiento bastante rápido. En los cemento de endurecimiento rápido y en los de alta resistencia aparece en una proporción superior a la habitual.

El silicato bicálcico es el que desarrolla en el cemento la resistencia a largo plazo, es lento en su fraguado y en su endurecimiento. Su estabilidad química es mayor que la del silicato tricálcico, por ello los cementos resistentes a los sulfatos llevan un alto contenido de silicato bicálcico.

El aluminato tricálcico es el compuesto que gobierna el fraguado y las resistencias a corto. Su estabilidad química es buena frente al agua de mar pero muy débil a los sulfatos. Al objeto de frenar la rápida reacción del aluminato tricálcico con el agua y regular el tiempo de fraguado del cemento se añade al clinker piedra de yeso.

El aluminato ferrito tetracálcico no participa en la resistencia mecánica, su presencia es necesaria por el aporte de fundentes de hierro en la fabricación del Clinker.



Figura 2.3 Cemento portland tipo IP-30

FUENTE: Elaboración propia

2.4.1.2 Otros cementos.

En España existen los llamados «cementos portland con adiciones activas» que además de los componente principales de clinker y piedra de yeso, contienen uno de estos componentes adicionales hasta un 35 % del peso del cemento: escoria siderúrgica, humo de sílice, puzolana natural, puzolana natural calcinada, ceniza volante silíceo, ceniza volante calcárea, esquistos calcinados o caliza.

Los cementos de alta resistencia inicial, los resistentes a los sulfatos, los de bajo calor de hidratación o los blancos suelen ser portland especiales y para ellos e limitan o potencian alguno de los cuatro componentes básicos del clinker.

El cemento siderúrgico se obtiene por molturación conjunta de clinker de portland y regulador de fraguado en proporción de 5-64 % con escoria siderúrgica en proporción de 36-95 %. Constituye la familia de los cementos fríos. La escoria se obtiene enfriando bruscamente en agua la ganga fundida procedente de procesos siderúrgicos; en este enfriamiento la escoria se vitrifica y se vuelve activa hidráulicamente por su contenido en cal combinada. La escoria por si sola fragua y endurece lentamente, por lo que para acelerarlo se añade el clinker de portland.

El cemento puzolánico es una mezcla de clinker de portland y regulador de fraguado en proporción de 45-89 % con puzolana en proporción del 11-55 % La puzolana natural tiene origen volcánico y aunque no posee propiedades conglomerantes contiene sílice y alúmina capaces de fijar la cal en presencia de agua formando compuestos con propiedades hidráulicas. La puzolana artificial tiene propiedades análogas y se encuentran en las cenizas volantes, la tierra de diatomeas o las arcillas activas.

El cemento aluminoso se obtiene por fusión de caliza y bauxita. El constituyente principal de este cemento es el aluminato monocálcico.

2.4.2 Áridos (arena y grava).

Los áridos deben poseer por lo menos la misma resistencia y durabilidad que se exija al hormigón. No se deben emplear calizas blandas, feldespatos, yesos, piritas o rocas

friables o porosas. Para la durabilidad en medios agresivos serán mejores los áridos silíceos, los procedentes de la trituración de rocas volcánicas o los de calizas sanas y densas.

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

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

Si los áridos rodados están contaminados o mezclados con arcilla, es imprescindible lavarlos para eliminar la camisa que envuelve los granos y que disminuiría su adherencia a la pasta de hormigón. De igual manera los áridos de machaqueo suelen estar rodeados de polvo de machaqueo que supone un incremento de finos al hormigón, precisa más agua de amasado y darán menores resistencias por lo que suelen lavarse.

Los áridos que se emplean en hormigones se obtienen mezclando tres o cuatro grupos de distintos tamaños para alcanzar una granulometría óptima. Tres factores intervienen en una granulometría adecuada: el tamaño máximo del árido, la compacidad y el contenido de granos finos. Cuando mayor sea el tamaño máximo del árido, menores serán las necesidades de cemento y de agua, pero el tamaño máximo viene limitado por las dimensiones mínimas del elemento a construir o por la separación entre armaduras, ya que esos huecos deben quedar rellenos por el hormigón y, por tanto, por los áridos de mayor tamaño. En una mezcla de áridos una compacidad elevada es aquella que deja pocos huecos; se consigue con mezclas pobres en arenas y gran proporción de áridos gruesos, precisando poca agua de amasado; su gran dificultad es conseguir compactar el hormigón, pero si se dispone de medios suficientes para ello el resultado son hormigones muy resistentes. En cuanto al contenido de granos finos, estos hacen la mezcla más trabajable

pero precisan más agua de amasado y de cemento. En cada caso hay que encontrar una fórmula de compromiso teniendo en cuenta los distintos factores. Las parábolas de Fuller y de Bolomey dan dos familias de curvas granulométricas muy utilizadas para obtener adecuadas dosificaciones de áridos.

2.4.3 Agua.

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

Las características del agua para el hormigón deben ser evaluadas para que no produzca reacciones adversas en la mezcla, es por ello que se debe realizar análisis fisicoquímicos para garantizar su calidad. En la práctica un indicador simple es la potabilidad del agua, con ello podemos determinar si el agua es adecuada para su uso en la mezcla o no.

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

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

Cuando una masa es excesivamente fluida o muy seca hay peligro de que se produzca el fenómeno de la segregación (separación del hormigón en sus componentes: áridos,

cimento y agua). Suele presentarse cuando se hormigona con caídas de material superiores a los 2 metros.

2.5 Fabricación del hormigón.

Es muy importante conseguir la mezcla óptima en las proporciones precisas de áridos de distintos tamaños, cemento y agua. No hay una mezcla óptima que sirva para todos los casos. Para establecer la dosificación adecuada en cada caso se debe tener en cuenta la resistencia mecánica, factores asociados a la fabricación y puesta en obra, así como el tipo de ambiente a que estará sometido.

Hay muchos métodos para dosificar previamente el hormigón, pero son solo orientativos. Las proporciones definitivas de cada uno de los componentes se suelen establecer mediante ensayos de laboratorio, realizando correcciones a lo obtenido en los métodos teóricos.

Se señalan brevemente los aspectos básicos que hay que determinar:

- La *resistencia característica* (f_{ck}) se fija en el proyecto.
- La selección del tipo de cemento se establece en función de las aplicaciones del hormigonado (en masa, armado, pretensado, prefabricado, de alta resistencia, desencofrado rápido, hormigonados en tiempo frío o caluroso, etc.) y del tipo de ambiente a que estará expuesto.
- El tamaño máximo del árido interesa que sea el mayor posible, ***pues a mayor tamaño menos agua necesitará*** ya que la superficie total de los granos de áridos a rodear será más pequeña. Pero el tamaño máximo estará limitado por los espacios que tiene que ocupar el hormigón fresco entre dos armaduras cercanas o entre una armadura y el encofrado.
- La consistencia del hormigón se establece en función del tamaño de los huecos que hay que rellenar en el encofrado y de los medios de compactación previstos.
- La cantidad de agua por metro cúbico de hormigón. Conocida la consistencia, el tamaño máximo del árido y si la piedra es canto rodado o de machaqueo es inmediato establecer la cantidad de agua que se necesita.

- La relación agua/cemento depende fundamentalmente de la resistencia del hormigón, influyendo también el tipo de cemento y los áridos empleados.
- Conocida la cantidad de agua y la relación agua /cemento, determinamos la cantidad de cemento.
- Conocida la cantidad de agua y de cemento, el resto serán áridos.
- Determinar la composición granulométrica del árido, que consiste en determinar los porcentajes óptimos de los diferentes tamaños de áridos disponibles. Hay varios métodos, unos son de granulometría continua, lo que significa que interviene todos los tamaños de áridos, otros son de *granulometría discontinua donde falta algún tamaño intermedio de árido*.

Determinada la dosificación más adecuada, en la planta de hormigón hay que medir los componentes, el agua en volumen, mientras que el cemento y áridos se miden en peso.

2.6 Curado del hormigón.

El curado es una de las operaciones más importantes en el proceso de puesta en obra por la influencia decisiva que tiene en la resistencia del elemento final. *Durante el fraguado y primer endurecimiento se producen pérdidas de agua por evaporación, formándose huecos capilares en el hormigón que disminuyen su resistencia.* En particular el calor, la sequedad y el viento provocan una evaporación rápida del agua incluso una vez compactado. Es preciso compensar estas pérdidas curando el hormigón añadiendo abundante agua que permita que se desarrollen nuevos procesos de hidratación con aumento de la resistencia.

Hay varios procedimientos habituales para curar el hormigón. Desde los que protegen del sol y del viento mediante tejadillos móviles, plásticos; mediante riegos de agua en la superficie; *la inmersión en agua empleada en prefabricación*; los productos de curado aplicados por pulverización; los pulverizados a base de resinas forman una película que impide la evaporación del agua, se trata de uno de los sistemas más eficaces y más costosos.

2.7 Ensayos en el hormigón.

Generalidades y clasificación:

El ensayo del hormigón se realiza en sus dos estados; fresco para conocer sus características y endurecido para determinar sus cualidades y resistencia. El comportamiento de un hormigón frente a los distintos esfuerzos es variable y complejo.

Clasificación:

1) Según su naturaleza:

Destructivos: determinan la resistencia mediante la rotura de probetas o piezas de hormigón.

No destructivos: determinan la calidad sin destruir la estructura.

2) Según su finalidad:

Ensayos previos: determinan la dosificación del material de acuerdo con las condiciones de ejecución. Se realizan antes de comenzar las obras.

Ensayos característicos: comprueban que la resistencia y dispersión del hormigón en obra se encuentran dentro de los límites del proyecto.

Ensayos de control: con probetas moldeadas en obra para comprobar que la resistencia del hormigón se mantiene igual o mayor que la exigida.

Ensayos de información: pretenden conocer la resistencia del hormigón correspondiente a una parte de la obra y a una edad determinada.

Ensayos del hormigón fresco

Ensayos de consistencia.

% Cono de Abrams:

. Se utiliza un molde sin fondo de forma troncocónica, provisto de dos asas para manipularlo, con unas dimensiones interiores específicas.

. Se coloca el molde sobre una superficie plana, rígida e impermeable. Se humedece el interior del molde y la superficie. Se introduce el hormigón y enrasa la superficie.

. Se desmolda inmediatamente, levantando el cono despacio y en dirección vertical sin sacudidas y medimos el punto más alto de la masa asentada.

. El ensayo no se aplica con áridos > 40 mm.

Ensayos mecánicos mediante probetas enmoldadas.

Definición de las probetas y moldes:

- . La forma y dimensiones de las probetas deben ser proporcionales al tamaño del árido.
- . Los moldes deben ser rígidos y no absorbentes. Se untan con aceite mineral o otra sustancia que no ataque al cemento y evite la adherencia.

Preparación de las probetas:

- . Si el asiento en el Cono de Abrams < 4 cm Compactación por vibrado " 4 cm Compactación por picado
- . Una vez compactado el hormigón debe ser enrasada con pasta de cemento la parte superior de la probeta.
- . Las probetas se manipularán lo mínimo posible y se cubrirán para evitar la desecación.

Conservación:

- . Hemos de tener mucho cuidado en el transporte y conservación y se debe hacer en un lugar adecuado, con una humedad y temperatura determinadas.
- . Cuando se trata de hormigón en obra debe conservarse con unas condiciones lo más parecidas a las de la estructura de ensayo.

| Edad de hormigón, en días | 3 | 7 | 28 | 90 | 360 |
|--|------|------|------|------|------|
| Cemento Portland normal | 0.40 | 0.65 | 1.00 | 1.20 | 1.35 |
| Cemento Portland de alta resistencia inicial | 0.55 | 0.75 | 1.00 | 1.15 | 1.20 |

Tabla 2.4 Resistencia del hormigón de acuerdo al tipo de cemento

FUENTE: Elaboración propia

2.8 El polietileno.

El **polietileno** (PE) es químicamente el polímero más simple. Se representa con su unidad repetitiva $(\text{CH}_2\text{-CH}_2)_n$. Es uno de los plásticos más comunes debido a su bajo precio y simplicidad en su fabricación, lo que genera una producción de aproximadamente **60 millones de toneladas anuales** alrededor del mundo. Es químicamente inerte. Se obtiene de la polimerización del etileno (de fórmula química $\text{CH}_2=\text{CH}_2$ y llamado *eteno* por la IUPAC), del que deriva su nombre.

Este polímero puede ser producido por diferentes reacciones de polimerización, como por ejemplo: Polimerización por radicales libres, polimerización aniónica, polimerización por coordinación de iones o polimerización catiónica. Cada uno de estos mecanismos de reacción produce un tipo diferente de polietileno.

Usos:

PEBD (POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD)

- Bolsas de todo tipo: supermercados, boutiques, panificación, congelados, industriales, etc.;
- Películas para agro.
- Recubrimiento de acequias.
- Envasado automático de alimentos y productos industriales: leche, agua, plásticos, etc.
- Contenedores herméticos domésticos.
- Tubos y pomos: cosméticos, medicamentos y alimentos
- Tuberías para riego.

PEAD: (POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD)

- Envases para: detergentes, lejía, aceites automotores, champú, lácteos.
- Bolsas para supermercados.
- Cajones para pescados, gaseosas, cervezas.
- Envases para pintura, helados, aceites.
- Tambores.
- Tuberías para gas, telefonía, agua potable, minería, láminas de drenaje y uso sanitario.
- Macetas.
- Bolsas tejidas.

2.8.1 polietileno de baja densidad (PEBD)

El polietileno de baja densidad a veces es llamado polietileno de baja densidad y alta presión para diferenciarlo del polietileno de baja densidad y baja presión o del polietileno lineal de baja densidad. El polietileno de baja densidad se hace comúnmente por polimerización del etileno a alta presión para formar moléculas de polietileno.

El polietileno, es el termoplástico más usado actualmente, se trata de un plástico barato que puede moldearse a casi cualquier forma, extruirse para hacer fibras o soplarse para formar películas delgadas.

El polietileno pertenece al grupo de polímeros denominados poliolefinas. Estas provienen de hidrocarburos simples, compuestos por átomos de carbono e hidrógeno y con dobles enlaces.



Figura 2.4 Simbología del polietileno de baja densidad (PEBD)

FUENTE: simbología para plásticos

2.8.1.1 Historia.

El polietileno fue sintetizado por primera vez por el químico alemán Hans von Pechmann quien por accidente lo preparó en 1898 mientras se calentaba en la estufa diazometano. Cuando sus compañeros Eugen Bamberger y Friedrich Tschirner investigaron la sustancia grasosa y blanca creada, descubrieron largas cadenas compuestas por $-CH_2-$ y lo llamaron polimetileno.

El 27 de marzo de 1933, en Inglaterra, fue sintetizado tal como lo conocemos hoy en día, por Reginald Gibson y Eric Fawcett que trabajaban para los Laboratorios ICI. Lo lograron aplicando una presión de aproximadamente 1400 bar y una temperatura de 170 °C en un autoclave, obteniendo el material de alta viscosidad y color blanquecino que se conoce hoy en día como "polietileno de baja densidad" (PEBD o, en inglés, LDPE).

La altísima presión requerida para lograr la polimerización del etileno era un inconveniente económico. Por ello varios investigadores comenzaron a buscar catalizadores que permitiesen la polimerización a presión más reducida. Esto dio origen a los catalizadores

Ziegler-Natta, por los cuales Karl Ziegler y Giulio Natta recibieron el premio Nobel de química en 1963.

Estructura química.

El polietileno de baja densidad es un polímero con una estructura de cadenas muy ramificadas; esto hace que tenga una densidad más baja que la del PEAD (0,92-0,94 g/cm³).

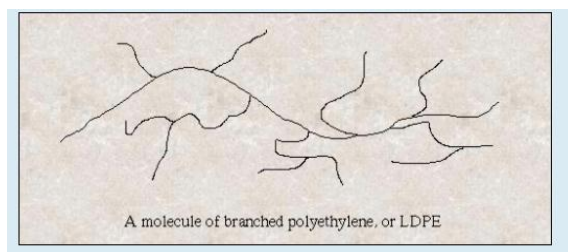


Figura 2.5 Estructura del PEBD

FUENTE: tecnología del plástico Guzmán Díaz

Podemos mencionar las siguientes propiedades con la que consta este material:

| PROPIEDADES FÍSICAS | |
|---|------------------------|
| Absorción de agua en 24h (%) | < 0,015 |
| Densidad (g/cm ³) | 0,915-0,935 |
| Índice refractivo | 1,51 |
| Resistencia a la radiación | Aceptable |
| Resistencia al ultra-violeta | Mala |
| Coefficiente de expansión lineal (K ⁻¹) | 1,7 x 10 ⁻⁴ |
| Grado de cristalinidad (%) | 40-50 |

Tabla 2.5 propiedades físicas del PEBD

FUENTE: Elaboración propia

| PROPIEDADES MECÁNICAS |
|------------------------------|
|------------------------------|

| | |
|---|---------|
| Módulo elástico E (N/mm ²) | 200 |
| Coeficiente de fricción | - |
| Módulo de tracción (GPa) | 0,1-0,3 |
| Relación de Poisson | - |
| Resistencia a tracción (MPa) | 5-25 |
| Esfuerzo de rotura (N/mm ²) | 8-10 |
| Elongación a ruptura (%) | 20 |

Tabla 2.6 propiedades mecánicas del PEBD

FUENTE: Elaboración propia

| PROPIEDADES TÉRMICAS | |
|---|-----------|
| Calor específico (J K ⁻¹ Kg ⁻¹) | 1900-2300 |
| Coeficiente de expansión (x 10 ⁶ K ⁻¹) | 100-200 |
| Conductividad térmica a 23 °C (W/mK) | 0,33 |
| Temperatura máxima de utilización (°C) | 90 |
| Temperatura de reblandecimiento (°C) | 110 |
| Temperatura de cristalización (°C) | 105-110 |
| Temperatura mínima de utilización (°C) | -60 |

Tabla 2.7 propiedades térmicas del PEBD

FUENTE: Elaboración propia

| RESISTENCIA QUÍMICA | |
|----------------------------|-----------------|
| Ácidos-concentrados | Buena-Aceptable |
| Ácidos-diluidos | Buena |
| Alcalís | Buena |
| Alcoholes | Buena |

| | |
|---------------------------|-----------------|
| Cetonas | Buena-Aceptable |
| Grasas y Aceites | Buena-Aceptable |
| Halógenos | Aceptable-Buena |
| Hidro-carbonios halógenos | Aceptable-Buena |
| Hidrocarburos aromáticos | Aceptable-Buena |

Tabla 2.8 Resistencia química del PEBD

FUENTE: Elaboración propia

2.8.2 Situación actual del uso de plásticos.

El crecimiento considerable del consumo de plástico se debe a las características beneficiosas de este. Posee una gran versatilidad para hacerse a medida según cada requerimiento específico, es un material muy ligero y muy durable, no se degrada con facilidad. Es resistente a muchos químicos, al agua y al impacto.

Además el plástico posee propiedades higiénicas para el embalaje de comida. Otra característica, que interesará en esta investigación, es que posee muy buenas propiedades de aislamiento térmico y eléctrico. El plástico además tiene bajos costos de producción.

En la actualidad, se han desarrollado nuevos plásticos, que se degradan más rápidamente que el plástico convencional. Se degrada bajo ciertas condiciones o después de un periodo de tiempo. Los dos tipos existentes son: el plástico biodegradable, el cual contiene un pequeño porcentaje de material que no es a base de aceite, como el almidón de maíz, y el plástico fotodegradable, el cual se deteriora con la luz del sol. Estos plásticos son menos estables que el plástico convencional. El primero no se puede reciclar, así que siempre termina en rellenos o vertederos, y el segundo es confundido con el resto del plástico y termina teniendo el mismo destino, siendo enterrado en los rellenos – con lo cual se evita su degradación, al no darle el sol –. {{6 Plastics Europe, 2008}}

El incremento de las bolsas plásticas en los rellenos *subterráneos con el tiempo produce emisiones de metano, el cual es 23 veces más potente como gas de efecto invernadero que el dióxido de carbono*, y su presencia en la atmósfera ha ido incrementando rápidamente en estos últimos años.

La bolsa de plástico es el producto estrella de nuestra cultura de usar y tirar, que malgasta grandes cantidades de materiales y energía para fabricar productos efímeros de un solo uso, muchas veces superfluos. Las bolsas de plástico se pueden reemplazar por recipientes o sistemas duraderos y ecológicos (bolsas de tela, de plástico resistente, de papel, carros de compra...). **Utilizamos unas 250 bolsas por habitante y año.** Tanto su fabricación y distribución como su tratamiento posterior provocan importantes problemas ambientales. Por todo ello consideramos que es necesaria su desaparición.

En las tres grandes centrales de tratamiento de basura (Jerez, Miramundo -Medina- y Los Barrios) las bolsas se entierran o se apilan en grandes fardos ya que vale 100 veces más reciclarlas que fabricarlas de nuevo. Esta es una de las razones por las que más del 90 % de nuestros residuos sólidos urbanos acaban en vertederos, o en otras comunidades autónomas, en incineradoras.



Figura 2.6 usos del PEBD reciclado en Bolivia

FUENTE: Elaboración propia

2.8.3 las bolsas plásticas PEBD como agregado en el hormigón.

Hasta la fecha no se consideró usar el PEBD como agregado en el hormigón debido a su forma física y a los problemas que ocasionaría utilizarlo, es por ello que mediante una serie de estudios mediante prueba y fallo logamos encontrar una posible solución, la cual consiste en transformar el PEBD reciclado mediante un proceso 100% ecológico que evite la

emanación de gases y pérdida de las propiedades del polietileno de baja densidad (PEBD) ,para ello utilizando el Baño María en aceite comestible reciclado como solvente para diluir el PEBD y que este pueda ser moldeado a la forma deseable.

Entre ventajas y desventajas de este estudio podemos mencionar las siguientes:

Ventajas:

- ✓ Descontaminación del PEBD en el medio ambiente.
- ✓ Creación de fuentes de empleo en el reciclado del PEBD.
- ✓ Creación de fuentes de empleo en la fabricación del agregado PEBD
- ✓ Hormigón ligero con agregado PEBD.

Desventajas:

- ✓ Pérdida en la resistencia del hormigón al incorporar agregado PEBD, pero esta se compensa con la pérdida de peso por carga muerta del mismo.
- ✓

2.9 Estado del arte.

Estudios acerca del hormigón ligero Sobre el hormigón ligero existe mucha información. Se ha escrito sobre su historia a través del tiempo, sobre sus maneras de construirse, ya sea hormigón armado o no estructural, y sobre campañas experimentales involucrando el hormigón y otros materiales, como el plástico en este caso.

2.9.1 Estudios acerca del plástico reciclado

Existen investigaciones desarrolladas para el uso de plástico reciclado. Existen muchas variedades de plástico reciclado, así que los estudios hechos son muy diferentes dependiendo del tipo de plástico y el uso que se le pretenda dar.

Se tiene información de la Recicladora de Plásticos de España, la cual habla de los tipos de plástico a reciclar y métodos de hacerlo. Como se ha visto, solo un pequeño porcentaje de los residuos de plástico son reciclados, el resto va a parar a rellenos subterráneos y a vertederos y es incinerado.



Figura 2.7 Agregado plástico reciclado

FUENTE: hormigón con PET (Costa Del Pozo Antonella)

Investigaciones acerca del hormigón ligero con agregados de plástico reciclado

Se han realizado algunas investigaciones sobre el comportamiento del hormigón cuando se le añade plástico. En algunos casos, *este plástico es añadido como aditivos*, de manera química, lo cual no es lo que se pretende estudiar en esta investigación. Sin embargo, es importante conocer que existen estos métodos para utilizar el plástico reciclado. Se han encontrado unos estudios recientes sobre el *plástico reciclado de botellas como aditivos en el hormigón*. Este plástico tiene el nombre técnico de polietileno tereftalato (PET), y al descomponerlo químicamente se obtienen nuevas cadenas, llamadas poliéster insaturado. La característica de esta es que hace que todas las cadenas puedan unirse formando una red. Si esta matriz es rellena con arena o grava, el producto obtenido es un hormigón cuyo aglutinante es un polímero, llamándose hormigón polimérico. Este hormigón sería muy resistente, pero no es un hormigón aligerado. Estudios sobre este tema fueron hechos en Perú hace algunos años, por el Prof. Javier Nakamatsu.

Otra investigación realizada por K.S. Rebeiz y A.P. Craft, en el año 1995, “Plastic waste management in construction: technological and institutional issues”, en Estados Unidos, estudia el caso del ***hormigón de poliéster que lleva plástico reciclado PET***.

En estos estudios también se modifican químicamente los residuos de plástico, para producir resinas insaturadas de poliéster y mezclarlo con los áridos para producir este hormigón de poliéster. Se hicieron pruebas de resistencias y durabilidad y se observó que el comportamiento de este hormigón fue positivo, resultó ser más resistente y más durable que el hormigón convencional de cemento portland, y que fragua en horas, a diferencia del hormigón convencional que necesita semanas.

En el artículo de la revista “Waste Management”, titulado “Use of plastic in concrete mixture as aggregate replacement”, (2007), por Zainab Z. Ismail y Enas A. ALHashmi, se recopilan estudios hechos acerca del ***hormigón polimérico, que lleva resinas de poliéster insaturado y polietileno tereftalato (PET)***. También se estudia el polipropileno en forma de fibras, para darle mayor resistencia al hormigón. Muchas de estas investigaciones son acerca de plásticos como aditivos para el hormigón, lo que es diferente a los áridos, ya que estos le dan otras propiedades al hormigón, distintas a las buscadas con los áridos de plástico. *Una investigación llevada a cabo para este estudio fue similar a la estudiada en este documento. Se mezcló cemento portland, arena fina, grava y plástico reciclado en dosificaciones de 0%, 10%, 15% y 20%, los cuales reemplazaban arena. Se realizaron ensayos de consistencia y escurrimiento, de densidad del mortero fresco y endurecido, y de resistencias a compresión y flexo tracción. Los resultados mostraron que la consistencia de las mezclas fue decreciendo con el aumento de plástico reciclado*, esto ocurre porque los gránulos de plástico tienen formas angulares y no uniformes, lo que da resultado a una menor fluidez del material. La densidad del mortero fresco tiende a decrecer con el aumento del plástico, al igual que la densidad del mortero endurecido, aunque esta densidad va incrementándose con el tiempo. Los ensayos de resistencias a compresión y flexo tracción indicaron que a mayor cantidad de plástico, menor es la resistencia, como indican todos los estudios hechos acerca de los esfuerzos.

Esto puede deberse a la pobre adhesión entre la superficie del plástico y la pasta de cemento.

Existen más investigaciones sobre el hormigón que lleva plástico reciclado como árido ligero, sin embargo no son abundantes las investigaciones que hay, aunque cada vez los desperdicios de plástico son mayores y el usarlos como relleno, enviarlo a vertederos o incinerarlos pronto dejarán de ser soluciones, o en realidad nunca lo fueron, ya que el plástico demora cientos de años en degradarse debajo de la tierra y la incineración de estos producen emisiones de gases tóxicos y CO₂.



Figura 2.8 agregado plástico artificial

FUENTE: hormigones con agregados livianos (Aramayo Cruz Gabriel)

2.10 El baño maría.

El concepto de baño maría implica el *calentamiento indirecto* de la sustancia por convección térmica desde el medio líquido (agua, frecuentemente).

Para calentar al baño maría hay que introducir un recipiente pequeño en el que se deposita la sustancia dentro de otro más grande que contiene un líquido y calentar este por su base. De este modo, se calienta en primer lugar el líquido contenido en el recipiente de mayor tamaño y éste va calentando gradualmente el contenido del recipiente menor, de un modo suave y constante. Es indispensable que en todo tiempo el recipiente interior (más pequeño) esté en contacto con el líquido para que se produzca la transmisión de calor.

Utilizando diferentes líquidos (aceites, soluciones salinas, etcétera) en el recipiente grande se obtienen diferentes temperaturas de trabajo. Cuando se usa agua, la máxima temperatura del producto del recipiente superior no excederá los 100°C (punto de ebullición del agua a la presión de 1 atm).

2.10.1 Historia.

La invención del baño maría se atribuye a la alquimista egipcia María de Alejandría (siglo III), la primera alquimista conocida.

2.10.2 Aplicación.

El empleo de este método se lo hace por primera vez en este trabajo de investigación , con el fin de no producir gases tóxicos como el (dióxido de carbono), se emplea aceite comestible reciclado , el mismo que puede soportar 160°C antes de quemarse , temperatura necesaria para fundir el PEBD.

CAPITULO III

DESARROLLO DE LA INVESTIGACION

3.- DESARROLLO DE LA INVESTIGACION.

En el presente capítulo se describe el proceso experimental que se llevó a cabo para cumplir con los objetivos planteados en el proyecto de investigación, se describirá de forma clara y

concreta los ensayos que se realizaron, desde la obtención de los agregados hasta el empleo de los mismos, así también poder señalar lo métodos más sobresaliente y novedoso que se emplearon.

3.1.- Resumen de la investigación.

De acuerdo a nuestro alcance y objetivos, procedimos a la búsqueda de los materiales comprometidos para el proyecto, comenzando por la compra de los agregados, y el cemento, como punto de partida recalamos tomar una resistencia patrón de 210kg/cm², y el método ACI-211 para el cálculo de la mezcla , y reemplazar el agregado grueso parcial y completamente por el agregado de polietileno de baja densidad (APEBD) el cual se caracterizara por ser un agregado novedoso y ligero desde el punto de vista de la ingeniería , en proporciones volumétricas expresadas en porcentajes se ara el reemplazo en 0% ,25%,50%,75% y 100% generando un total de 4 puntos de análisis, verificando la compatibilidad del agregado de PEBD ,el peso unitario, densidad y resistencia a compresión **fck** de las probetas en edades de 7 ,14 y 28 días.

Cabe recalcar que para el agregado PEBD se realizara solo el ensayo de degaste de los ángeles , debido a que el mismo es impermeable en su totalidad , y su granulometría es adoptada de un estudio previo del agregado grueso , para así asimilar de una mejor manera el reemplazo del mismo en la mezcla.

3.2 Preparación de la materia prima.

3.2.1.- Agregado grueso.

El agregado grueso (grava), el primer paso fue la selección y compra del mismo, para ello nos dirigimos a los principales sindicatos de transportes de áridos de la ciudad de Tarija, realizando una encuesta para poder seleccionar la más económica y con un producto de buena calidad, Transportes de áridos PIMENTEL, Dir B/morros blancos, realizó la venta del mismo a un precio de 175bs el cubo, procedente del Río Guadalquivir (canto rodado).



Figura 3.1 Agregado grueso (grava)

FUENTE: Elaboración propia

Una vez obtenido el agregado grueso, se procedió al lavado superficial en los ambientes de laboratorio, para eliminar las impurezas y suciedad (limos y arcillas) que pudiese haber adquirido el mismo durante su traslado y almacenado, con este proceso se garantiza un seguimiento y tratamiento óptimo para ser utilizado en la mezcla y así garantizar un proceso adecuado de dosificación.



Figura 3.2 Lavado del agregado grueso (grava)

FUENTE: Elaboración propia

3.2.2.-Agregado fino.

Este agregado fue proporcionado por el mismo proveedor Transportes de áridos PIMENTEL, la misma que nos proporcionó 1 cubo de agregado grueso y 1.5 cubos de agregado fino (arena) el cual tuvo un costo de 200bs, los 2 agregados fueron traídos en un solo viaje por razones de costo, el agregado fino también es procedente del río Guadalquivir.



Figura 3.3 Agregado fino (arena)

FUENTE: Elaboración propia

El agregado fino no se sometió a un proceso de lavado, debido a que se realizara un estudio previo de granulometría y es necesario tener el material en su estado original, para calcular el porcentaje de limos que este contiene, y poder así evaluar si cumple o no para ser utilizado como material de construcción según la norma.

3.2.3.-Cemento.

Se procedió a la selección del tipo, marca y proveedor de cemento a utilizar, se optó por la compra del más común en el mercado "Cemento El Puente" (IP-30), a un precio de (53-55bs) por bolsa de acuerdo a la cantidad y proveedor, debido a que los agregados fueron almacenados en el barrio morros blancos, se realizó la compra del cemento de zonas aledañas, para evitar el cobro de transporte del mismo.

3.2.4.-Agregado de PEBD.



Figura 3.4 Desechos plásticos en el campus universitario

FUENTE: Elaboración propia

- ❖ La preparación de este agregado se realizó una vez tenida la granulometría del agregado grueso, el primer paso fue el reciclado de la materia prima, para ello se contrató los servicios de 2 personas (recolectoras de botellas plásticas) las mismas que pusieron su precio de venta de 20bs la bolsa de material reciclado.



Figura 3.5 Bolsas plásticas PEBD recicladas

FUENTE: Elaboración propia

- ❖ Posteriormente se procedió al lavado de las mismas y luego a un secado para eliminar la presencia de agua, algo muy importante que cabe recalcar fue la presencia de insectos en las bolsas, esto debido al contenido de las mismas, dando como resultado un daño al ecosistema.



Figura 3.6 Lavado y secado de bolsas plásticas

FUENTE: Elaboración propia

- ❖ Para someter el PEBD a un proceso térmico por el cual no emane gases tóxicos (dióxido de carbono) se utilizó aceite comestible reciclado (donado por la empresa Crocan Pollo) 180lts fueron otorgados para la investigación.



Figura 3.7 Aceite comestible reciclado

FUENTE: Elaboración propia

- ❖ De acuerdo a la granulometría del agregado grueso se procedió a la fabricación de los moldes de cemento puro en diámetros de (1 ½; 1 y ¾ pulg), con la ayuda de esferas circulares se hizo el trazo respectivo de forma circular en los moldes para que estos den como resultado un agregado esférico (conforme a un estudio previo).



Figura 3.8 Fabricación de los moldes de cemento

FUENTE: Elaboración propia

- ❖ Con la ayuda de una prensa y amoladora se hizo coincidir hembra y macho de cada molde, en forma externa como interna, para que al juntar las piezas en su interior generen una esfera perfecta.



Figura 3.9 Fabricación de los moldes de cemento

FUENTE: Elaboración propia

- ❖ Por último se perforo una cara de los moldes para la incorporación de aire, esto para adquirir una textura porosa del agregado con el fin de alcanzar una mayor adherencia en el hormigón.



Figura 3.10 Moldes de cemento terminados

FUENTE: Elaboración propia

- ❖ Una vez tenidos todos los materiales y equipos se sometió el PEBD reciclado, al proceso térmico en baño María (aceite comestible) a una temperatura mayor a los 100°C , por un periodo de **15 segundos** hasta alcanzar un proceso de transformación física del mismo como se muestra en la figura , en el mismo instante se hizo el vaciado del mismo en los moldes fabricados , y con la ayuda de un objeto punzo cortante se perfora el vaciado por el orificio que tiene el molde para así poder generar aire en el interior del molde , el cual nos permitirá que el agregado vaya adquiriendo



Figura 3.11 Baño maría en aceite del PEBD

FUENTE: Elaboración propia



Figura 3.12 Agregado PEBD terminado

FUENTE: Elaboración propia

- ❖ Por último para eliminar el aceite superficial del agregado, este se sumergió en un solvente (gasolina) por un periodo de 10 minutos, removiéndole constantemente, posteriormente se dejó en el sol por 2 a 3 horas y con este último se obtiene el agregado deseado.



Figura 3.13 Agregado PEBD preparado para la mezcla

FUENTE: Elaboración propia

3.3.- Caracterización de la materia prima.

Con el objeto de obtener los datos necesarios para caracterizar los agregados se procedió a tomar una muestra representativa de grava, arena, agregado PEBD y estos fueron llevados al laboratorio de hormigones de la U.A.J.M.S.

3.3.1 Análisis granulométrico de los agregados para hormigones

Granulometría del agregado grueso (grava)

Para este ensayo se emplea tamices de aberturas cuadradas, los cuales son proporcionados por el laboratorio de la U.A.J.M.S.

Equipo:

1. Balanza sensible al 0.1 gramos.
2. Juego de tamices(2½ ; 2 ; 1½ ; 1 ; ¾ ; ½ ; ⅜ ; N°4 ; tapa ; base)
3. Horno de temperatura constante (105°C)
4. Brocha para limpiar los tamices
5. Vibrador mecánico para tamices

Preparación de la muestra:

| <i>tamaño maximo de las particulas en Pulg.</i> | <i>peso minimo de la muestra en gramos</i> |
|---|--|
| 3/8 | 1000 |
| 1/2 | 2500 |
| 3/4 | 5000 |
| 1 | 10000 |
| 1 1/2 | 15000 |
| 2 | 20000 |
| 2 1/2 | 25000 |
| 3 | 30000 |
| 3 1/2 | 35000 |

Tabla 3.1 pesos de las muestras según TM agregado

FUENTE: guía de laboratorio de hormigones U.A.J.M.S

Se selecciona una muestra representativa de agregado grueso (grava), de acuerdo a la (tabla 3.1) para un tamaño máximo nominal de 2pulg la muestra tiene que ser de 20 kilogramos, esta se somete a un lavado superficial y se deja en el horno durante 24hrs, antes de realizar

el ensayo, este proceso se lo realiza para eliminar las partículas de polvo que pudiese tener el agregado grueso.

Posteriormente se realiza el ensayo, ordenando los tamices de forma creciente se vacía el material en cantidades pequeñas (5kg), debido a la capacidad de los tamices, luego este se coloca en el vibrador por un periodo de 15 minutos.



Figura 3.14 juego de tamices en el vibrador

FUENTE: Elaboración propia

Una vez cumplido el tiempo se realiza el peso del material que queda retenido en cada tamiz, este proceso se lo realizo 4 veces, cada 5kg de material.



Figura 3.15 agregado grueso tamizado

Para el cálculo se hizo el empleo de las siguientes formulas, para poder generar la curva granulométrica.

Dónde:

- **%Ret** :porcentaje retenido en el tamiz
- **Ret.acum** : retenido acumulado
- **WM** : peso total de la muestra
- **%pasa**: porcentaje del total que llega a pasar por cada tamiz.
- **MF** : módulo de finura

$$Ret. acum = \sum Peso Ret(\frac{3}{4} + N^{\circ}4 \dots + base) \quad \text{Ec: 3.1}$$

$$\%Ret = \left(\frac{Ret.acum}{WM}\right) * 100\% \quad \text{Ec: 3.2}$$

$$\%pasa = \%Ret - 100\% \quad \text{Ec: 3.3}$$

$$MF = \sum \frac{\%Ret(N^{\circ}4,8,16,30,50,100)}{100} \quad \text{Ec: 3.4}$$

Granulometría del agregado fino (arena)

Para este ensayo se emplea tamices de aberturas cuadradas, los cuales son proporcionados por el laboratorio de la U.A.J.M.S.

Equipo:

1. Balanza sensible al 0.1 gramos.
2. Juego de tamices ($\frac{3}{8}$; 4 ;8 ; 16 ; 30 ; 50 ; 100 ; tapa ; base)
3. Horno de temperatura constante (105°C)
4. Brocha para limpiar los tamices
5. Vibrador mecánico para tamices

Preparación de la muestra:

Se selecciona una muestra representativa de agregado fino (arena), de acuerdo al manual de laboratorio de hormigón la muestra mínima tiene que ser de 500 gramos, para nuestro caso decidimos trabajar con 3 kilogramos, esta se somete a un lavado superficial y se deja en el

horno durante 24hrs, antes de realizar el ensayo, este proceso se lo realiza para eliminar las partículas de polvo que pudiese tener el agregado.

Posteriormente se realiza el ensayo, ordenando los tamices de forma creciente se vacía el material en cantidades pequeñas, debido a la capacidad de los tamices, luego este se coloca en el vibrador por un periodo de 15 minutos.



Figura 3.16 Agregado fino tamizado

FUENTE: Elaboración propia

Al igual que el agregado grueso se procede a pesar el material retenido en cada tamiz, sin tomar en cuenta el peso de cada tamiz.

| ARENA | | GRAVA + ARENA | |
|----------|----------|---------------|----------|
| Abertura | % Pasa | Abertura | % Pasa |
| 7mm | 100 | 30mm | 100 |
| 3mm | 56-72-87 | 15mm | 63-82-92 |
| 1mm | 20-40-70 | 7mm | 40-60-80 |
| 0,2mm | 2-15-21 | 3mm | 22-43-70 |
| | | 1mm | 8-24-56 |
| | | 0,2mm | 1- 9-17 |

Figura 3.2 requisitos de granulometría agregado fino

FUENTE: norma CBH-87

Las fórmulas utilizadas son las mismas empleadas para el análisis del agregado grueso.

3.3.2 Determinación del peso unitario de los agregados

Este ensayo será de mucha ayuda para realizar el reemplazo parcial o total del agregado grueso por el agregado artificial de PEBD.

Equipo:

1. Balanza sensible al 0.1 gramos.
2. Varilla de 5/8" de diámetro y unos 60 cm de largo.
3. Recipiente cilíndrico de 10 litros para agregado grueso y PEBD
4. Recipiente cilíndrico de 3 litros para agregado fino



Figura 3.17 Recipientes cilíndricos p/peso unitario

FUENTE: Elaboración propia

Preparación de la muestra:

Para este ensayo se utilizara una muestra representativa con la humedad ambiente, por ningún motivo debe de ser secada la muestra.

Sin compactar:

Se llenan los moldes con los agregados respectivos, luego con la ayuda de la varilla se enrasa los mismos teniendo como guía el borde del molde, se pesa el molde junto con el agregado



Figura 3.18 Peso unitario suelto de agregados

FUENTE: Elaboración propia

Compactado:

Se llenan los moldes hasta una tercera parte de su capacidad, nivelándose el agregado con las manos, luego con la ayuda de la varilla se apisona uniformemente esta capa 25 veces, teniendo en cuenta de no golpear el fondo del molde.

Se repite el procedimiento anterior dos veces hasta llenar el molde, las partículas de la superficie se deben enrasar con la varilla.



Figura 3.19 peso unitario compactado

FUENTE: Elaboración propia

Para el cálculo de los pesos unitarios sueltos y compactados se hizo el empleo de las siguientes formulas:

Dónde:

- **PU_s** :peso unitario suelto
- **W_s** : peso de la muestra suelta
- **Vol** : volumen del molde
- **PU_c** : peso unitario compactado
- **W_c** : peso de la muestra compactada

$$PU_s = \frac{W_s}{vol} \qquad \text{Ec: 3.5}$$

$$PU_c = \frac{W_c}{vol} \qquad \text{Ec: 3.6}$$

3.3.3 Determinación del peso específico y absorción de los agregados

Este ensayo tiene por objeto la determinación del peso específico aparente y del peso específico a granel de los agregados, lo mismo que la cantidad de agua expresada como porcentaje que absorbe el agregado grueso cuando se sumerge en agua por un periodo de 24 horas.

Peso específico y absorción del agregado grueso (grava)

Material:

-muestra representativa aprox. 20 kg

-agua

Equipo:

1. Balanza sensible de 0.1 gr
2. Cesto cilíndrico de malla metálica N°4(h:20 ; D:20)
3. Toalla
4. Bandejas
5. Balanza especial para sumergir el cesto metálico

Preparación de la muestra:

Se debe dejar sumergido por un periodo de 24 horas, antes de ejecutar el ensayo, la cantidad necesaria para este ensayo fue de 20 kg.

Una vez realizado el paso anterior se procede al secado de las partículas con la ayuda de una toalla hasta que la película de agua haya desaparecido, de allí se realiza el pesado para así conocer el peso de las partículas con superficie seca, este debe de ser de 5 kg, posteriormente una vez calibrada la balanza se coloca el mismo material en el cesto metálico y se sumerge en la balanza y con la ayuda de las pesas se equilibra la misma para obtener el peso sumergido.



Figura 3.20 Balanza de agua

FUENTE: Elaboración propia

Una vez pesado el material sumergido se procede a colocar el mismo en un recipiente metálico al horno durante un periodo de 24 horas, de allí se retira y se pesa obteniendo así el peso seco este mismo proceso se repite 3 veces (3 ensayos)

Las fórmulas utilizadas para el cálculo de pesos específicos son las siguientes:

Dónde:

- **A** : peso de la muestra secada al horno en (gr)
- **B** : peso de la muestra saturada con superficie seca (gr)
- **C** : peso de la muestra saturada sumergida en el agua (gr)

$$\gamma_{granel} = \frac{A}{B-C} \quad \text{Ec: 3.7}$$

$$\gamma_{sup.seca} = \frac{B}{B-C} \quad \text{Ec: 3.8}$$

$$\gamma_{aparent} = \frac{A}{A-C} \quad \text{Ec: 3.9}$$

$$\%abs = \frac{B-A}{A} * 100 \quad \text{Ec: 3.10}$$

Dónde:

- **γ granel** : peso específico a granel
- **γ sup seca** : peso específico saturado con superficie seca
- **γ aparent** : peso específico aparente
- **%abs** : porcentaje de absorción.

Peso específico y absorción del agregado fino (arena)

Material:

-muestra representativa aprox. 5 kg

-agua

Equipo:

1. Balanza con capacidad de 1 kg y sensibilidad de 0.1gr
2. Matraz de 500 ml de capacidad
3. Molde cónico y una varilla
4. Secadora
5. Recipientes

Preparación de la muestra

Al igual que el agregado grueso este se deja sumergido en agua durante un periodo de 24 horas antes de realizar el ensayo.

Con la ayuda de la secadora se empieza a secar la arena uniformemente, para inspeccionar que tan seca esta la muestra, se coloca primero en el molde cónico y luego se retira este, suele pasar los siguientes:



Figura 3.21 secado de agregado fino

FUENTE: Elaboración propia

Si la muestra tiene aún humedad en la superficie ha sido eliminada, la arena rodara libremente cuando el cono se levante.

Si la arena rueda libremente por primera vez que se coloca el cono, significa que esta ha sido secada más de lo necesario, lo cual implica volver a realizar el primer paso (sumergir la arena por 24 horas)

Para nuestro caso tomamos en cuenta estas recomendaciones y suponemos que el ensayo está bien cuando colocamos el cono y la arena solo se desborona en la parte superior.



Figura 3.22 prueba del cono en el agregado fino

FUENTE: Elaboración propia

Luego una vez conocido el peso del matraz y los recipientes, colocamos 500 gramos de muestra en el matraz, y llenamos con agua hasta los 500ml (marca del matraz), para eliminar las burbujas se hace rotar el matraz con movimientos rotatorios a 45°, luego se pesa el matraz lleno, posteriormente se vacía el contenido en un recipiente y se coloca en el horno durante un periodo de 24 horas, se retira y se obtiene el peso seco.

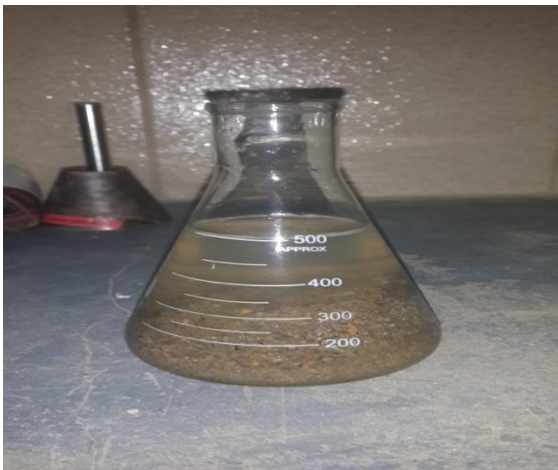


Figura 3.23 Matraz más agregado fino más agua

FUENTE: Elaboración propia



Figura 3.24 Agregado fino secado en el horno

FUENTE: Elaboración propia

Las fórmulas utilizadas para el cálculo de pesos específicos son las siguientes:

Dónde:

A: peso en el aire de la muestra secada al horno (gr)

V: Volumen del frasco (ml)

W: peso en gramos o volumen en ml del agua agregado al frasco

$$\gamma_{granel} = \frac{A}{V-W} \quad \text{Ec: 3.11}$$

$$\gamma_{sup.seca} = \frac{500}{V-W} \quad \text{Ec: 3.12}$$

$$\gamma_{aparent} = \frac{A}{(V-W) - (500-A)} \quad \text{Ec: 3.13}$$

$$\%abs = \frac{500-A}{A} * 100 \quad \text{Ec: 3.14}$$

Dónde:

- **γ granel** : peso específico a granel
- **γ sup seca** : peso específico saturado con superficie seca

- **y aparent** : peso específico aparente
- **%abs** : porcentaje de absorción.

3.3.4 Determinación del porcentaje de desgaste del agregado PEBD por medio de la máquina de los ángeles

Este ensayo se realizó para el agregado de PEBD, para poder obtener el porcentaje de desgaste que sufrirá el mismo, al someterse a la máquina.

Equipo:

1. Máquina de desgaste de los ángeles
2. Muestra de 5 Kg de agregado PEBD

Preparación de la muestra

Se seleccionó y peso 1250 gramos, de agregado PEBD por cada diámetro según la gradación en nuestro caso tipo A.

- ❖ La muestra es mezclada y colocada en la máquina de desgaste de los ángeles al mismo tiempo se coloca 12 esferas, se asegura la tapa de esta, y se pone en funcionamiento, el proceso culmina cuando la maquina haya girado 500 revoluciones (se apaga automáticamente) este proceso demora aproximadamente 20 minutos , una vez detenida la maquina se procede a retirar la tapa y vaciar el agregado para luego ser lavado , secado y pesado , en nuestro caso el agregado salió ileso de la máquina ,demostrando así la resistencia del mismo , solo se pudo evidenciar 3 partículas partidas a la mitad, por lo que se puede decir que el agregado posee una alta resistencia al desgaste.



Figura 3.25 Máquina de desgaste de los ángeles

FUENTE: Elaboración propia

- ❖ En la siguiente imagen se puede evidenciar el material una vez retirado de la máquina de desgaste de los ángeles.



Figura 3.26 Agregado PEBD producto de la Maquina D.A

FUENTE: Elaboración propia

- ❖ Al someter el material al lavado con agua, se puede apreciar que el mismo flota y no se sumerge, corroborando así, que es un agregado de baja densidad.



Figura 3.27 Agregado PEBD flotando en el agua

FUENTE: Elaboración propia

- ❖ Por último el material fue lavado y secado, y al pesar este mantenía el mismo peso inicial, es decir que el porcentaje de desgaste fue de 0%.

Las formulas empleadas para este ensayo fueron:

Dónde:

- **%des** : porcentaje de desgaste
- **P** : peso original de la muestra (gr)
- **Pf** : peso final de la muestra (gr)

$$\%des = \frac{P-Pf}{P} * 100 \qquad \text{Ec: 3.15}$$

3.4 Diseños de mezclas

3.4.1 Dosificación de hormigones H-21(Método ACI-211)

La dosificación de las mezclas de hormigón es la determinación de la combinación más económica y practica de los agregados disponibles, cemento y agua, que producirá una mezcla trabajable con el endurecimiento adecuado.

El procedimiento más práctico es determinar la mezcla y hacer correcciones necesarias en obra.

Los ensayos de laboratorios necesarios serán los siguientes:

- Granulometría
- Peso especifico
- Absorción
- Humedad de los agregados

Procedimiento para las mezclas de prueba:

- a) Se selecciona la resistencia de diseño (f_{ck}) que se desea alcanzar en la obra.
- b) En función a la resistencia de diseño, se corrige está llamándose resistencia característica f_{ck} , en función a la tabla 11.12.
- c) Se selecciona un asentamiento S , el cual está sujeto de acuerdo al tipo de construcción, sistemas de colocación y compactación (tabla 11.4).
- d) En función a la resistencia característica f_{ck} , se selecciona el tipo de hormigón deseado (con aire incluido o sin aire incluido), una vez seleccionado el tipo se selecciona la relación agua/cemento A/C tabla 11.13 y/o 11.14.

- e) En función al módulo de finura de la arena, y el tamaño máximo del agregado grueso, se selecciona el volumen de agregado grueso compactado con varilla .tabla 11.15.
- f) En función al asentamiento seleccionado en el inciso C y el tamaño máximo del agregado grueso, se selecciona la cantidad de agua requerida en Kg/m³, tabla 11.7.
- g) Todos los anteriores pasos se deben de cumplir para así obtener, los datos necesarios para el cálculo de las mezclas, para ello se debe de tener en cuenta de cometer errores y si los valores no están en tabla se debe de iterar los mismos para así obtener un mayor grado de precisión y confianza.

Fórmulas para las mezclas de prueba:

Dónde:

✓ Datos calculados en los ensayos de caracterización de los agregados.

Módulo de finura de la arena: **MF**.....s/u
 Peso unitario compactado de la grava: **Puc**.....kg/m³
 Peso específico de la arena: **γf**.....gr/cm³
 Peso específico de la grava: **γg**.....gr/cm³
 Absorción de la arena: **Aa**.....%
 Absorción de la grava: **Ag**.....%
 Humedad de la arena: **Ha**.....%
 Humedad de la grava: **Hg**.....%
 Tamaño máximo nominal **TMN**.....pulg
 Tamaño máximo: **TM**.....pulg
 Peso específico del cemento.....gr/cm³

✓ Datos calculados de tablas.

Resistencia de diseño: **fck**".....kg/cm²
 Resistencia característica: **fck**.....kg/cm²
 Asentamiento: **S**.....pulg
 Relación agua-cemento: **a/c**.....s/u
 Volumen de agregado grueso: **Vg**.....s/u
 Requerimiento de agua: **A**.....kg/m³

- ✓ *Peso del agregado grueso.(kg/m3)*

$$P_g = V_g * P_{uc} \quad \text{Ec: 3.16}$$

- ✓ *Peso del cemento.(kg/m3)*

$$P_c = \frac{A}{a/c} \quad \text{Ec: 3.17}$$

- ✓ *Volumen del agregado grueso.(lts/m3)*

$$V_{ag} = \frac{P_g}{\gamma_g} \quad \text{Ec: 3.18}$$

- ✓ *Volumen del cemento.(lts/m3)*

$$V_c = \frac{P_c}{\gamma_c} \quad \text{Ec: 3.19}$$

- ✓ *Volumen de arena(lts/m3)*

$$V_a = 1000 - V_c - V_{ag} - A \quad \text{Ec: 3.20}$$

- ✓ *Peso del agregado fino.(kg/m3)*

$$P_{af} = V_a * \gamma_f \quad \text{Ec: 3.21}$$

Corrección por materiales húmedos:

- ✓ *Peso húmedo de la arena.(kg/m3)*

$$P_{ha} = P_{af} * (1 + H_a) \quad \text{Ec: 3.22}$$

- ✓ *Peso húmedo de la grava.(Kg/m3)*

$$P_{hg} = P_g * (1 + H_g) \quad \text{Ec: 3.23}$$

- ✓ *Agua corregida de la grava.(lts/m3)*

$$A_{cg} = P_{ag} * (A_g - H_g) \quad \text{Ec: 3.24}$$

- ✓ *Agua corregida de la arena.(lts/m3)*

$$A_{cf} = P_{af} * (A_a - H_a) \quad \text{Ec: 3.25}$$

- ✓ *Total agua corregida.(lts/m3)*

$$A_c = A_{cg} + A_{cf} \quad \text{Ec: 3.26}$$

3.4.2 Alteración de la dosificación para el agregado grueso.

La dosificación será alterada de forma volumétrica en 4 diferentes de porcentajes de 25%; 50 %; 75%; 100%, para ello trabajaremos con la dosificación en pesos, posteriormente el peso del agregado grueso será llevado a volumen mediante un recipiente con medidas a escala en litros, y de allí se reemplaza el mismo.

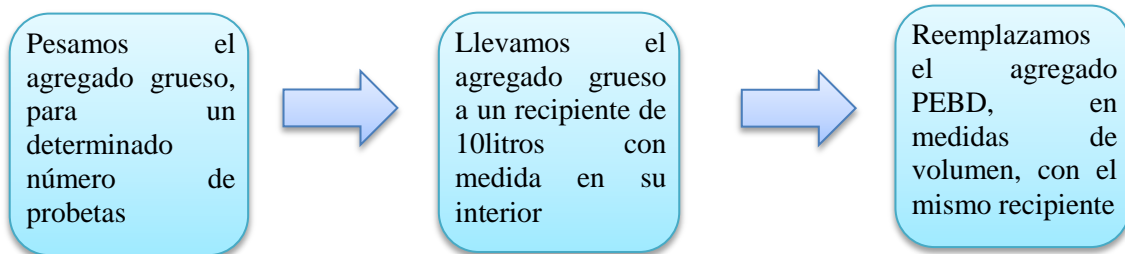


Figura 3.28 reemplazo del agregado grueso por agregado PEBD (volumétricamente)

FUENTE: Elaboración propia

3.5 Elaboración de las muestras.

Se procederá a la elaboración de probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro y 30 de altura, para ser sometidas a ensayos de compresión simple y poder calcular su resistencia a compresión simple.

| probeta | tiempo dias | cantidad | total |
|--------------|-------------|----------|------------|
| patron | 7 | 10 | 30 |
| | 14 | 10 | |
| | 28 | 10 | |
| 25% | 7 | 10 | 30 |
| | 14 | 10 | |
| | 28 | 10 | |
| 50% | 7 | 10 | 30 |
| | 14 | 10 | |
| | 28 | 10 | |
| 75% | 7 | 10 | 30 |
| | 14 | 10 | |
| | 28 | 10 | |
| 100% | 7 | 10 | 30 |
| | 14 | 10 | |
| | 28 | 10 | |
| total | | | 150 |

Tabla 3.3 detalle de probetas

FUENTE: Elaboración propia

3.5.1 Hormigón simple.

Material.

-cemento

-arena

-grava

-agua

-aceite sucio

Equipo.

1. 6 recipientes metálicos
2. Cono holandés
3. Base del cono
4. Varilla del cono
5. Flexo metro
6. Cuchara de albañil
7. Brocha
8. Martillo de goma
9. Molde de probetas cilíndricas
10. Maquina mezcladora
11. Jarra de 1 litro
12. Balde de 10 litros
13. Balanza con capacidad máxima de 50 kg
14. Llave numero N°17

Para la preparación de la mezcla se siguió los siguientes pasos:

- a) Primeramente se trasladó al laboratorio de hormigones de la U.A.M.S, los materiales (cemento, arena, grava) en cantidades discretas utilizando bolsas de 50 kg de capacidad.

- b) Con la finalidad de realizar un control adecuado, se hizo el lavado de los agregados para eliminar las partículas de limos y arcillas que estos pudiesen tener.



Figura 3.29 lavado de los agregados

FUENTE: Elaboración propia

- c) Como se trabajara con pesos de agregados secos, los agregados lavados se proceden a colocar al horno con temperatura constante de 120°C, durante un periodo de 24 horas antes de realizar en ensayo.
- d) Una vez listos todos los materiales se pesan el cemento, la arena y grava para un determinado número de probetas que se pretendan realizar.
- e) Preparados todos los agregados, se comienza por vaciar en la maquina mezcladora los agregados, se deja durante unos 5 minutos en secos mezclarse estos.
- f) Una vez observado que los agregados se mezclaron uniformemente, se procede a colocar agua en la mezcla en proporciones menores a lo calculado (se recomienda la mitad) y de manera sucesiva en periodos cortos se sigue aumentando, teniendo en cuenta la fluidez de la mezcla.



Figura 3.30 Preparación de la mezcla

FUENTE: Elaboración propia

- g) Una vez colocados todos los componentes se deja durante un periodo de 5-10min dependiendo de la cantidad de mezcla, luego se procede al vaciado de una parte de la mezcla, para calcular en asentamiento.

- h) Se coloca mezcla en el cono a un tercio de su altura , con la ayuda de la varilla se ejecuta 25 golpes , se sigue estos pasos hasta llenar el cono ,una vez lleno y enrasado se desmolda con cuidado , se mide el asentamiento como se muestra en la figura



Figura 3.31 medición del asentamiento (3 pulg)

FUENTE: Elaboración propia

- i) Se debe evitar que el tiempo desde el vaciado del material hasta medir el asentamiento sea el más mínimo posible para evitar que la mezcla pierda sus propiedades.
- j) Adquirido el asentamiento deseado se procede al vaciado de las probetas que fueron armadas y aceitadas con anticipación, se coloca mezcla a un tercio de su altura y con la misma varilla se realizan 25 golpes, para eliminar los vacíos se realizan al mismo tiempo 10 golpes con el martillo de goma distribuidos uniformemente, se coloca mezcla a 2/3 y se hace los mismos pasos, y posteriormente al ras.
- k) Con la ayuda de la varilla colocada en forma horizontal se enrasa las probetas, y estas se dejan en un lugar de superficie plana durante 24 horas.

3.5.2 Hormigón ligero con PEBD

Material.

-cemento

-arena

-grava

-agua

-aceite sucio

Agregado PEBD

Equipo.

1. 6 recipientes metálicos
2. Cono holandés
3. Base del cono
4. Varilla del cono

5. Flexo metro
6. Cuchara de albañil
7. Brocha
8. Martillo de goma
9. Molde de probetas cilíndricas
10. Maquina mezcladora
11. Jarra de 1 litro
12. Balde de 10 litros
13. Balanza con capacidad máxima de 50 kg
14. Llave número N°17

Para la preparación de la mezcla se siguieron los pasos que se hicieron para el hormigón convencional salvo que:

- a) Pesados los agregados cemento, arena y grava, se procedió a medir en forma volumétrica el agregado grueso, con la ayuda de un recipiente de 10 litros de capacidad, para evitar errores de lectura se realizaron pruebas repetitivas.
- b) Para un 25% de reemplazo se retiró 25% de grava en volumen y se agregó 25% de agregado PEBD, se realizó lo mismo para un 50%, 75% y 100%.
- c) Debido a que el agregado PEBD no absorbe agua se lo considero saturado, para así realizar las pruebas de corrección de agua.

$$Vol\ retirado\ GRAVA = Vol\ introd\ PEBD$$

- d) Los pasos para la mezcla, vaciado, asentamiento, y realización de probetas fueron los mismos que para el agregado grueso, se evidencio que el agregado PEBD, se mezcla uniformemente con los otros agregados, sin tener inconvenientes en su manipuleo.

3.6 Curado de probetas.

El curado de las probetas consistió en sumergir en agua las probetas hasta la realización de las pruebas aplicadas, para 7 ,14 y 28 días, (se recomienda que las mismas estén marcadas al momento de desmoldarlas).



Figura 3.32 curado de probetas

FUENTE: Elaboración propia

3.7 Pruebas aplicadas

3.7.1 Densidad o peso por unidad de volumen

Las pruebas de densidad o unidad de volumen se basaron en la norma ASTM, utilizando muestras cilíndricas con presencia de humedad correspondiente a la saturación del proceso de curado correspondiente a los 7, 14 y 28 días de edad.

Material:

Probetas cilíndricas de 15cm x30 cm

Equipo:

Balanza con capacidad de 50 kg

Para el ensayo se retiró las probetas con 24 horas de anticipación de la piscina de curado para que estas se encuentren en un estado seco (aparente), luego de esto se procedió a pesar cada probeta en la balanza.



Figura 3.33 pesado de probetas en laboratorio de la U.A.J.M.S

FUENTE: Elaboración propia

3.7.2 Resistencia a la compresión.

Las pruebas de resistencia a la compresión se llevó a cabo de acuerdo a la norma ASTM C39 se utilizó la prensa digital que se encuentra en inmediaciones del laboratorio de hormigones de la U.A.J.M.S (sistema de presión hidráulico, capacidad máxima de 2000 KN; velocidad nominal de 0,5 Mp/s controlada electrónicamente).

Material:

Probetas cilíndricas de 15cm x30 cm

Equipo:

Prensa hidráulica marca CONTROL's

- ❖ Primero se coloca los discos de apoyo en la prensa para que la probeta este en la posición adecuada al momento de que la prensa empiece a ejercer presión.
- ❖ Luego se introducen los datos de diámetro, altura, peso y edad de la probeta en días.

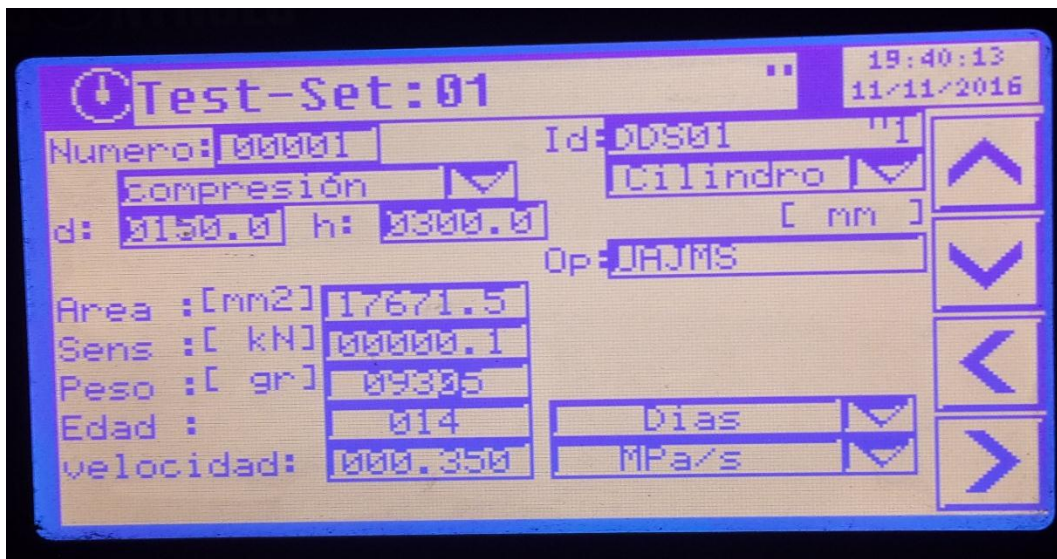


Figura 3.34 pantalla táctil de la prensa

FUENTE: Elaboración propia

- ❖ Posteriormente se procede con la prueba de rotura de probetas, con la ayuda y asesoría de 2 ayudantes de laboratorio los cuales fueron, testigos de os ensayos de compresión realizados.



Figura 3.35 rotura de probetas

FUENTE: Elaboración propia



Figura 3.36 fisura en la probeta tras la rotura

FUENTE: Elaboración propia

- ❖ Posteriormente procedimos a romper una probeta para evidenciar como el agregado se comportó en el hormigón, su distribución y forma en la que se adhirió.



Figura 3.37 probeta rota para verificar la distribución del agregado PEBD

FUENTE: Elaboración propia

- ❖ Se puede ver que el agregado PEBD se distribuyó uniformemente en todo el volumen de la probeta y muchas partículas se partieron y deformaron antes de desprenderse de la capa superficial de hormigón que las rodeaba, con ello podemos decir que las partículas se adhirieron al hormigón de buena manera.

CAPITULO IV

ANALISIS DE RESULTADOS

4. ANALISIS DE RESULTADOS

Capítulo destinado a interpretar los resultados obtenidos en los ensayos realizados, para el proyecto desde la caracterización de los agregados hasta la rotura de probetas, haciendo un análisis desde el punto de vista de la ingeniería civil, señalando los pro y contras que se pudieron encontrar, los resultados son presentados por tipo de prueba realizada, donde se muestra los datos obtenidos y la información generada a partir de los mismos.

4.1 Ensayos realizados.

Los ensayos realizados en el capítulo anterior son necesarios para la dosificación por el método ACI, se pudo evidenciar la restricción de algunos debido al comportamiento del agregado artificial, como por ejemplo el peso específico del mismo donde se evidencio que el mismo es completamente impermeable y este no es capaz de absorber agua, es por ello que se delimita dicho ensayo.

4.1.1 Caracterización.

Procedimiento del cálculo descrito en (caracterización de la materia prima CAPITULO III) obteniendo así sus propiedades cuyos resultados forman parte de los datos necesarios para proceder al cálculo de la dosificación.

Análisis granulométrico de los agregados:

Agregado grueso.

| Peso Total (gr.) = | | | 20000 | | | | |
|--------------------|-------------|-----------|--------------------|--------|----------------------|--------------------------------|-----|
| Tamices | Tamaño (mm) | Peso Ret. | Retenido Acumulado | | % Que pasa del total | % Que pasa s/g Especific. ASTM | |
| | | | (gr) | (%) | | | |
| 2 1/2" | 63 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,0 | 100 | 100 |
| 2 | 50,8 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 100,0 | 95 | 100 |
| 1 1/2 | 38,10 | 2004,00 | 2004,00 | 10,02 | 90,0 | | |
| 1 | 25,40 | 10260,25 | 12264,25 | 61,32 | 38,7 | 35 | 70 |
| 3/4 | 19,05 | 7735,13 | 19999,38 | 100,00 | 0,0 | | |
| 1/2 | 12,50 | 0,00 | 19999,38 | 100,00 | 0,0 | 10 | 30 |
| 3/8 | 9,50 | 0,00 | 19999,38 | 100,00 | 0,0 | | |
| Nº4 | 4,80 | 0,00 | 19999,38 | 100,00 | 0,0 | 0 | 5 |
| BASE | 0 | 0,00 | 19999,38 | 100,00 | 0,0 | | |
| SUMA = | | 19999,38 | | | | | |
| PÉRDIDAS = | | 0,62 | TAMAÑO MAX = 2" | | | | |
| MF = | | 8,10 | TAMMAX NOM= 1 1/2" | | | | |

Tabla 4.1 granulometría del agregado grueso (grava)

FUENTE: Elaboración propia

Obtenido como resultado el módulo de finura de **8,10** el tamaño máximo nominal de 1 ½" y tamaño máximo de 2" el cual se lo adopta como inmediato superior del TMN de acuerdo a la granulometría los mismos cumplen con las especificaciones de la norma ASTM.

Agregado fino.

Para este ensayo se realizó durante 3 veces consecutivas según lo exige el reglamento de laboratorio de hormigones de la universidad.

| Peso Total (gr.) | | | 3000 | | | | |
|------------------|-------------|-----------|-----------|-------|----------------------|--------------------------|-----|
| Tamices | tamaño (mm) | Peso Ret. | Ret. Acum | % Ret | % que pasa del total | Especificacion ASTM C-33 | |
| 3/8 | 9,50 | 10,00 | 0,00 | 0,00 | 100,0 | 100 | 100 |
| Nº4 | 4,75 | 70,00 | 70,00 | 2,33 | 97,7 | 95 | 100 |
| Nº8 | 2,36 | 495,00 | 565,00 | 18,83 | 81,2 | | |
| Nº16 | 1,18 | 465,00 | 1030,00 | 34,33 | 65,7 | 45 | 80 |
| Nº30 | 0,60 | 670,00 | 1700,00 | 56,67 | 43,3 | | |
| Nº50 | 0,30 | 930,00 | 2630,00 | 87,67 | 12,3 | 10 | 30 |
| Nº100 | 0,15 | 275,00 | 2905,00 | 96,83 | 3,2 | 2 | 10 |
| BASE | | 80,00 | 2985,00 | 99,50 | 0,5 | | |
| SUMA | | 2995,0 | | | | | |
| PÉRDIDAS | | 5,0 | | | | | |
| MF = | | 2,97 | | | | | |

Tabla 4.2 granulometría del agregado fino

FUENTE: Elaboración propia

Obteniendo así un módulo de finura de 2.97 verificando al mismo tiempo que las mismas cumplan con las especificaciones de la norma ASTM C-33.

Agregado PEBD.

La granulometría de este material es ya conocida puesto que el mismo es fabricado por moldes con diámetros conocidos, para hacer un reemplazo ideal con el agregado grueso, se fabricaron los moldes de acuerdo a la granulometría del agregado grueso ordinario (grava) y se fabricaron los mismos porcentajes con el mismo diámetro de agregado PEBD.

| Tamices | Tamaño (mm) | porcentaje PEBD retenido |
|---------------|----------------|-----------------------------|
| 2 1/2" | 63 | 0 |
| 2 | 50,8 | 0 |
| 1 1/2 | 38,10 | 10 |
| 1 | 25,40 | 60 |
| 3/4 | 19,05 | 30 |
| 1/2 | 12,50 | 0 |
| 3/8 | 9,50 | 0 |
| N°4 | 4,80 | 0 |
| BASE | 0 | 0 |

Tabla 4.3 granulometría del agregado PEBD

FUENTE: Elaboración propia

Cumpliendo así las mismas características granulométricas que el agregado grueso común y a la misma vez adecuándose a la norma ASTM.

Determinación del peso específico y absorción de los agregados:

Agregado grueso (grava).

Para el ensayo se utilizó más de 15 kg por seguridad, ya que cada prueba de ensayo es necesario 5 kilogramos y es recomendable mantener un margen de seguridad.

| MUESTRA N° | PESO MUESTRA SECADA "A" (gr) | PESO MUESTRA SATURADA CON SUP. SECA "B" (gr) | PESO MUESTRA SATURADA DENTRO DEL AGUA "C" (gr) | PESO ESPECÍFICO A GRANEL (gr/cm3) | PESO ESPECÍFICO SATURADO CON SUP. SECA (gr/cm3) | PESO ESPECÍFICO APARENTE (gr/cm3) | % DE ABSORCIÓN |
|-----------------|------------------------------|--|--|-----------------------------------|---|-----------------------------------|----------------|
| 1 | 4940,00 | 5000,00 | 3110,00 | 2,61 | 2,65 | 2,70 | 1,21 |
| 2 | 4950,00 | 5000,00 | 3100,00 | 2,61 | 2,63 | 2,68 | 1,01 |
| 3 | 4930,00 | 5000,00 | 3100,00 | 2,59 | 2,63 | 2,69 | 1,42 |
| PROMEDIO | | | | 2,61 | 2,64 | 2,69 | 1,11 |

Tabla 4.4 peso específico del agregado grueso (grava)

FUENTE: Elaboración propia

Como resultado obtenemos un peso específico aparente de **2,69 gr/cm³** lo cual nos indica que tenemos un buen agregado grueso y un porcentaje de absorción de 1,11 %.

Agregado fino (arena).

Para el ensayo se utilizó más de 1,5 kg por seguridad, ya que cada prueba de ensayo es necesario 1,5 kilogramos y es recomendable mantener un margen de seguridad.

| MUESTRA + MATRAZ + AGUA (gr) | PESO DEL AGUA AGREGADO AL MATRÁZ "W" (ml) ó (gr) | PESO MUESTRA SECADA "A" (gr) | VOLUMEN DEL MATRÁZ "V" (ml) | P. E. A GRANEL (gr/cm3) | P. E. SATURADO CON SUP. SECA (gr/cm3) | P. E. APARENTE (gr/cm3) | % DE ABSORCIÓN |
|------------------------------|--|------------------------------|-----------------------------|-------------------------|---------------------------------------|-------------------------|----------------|
| 970 | 270,00 | 495,00 | 500,00 | 2,15 | 2,17 | 2,20 | 1,00 |
| 965 | 265,00 | 490,00 | 500,00 | 2,09 | 2,13 | 2,18 | 2,00 |
| 971 | 271,00 | 495,00 | 500,00 | 2,16 | 2,18 | 2,21 | 1,00 |
| PROMEDIO | | | | 2,13 | 2,16 | 2,20 | 1,33 |

Tabla 4.5 peso específico del agregado fino

FUENTE: Elaboración propia

Como resultado obtenemos un peso específico aparente de **2,20 gr/cm³**, este valor es común en las arenas que se encuentran para la construcción en Tarija, es una arena mala debido a su bajo peso específico y la absorción es de **1,33%**.

Determinación del peso unitario de los agregados:

Se lo realizo de 2 formas: peso unitario suelto, sin energía de compactación y el peso unitario compactado, con energía de compactación.

Este ensayo resulta de gran importancia debido a que el reemplazo porcentual del agregado grueso (grava) por agregado PEBD, se lo realizara de forma volumétrica en valores de 10 litros (capacidad del recipiente cilíndrico para este ensayo).

➤ **Agregado grueso (grava).**

Se prepararon 30 kilogramos de muestra para este ensayo.

Peso unitario suelto:

| MUESTRA N° | PESO RECIPIENTE (gr) | VOLUMEN RECIPIENTE (cm3) | PESO RECIP. + MUESTRA SUELTA (gr) | PESO MUESTRA SUELTA (gr) | PESO UNITARIO SUELTO (gr/cm3) |
|-----------------|----------------------|--------------------------|-----------------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| 1 | 5655,00 | 10000,00 | 19685,00 | 14030,00 | 1,403 |
| 2 | 5655,00 | 10000,00 | 19785,00 | 14130,00 | 1,413 |
| 3 | 5655,00 | 10000,00 | 19680,00 | 14025,00 | 1,403 |
| PROMEDIO | | | | | 1,406 |

Tabla 4.6 peso unitario suelto agregado grueso

FUENTE: Elaboración propia

Peso unitario compactado:

| MUESTRA N° | PESO RECIPIENTE (gr) | VOLUMEN RECIPIENTE (cm3) | PESO RECIP. + MUESTRA SUELTA (gr) | PESO MUESTRA SUELTA (gr) | PESO UNITARIO SUELTO (gr/cm3) |
|------------|----------------------|--------------------------|-----------------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| 1 | 5655,00 | 10000,00 | 20760,00 | 15105,00 | 1,511 |
| 2 | 5655,00 | 10000,00 | 20795,00 | 15140,00 | 1,514 |
| 3 | 5655,00 | 10000,00 | 20710,00 | 15055,00 | 1,506 |

PROMEDIO **1,510**

Tabla 4.7 peso unitario compactado agregado grueso

FUENTE: Elaboración propia

➤ **Agregado fino (arena).**

Se utilizó un total de 15 kilogramos tomados como muestra representativa de depósito del agregado fino.

Peso unitario suelto:

| MUESTRA N° | PESO RECIPIENTE (gr) | VOLUMEN RECIPIENTE (cm3) | PESO RECIP. + MUESTRA SUELTA (gr) | PESO MUESTRA SUELTA (gr) | PESO UNITARIO SUELTO (gr/cm3) |
|-----------------|----------------------|--------------------------|-----------------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| 1 | 2615,00 | 3000,00 | 6665,00 | 4050,00 | 1,350 |
| 2 | 2615,00 | 3000,00 | 6690,00 | 4075,00 | 1,358 |
| 3 | 2615,00 | 3000,00 | 6615,00 | 4000,00 | 1,333 |
| PROMEDIO | | | | | 1,347 |

Tabla 4.8 peso unitario suelto agregado fino

FUENTE: Elaboración propia

| MUESTRA N° | PESO RECIPIENTE (gr) | VOLUMEN RECIPIENTE (cm3) | PESO RECIP. + MUESTRA SUELTA (gr) | PESO MUESTRA SUELTA (gr) | PESO UNITARIO SUELTO (gr/cm3) |
|-----------------|----------------------|--------------------------|-----------------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| 1 | 2615,00 | 3000,00 | 7195,00 | 4580,00 | 1,527 |
| 2 | 2615,00 | 3000,00 | 7235,00 | 4620,00 | 1,540 |
| 3 | 2615,00 | 3000,00 | 7110,00 | 4495,00 | 1,498 |
| PROMEDIO | | | | | 1,522 |

Peso unitario compactado:

Tabla 4.9 peso unitario compactado agregado fino

FUENTE: Elaboración propia

➤ **Agregado PEBD.**

| MUESTRA N° | PESO RECIPIENTE | VOLUMEN RECIPIENTE | PESO RECIP. + MUESTRA | PESO MUESTRA | PESO UNITARIO |
|------------|-----------------|--------------------|-----------------------|--------------|---------------|
|------------|-----------------|--------------------|-----------------------|--------------|---------------|

| | (gr) | (cm3) | SUELTA (gr) | SUELTA (gr) | SUELTO (gr/cm3) |
|-----------------|---------|----------|----------------|----------------|--------------------|
| 1 | 5655,00 | 10000,00 | 10265,00 | 4610,00 | 0,461 |
| 2 | 5655,00 | 10000,00 | 10258,00 | 4603,00 | 0,460 |
| 3 | 5655,00 | 10000,00 | 10260,00 | 4605,00 | 0,461 |
| PROMEDIO | | | | | 0,461 |

Peso unitario suelto:

Tabla 4.10 peso unitario suelto agregado PEBD

FUENTE: Elaboración propia

Peso unitario compactado:

| MUESTRA N° | PESO RECIPIENTE (gr) | VOLUMEN RECIPIENTE (cm3) | PESO RECIP. + MUESTRA SUELTA (gr) | PESO MUESTRA SUELTA (gr) | PESO UNITARIO SUELTO (gr/cm3) |
|-----------------|----------------------------|--------------------------------|--|-----------------------------------|--|
| 1 | 5655,00 | 10000,00 | 11001,00 | 5346,00 | 0,535 |
| 2 | 5655,00 | 10000,00 | 11032,00 | 5377,00 | 0,538 |
| 3 | 5655,00 | 10000,00 | 11029,00 | 5374,00 | 0,537 |
| PROMEDIO | | | | | 0,537 |

Tabla 4.11 peso unitario compactado agregado PEBD

FUENTE: Elaboración propia

4.1.2 diseño de mezcla.

Para el diseño de las mezclas mediante el método ACI-211 vamos a tomar en cuenta todos los valores de los ensayos encontrados, siendo estos indispensables para el cálculo de las dosificaciones, siguiendo los pasos del capítulo III (diseño de mezclas).

| CARACTERISTICAS DE LOS AGREGADOS | | |
|--|--------------------|--------------|
| ENSAYO | Unidad | Valor |
| 1.- Modulo de finura de la arena (MF) | s/u | 2,97 |
| 2.- Peso unitario Compactado de la grava (PUC) | kg/m ³ | 1510 |
| 3.-Peso unitario compactado del agregado PEBD | kg/m ³ | 537 |
| 3.- Peso específico de la arena (γ_f) | gr/cm ³ | 2,20 |
| 4.- Peso específico de la grava (γ_g) | gr/cm ³ | 2,69 |
| 5.- Absorción de la arena (Aa) | % | 1,33 |
| 6.- Absorción de la Grava (Ag) | % | 1,1 |
| 7.- Humedad de la Arena (Ha) | % | 6,12 |
| 8.- Humedad de la Grava (Hg) | % | 2,12 |

| | | |
|-----------------------------------|--------------------|---------------|
| 9.- Tamaño máximo Nominal (TMN) | pulg | 1 1/2" |
| 10.- Tamaño Máximo (TM) | pulg | 2" |
| 11.- Peso específico del cemento | gr/cm ³ | 3,14 |

Tabla 4.12 características de los agregados

FUENTE: Elaboración propia

Obteniendo como resultado la siguiente proporción de mezcla para 1 metro cubico de hormigón (1m³) inalterado u hormigón patrón, imitando a la relación 1:2:3 que es la ideal para una resistencia característica de 210 kg/cm².

| Ingrediente | Peso Seco kg/m³ | Peso Húmedo kg/m³ |
|--------------------|---|---|
| <i>Cemento</i> | 341,67 | 341,67 |
| <i>Agua</i> | 164,00 | 119,12 |
| <i>Grava</i> | 1087,20 | 1110,23 |
| <i>Arena</i> | 708,52 | 751,91 |

Tabla 4.13 pesos de los agregados método ACI-211

FUENTE: Elaboración propia

Proporción de mezcla:

| <i>Cemento</i> | <i>Arena</i> | <i>Grava</i> |
|----------------|--------------|--------------|
| 1,0 | 2,1 | 3,2 |

Tabla 4.14 proporciones de la mezcla

FUENTE: Elaboración propia

Para la realización de las probetas trabajemos con pesos secos de todos los agregados, para ello todo el material ha sido lavado y secado en el horno para así ser pesado de acuerdo a la dosificación.

En caso del agregado grueso, este será pesado, luego será llevado a volumen para así poder ser sustituido por el agregado PEBD.

| PESOS SECOS DE LOS INGREDIENTES POR (m³) DE CONCRETO | | | |
|--|------------------|-------------------------|------------------------|
| Ingrediente | Peso Seco | Volumen Absoluto | Peso específico |

| | kg/m³ | lt/m³ | gr/cm³ |
|----------------|-------------------------|-------------------------|--------------------------|
| <i>Cemento</i> | 341,67 | 108,81 | 3,14 |
| <i>Agua</i> | 164 | 164 | 1 |
| <i>Grava</i> | 1087,20 | 404,53 | 2,69 |
| <i>Arena</i> | 708,52 | 322,66 | 2,20 |

Tabla 4.15 pesos y volúmenes de los agregados

FUENTE: Elaboración propia

- ❖ Para un número de 15 probetas se calcularon los siguientes pesos y volúmenes, tomando como perdida un 20% (recomendado) el mismo que será tomado en cuenta para los demás agregados.

| porcentaje de reemplazo | pesos en kg | | volumen en litros | |
|--------------------------------|--------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|
| | grava | Agregado PEBD | grava | agregado PEBD |
| 0,00 | 103,70 | 0,00 | 38,60 | 0,00 |
| 25,00 | 77,78 | 5,19 | 28,95 | 9,65 |
| 50,00 | 51,85 | 10,38 | 19,30 | 19,30 |
| 75,00 | 25,93 | 15,57 | 9,65 | 28,95 |
| 100,00 | 0,00 | 20,81 | 0,00 | 38,60 |

Tabla 4.16 peso y volumen de los agregados para 15 probetas

FUENTE: Elaboración propia

Donde el 0% de reemplazo corresponde al hormigón patrón, donde se trabajara en su totalidad con grava, a medida del porcentaje de reemplazo aumenta, la cantidad de grava disminuye y es sustituida por el agregado PEBD.

4.1.3 pruebas aplicadas.

A continuación se presentan los datos promedios que se obtuvieron en las pruebas que se realizaron conforme a lo estipulado en el capítulo I y III, la resistencia a compresión simple y la pérdida de peso por unidad de volumen correspondiente a cada porcentaje de reemplazo de agregado.

Densidad o peso por unidad de volumen.

A continuación mostramos una tabla, donde se describen los pesos correspondientes a cada probeta, obtenidos mediante el pesado de las mismas en la balanza, tal como indica en el capítulo III.

| PESO POR UNIDAD DE VOLUMEN (kg) | | | | | | |
|--|----------------------|------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| <i>edad en días</i> | <i>N°probeta</i> | <i>porcentaje de agregado PEBD</i> | | | | |
| | | 0% | 25% | 50% | 75% | 100% |
| 7 | 1 | 13,275 | 12,395 | 11,010 | 10,134 | 9,165 |
| 7 | 2 | 13,175 | 12,120 | 11,009 | 10,480 | 9,031 |
| 7 | 3 | 13,400 | 12,186 | 11,505 | 10,515 | 9,160 |
| 7 | 4 | 13,330 | 12,188 | 11,175 | 10,031 | 9,176 |
| 7 | 5 | 12,985 | 12,090 | 11,275 | 10,011 | 9,075 |
| 7 | 1 | 13,230 | 12,070 | 11,257 | 10,476 | 9,078 |
| 7 | 2 | 13,305 | 12,145 | 11,031 | 10,333 | 9,176 |
| 7 | 3 | 13,312 | 12,065 | 11,028 | 10,407 | 9,201 |
| 7 | 4 | 13,197 | 12,155 | 11,002 | 10,521 | 9,001 |
| 7 | 5 | 13,201 | 11,899 | 11,110 | 10,017 | 9,107 |
| 14 | 1 | 13,330 | 11,920 | 11,032 | 10,345 | 9,305 |
| 14 | 2 | 13,227 | 12,333 | 11,101 | 10,442 | 9,012 |
| 14 | 3 | 13,302 | 12,128 | 11,094 | 10,228 | 9,045 |
| 14 | 4 | 13,366 | 12,310 | 11,103 | 10,262 | 9,146 |
| 14 | 5 | 13,112 | 12,180 | 11,047 | 10,145 | 9,256 |
| 14 | 1 | 13,127 | 12,087 | 11,012 | 10,132 | 9,034 |
| 14 | 2 | 13,411 | 12,007 | 11,033 | 10,221 | 9,062 |
| 14 | 3 | 13,307 | 11,981 | 11,040 | 10,237 | 9,245 |
| 14 | 4 | 13,315 | 12,041 | 11,000 | 10,318 | 8,966 |
| 14 | 5 | 13,300 | 12,331 | 11,019 | 10,176 | 9,023 |
| 28 | 1 | 13,229 | 12,027 | 11,134 | 10,200 | 9,245 |
| 28 | 2 | 13,143 | 12,110 | 11,075 | 10,313 | 8,946 |
| 28 | 3 | 13,126 | 12,142 | 11,078 | 10,015 | 9,042 |
| 28 | 4 | 13,321 | 12,067 | 11,154 | 10,031 | 9,112 |
| 28 | 5 | 13,144 | 12,006 | 11,132 | 10,001 | 9,156 |
| 28 | 1 | 13,301 | 12,101 | 11,117 | 10,342 | 9,087 |
| 28 | 2 | 13,311 | 12,115 | 11,067 | 10,452 | 9,105 |
| 28 | 3 | 13,305 | 12,089 | 11,056 | 10,401 | 9,086 |
| 28 | 4 | 13,451 | 12,220 | 11,009 | 10,197 | 9,176 |
| 28 | 5 | 13,456 | 12,146 | 11,074 | 10,089 | 9,005 |
| | <i>promedio</i> | 13,266 | 12,122 | 11,093 | 10,249 | 9,107 |
| | <i>porcentaje de</i> | 100 | 91,376 | 83,619 | 77,257 | 68,649 |

| <i>peso</i> | | | | | |
|-----------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| <i>pérdida de peso en %</i> | 0 | 8,624 | 16,381 | 22,743 | 31,351 |
| <i>desviación</i> | 0,10624 | 0,11369 | 0,10290 | 0,16401 | 0,08947 |

Tabla 4.17 detalle de pesos de probetas a diferente edad y %

FUENTE: Elaboración propia

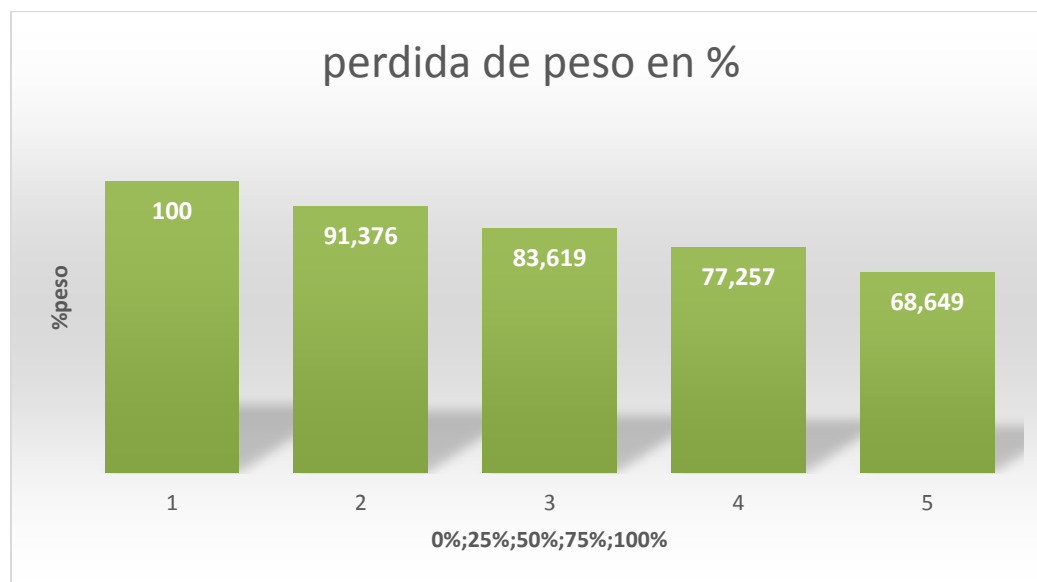


Figura 4.1 porcentaje de perdida de pesos de las probetas

FUENTE: Elaboración propia

De acuerdo a los datos obtenidos en los pesajes de las probetas podemos verificar se pierde hasta un 31% aproximadamente en peso por unidad, lo cual corrobora nuestra hipótesis planteada a un inicio.

El peso unitario correspondiente a cada porcentaje de reemplazo se lo realizo del promedio total de todas las muestras, puesto que las mismas **no varían en peso respecto a la edad que las mismas pudiesen tener.**

| peso por unidad de volumen(PU) kg/m³ | | | |
|--|----------------|-------------------------------------|-----------------------------|
| porcentaje de reemplazo | peso KG | vol. probeta (m³) | P.U Kg/m³ |
| 0% | 13,266 | 0,0053013 | 2502,4051 |
| 25% | 12,122 | 0,0053013 | 2286,6089 |
| 50% | 11,093 | 0,0053013 | 2092,5056 |

| | | | |
|-------------|--------|-----------|------------------|
| 75% | 10,249 | 0,0053013 | 1933,2994 |
| 100% | 9,107 | 0,0053013 | 1717,8805 |

Tabla 4.18 pesos unitarios promedios para cada % de agregado PEBD

FUENTE: Elaboración propia

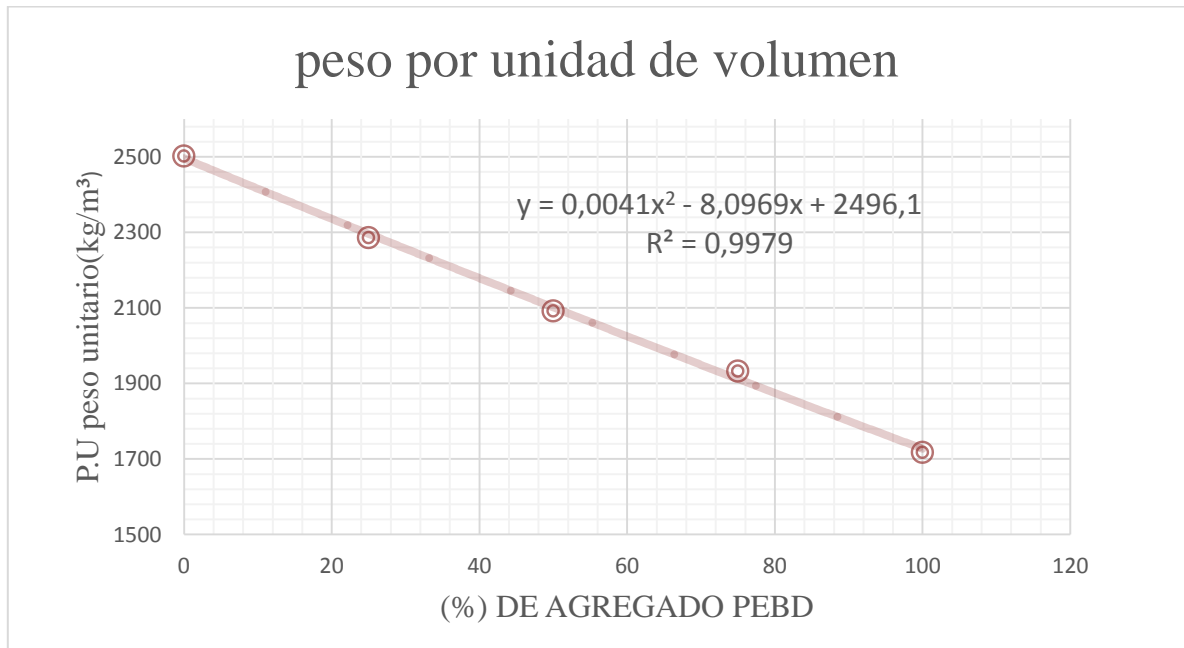


Figura 4.2 peso unitario vs porcentaje de agregado PEBD

FUENTE: Elaboración propia

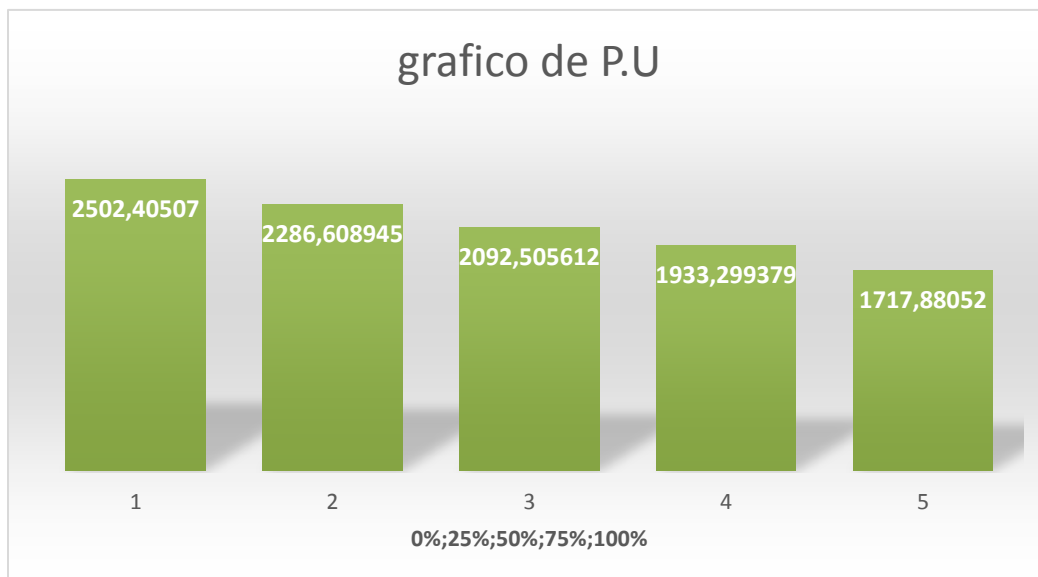


Figura 4.3 porcentaje de disminución de peso unitario en función al % de agregado PEBD

FUENTE: Elaboración propia

El peso unitario disminuyó como lo era de esperar, de acuerdo a la clasificación y definición de un hormigón ligero, la densidad de este tiene que ser menor o igual a 2000kg/m³, en las prácticas efectuadas, las probetas con contenidos de 75% y 100% están por debajo de este valor por lo que recalcamos haber cumplido con lo esperado.

Resistencia a la compresión.

Etapas iniciales 7 días de edad, lecturas tomadas en megapascuales (MPa), y con proyección a los 28 días de edad, con una resistencia de diseño de 210 kg/cm².

| RESISTENCIA A LA COMPRESION A LOS 7 DIAS (kg/cm ²) | | | | | |
|--|----------------|----------------------------|---------------|---------------|---------------|
| total pruebas | H° simple | hormigón con agregado PEBD | | | |
| | | 25% | 50% | 75% | 100% |
| 1 | 158,056 | 122,468 | 87,084 | 59,653 | 52,719 |
| 2 | 157,852 | | 88,613 | 59,042 | |
| 3 | 156,934 | 122,162 | | 60,367 | 53,229 |
| 4 | 154,997 | 123,488 | 87,798 | 59,144 | 52,311 |
| 5 | | 123,080 | 86,676 | 60,265 | 53,433 |
| 6 | 155,711 | 124,711 | | 59,347 | |
| 7 | 156,628 | 124,099 | 92,794 | 59,959 | 53,127 |
| 8 | | 121,346 | 88,409 | | 52,617 |
| 9 | 157,342 | | 88,205 | | 53,433 |
| 10 | 152,652 | 123,692 | 90,959 | 60,469 | 52,923 |
| <i>desviación estand</i> | 1,675 | 1,027 | 1,924 | 0,529 | 0,378 |
| <i>promedio</i> | 156,272 | 123,131 | 88,817 | 59,781 | 52,974 |
| <i>%de resistencia</i> | 100 | 78,793 | 56,835 | 38,254 | 33,899 |
| <i>% de pérdida de resistencia</i> | 0 | 21,207 | 43,165 | 61,746 | 66,101 |

Tabla 4.19 resistencias a compresión para 7 días de edad y porcentaje de PEBD

FUENTE: Elaboración propia

La tabla presenta celdas vacías, estas son correspondientes a los valores extremos que se leen, y para el análisis de resultados se eliminan el valor máximo y mínimo, pertenecientes a una serie de datos en común.

valores extremos no tomados en cuenta

| H°simple | hormigón con agregado PEBD | | | |
|-----------------|-----------------------------------|------------|------------|-------------|
| | <i>25%</i> | <i>50%</i> | <i>75%</i> | <i>100%</i> |
| 161,013 | 128,076 | 94,630 | 61,489 | 53,739 |
| 145,514 | 119,715 | 86,574 | 58,838 | 52,006 |

Tabla 4.19.1 valores de resistencias no tomados en cuenta

FUENTE: Elaboración propia

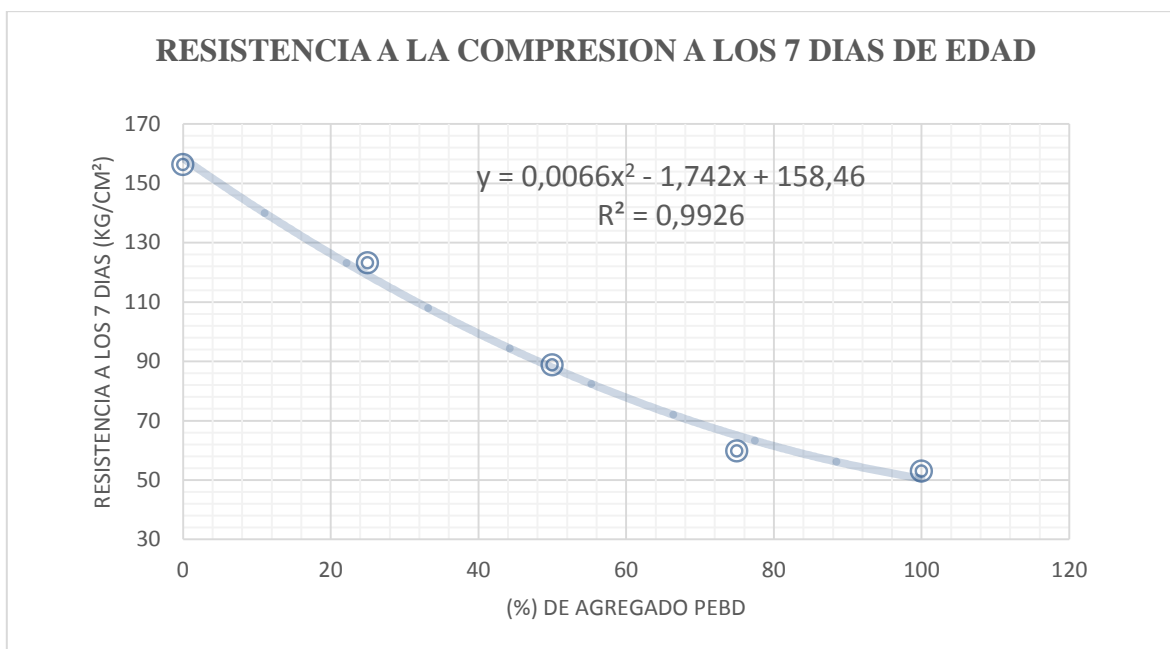


Figura 4.4 resistencia a la compresión vs porcentaje de agregado PEBD

FUENTE: Elaboración propia

Etapa 14 días de edad, lecturas tomadas en megapascales (MPa), y con proyección a los 28 días de edad, con una resistencia de diseño de 210 kg/cm².

| RESISTENCIA A LA COMPRESION A LOS 14 DIAS (kg/cm²) | | | | | |
|--|-----------------|-----------------------------------|------------|------------|-------------|
| total pruebas | H°simple | <i>hormigón con agregado PEBD</i> | | | |
| | | 25% | 50% | 75% | 100% |
| 1 | | 154,487 | 112,271 | 80,456 | 72,400 |
| 2 | 180,898 | 154,283 | 113,494 | | 73,114 |
| 3 | | 155,201 | | 79,538 | 73,522 |
| 4 | 183,345 | 152,753 | 111,455 | 79,742 | 72,808 |
| 5 | 191,299 | | 114,310 | 80,660 | 72,502 |
| 6 | 190,075 | 155,405 | | 78,518 | 72,400 |
| 7 | 183,957 | 154,283 | 113,188 | 80,150 | 73,318 |
| 8 | 184,875 | 154,895 | 113,698 | | 72,706 |

| | | | | | |
|------------------------------------|----------------|----------------|----------------|---------------|---------------|
| 9 | 183,447 | 155,303 | 113,188 | 79,334 | |
| 10 | 184,365 | | 112,883 | 80,558 | |
| <i>desviación estand</i> | 3,078 | 0,807 | 0,823 | 0,685 | 0,401 |
| <i>promedio</i> | 185,282 | 154,576 | 113,061 | 79,869 | 72,846 |
| <i>% de resistencia</i> | 100 | 83,427 | 61,021 | 43,107 | 39,316 |
| <i>% de pérdida de resistencia</i> | 0 | 16,573 | 38,979 | 56,893 | 60,684 |

Tabla 4.20 resistencias a compresión para 14 días de edad y porcentaje de PEBD

FUENTE: Elaboración propia

La tabla presenta celdas vacías, estas son correspondientes a los valores extremos que se lectura, y para el análisis de resultados se eliminan el valor máximo y mínimo, pertenecientes a una serie de datos en común.

| <i>valores extremos no tomados en cuenta</i> | | | | |
|--|-----------------------------------|---------|--------|--------|
| H°simple | hormigón con agregado PEBD | | | |
| | 25% | 50% | 75% | 100% |
| 200,578 | 156,119 | 113,902 | 80,762 | 74,745 |
| 173,454 | 150,000 | 109,925 | 79,538 | 72,094 |

Tabla 4.20.1 valores de resistencias no tomados en cuenta

FUENTE: Elaboración propia

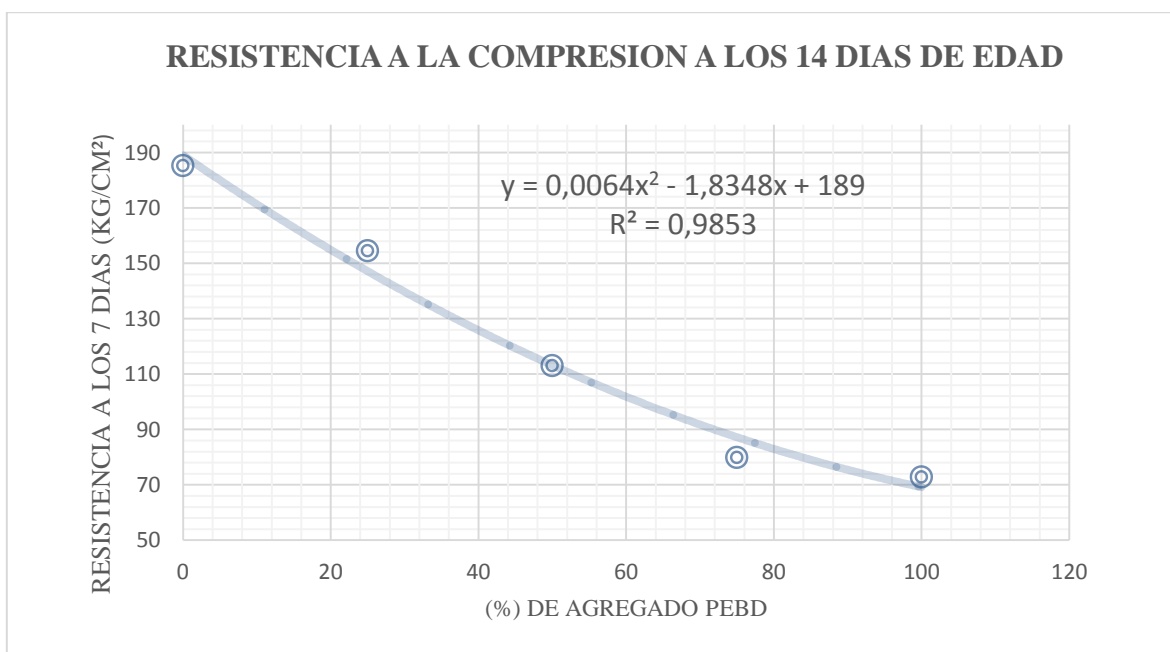


Figura 4.5 resistencia a la compresión vs porcentaje de agregado PEBD

FUENTE: Elaboración propia

Etapa 14 días de edad, lecturas tomadas en megapascales (MPa), y con proyección a los 28 días de edad, con una resistencia de diseño de 210 kg/cm².

| RESISTENCIA A LA COMPRESION A LOS 28 DIAS (kg/cm²) | | | | | |
|--|-----------------|-----------------------------------|----------------|----------------|---------------|
| total pruebas | H°simple | <i>hormigón con agregado PEBD</i> | | | |
| | | 25% | 50% | 75% | 100% |
| 1 | | 197,213 | 143,647 | 111,965 | 89,531 |
| 2 | 230,048 | 195,480 | 151,632 | 115,636 | 90,857 |
| 3 | | 193,134 | 151,734 | 112,740 | 89,735 |
| 4 | 228,416 | 195,276 | 154,283 | 114,820 | 90,041 |
| 5 | 229,946 | 193,848 | | 116,554 | 89,429 |
| 6 | 227,499 | | 155,201 | 112,679 | 91,061 |
| 7 | 226,989 | | 150,816 | 117,675 | |
| 8 | 230,354 | 193,542 | | | 91,061 |
| 9 | 228,416 | 190,687 | 158,464 | 116,758 | 88,715 |
| 10 | 229,538 | 194,664 | 156,221 | | |
| <i>desviación estand</i> | 1,166 | 1,807 | 4,212 | 2,020 | 0,808 |
| <i>promedio</i> | 228,901 | 194,230 | 152,750 | 114,853 | 90,054 |
| <i>porcentaje de resistencia</i> | 100 | 84,854 | 66,732 | 50,176 | 39,342 |
| <i>porcentaje de pérdida de resistencia</i> | 0 | 15,146 | 33,268 | 49,824 | 60,658 |

Tabla 4.21 resistencias a compresión para 28 días de edad y porcentaje de PEBD

FUENTE: Elaboración propia

La tabla presenta celdas vacías, estas son correspondientes a los valores extremos que se lectura, y para el análisis de resultados se eliminan el valor máximo y mínimo, pertenecientes a una serie de datos en común.

| <i>valores extremos no tomados en cuenta</i> | | | | |
|--|-----------------------------------|------------|------------|-------------|
| H°simple | hormigón con agregado PEBD | | | |
| | <i>25%</i> | <i>50%</i> | <i>75%</i> | <i>100%</i> |
| 246,771 | 205,269 | 160,911 | 117,267 | 91,672 |
| 223,216 | 190,381 | 143,270 | 102,889 | 87,798 |

Tabla 4.21.1 valores de resistencias no tomados en cuenta

FUENTE: Elaboración propia

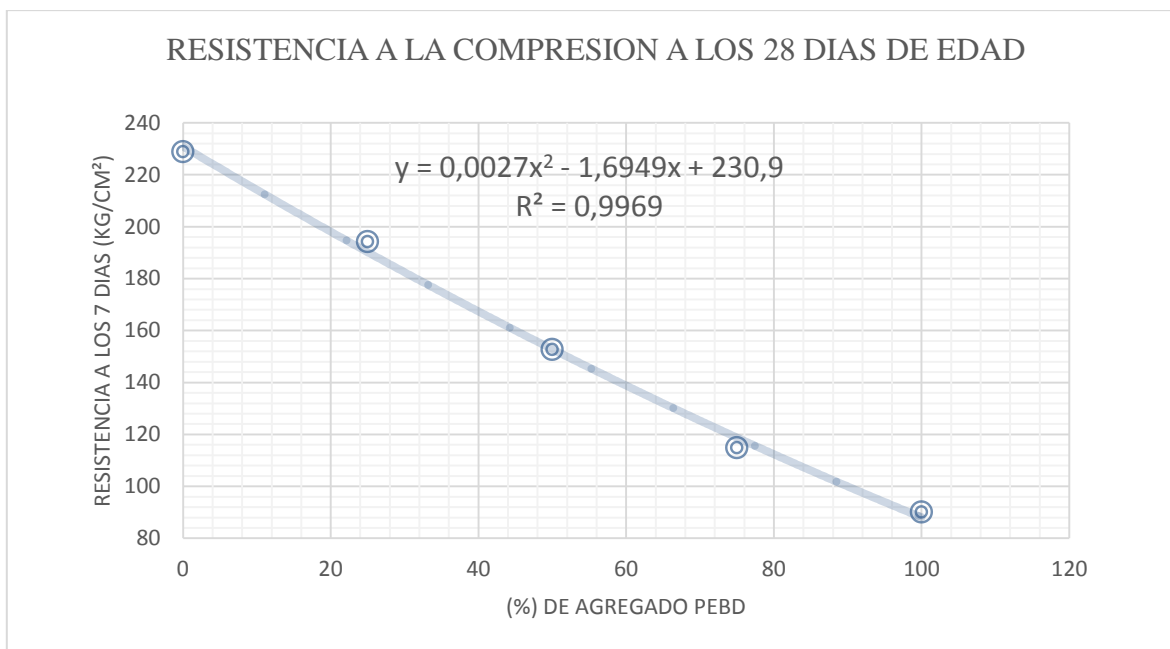


Figura 4.6 resistencia a la compresión vs porcentaje de agregado PEBD

FUENTE: Elaboración propia

Para las tres edades que se dosificaron las probetas se puede apreciar una disminución en el peso unitario del mismo paralelamente una pérdida en la resistencia a la compresión casi lineal, producto de la incorporación del agregado PEBD, conforme a tabla se puede apreciar que en un 50% de sustitución del agregado grueso por agregado PEBD, la pérdida en resistencia es casi la mitad con relación a la resistencia patrón (hormigón simple), algo que llama la atención es que entre el 75% y 100% de reemplazo no es mucho la diferencia.

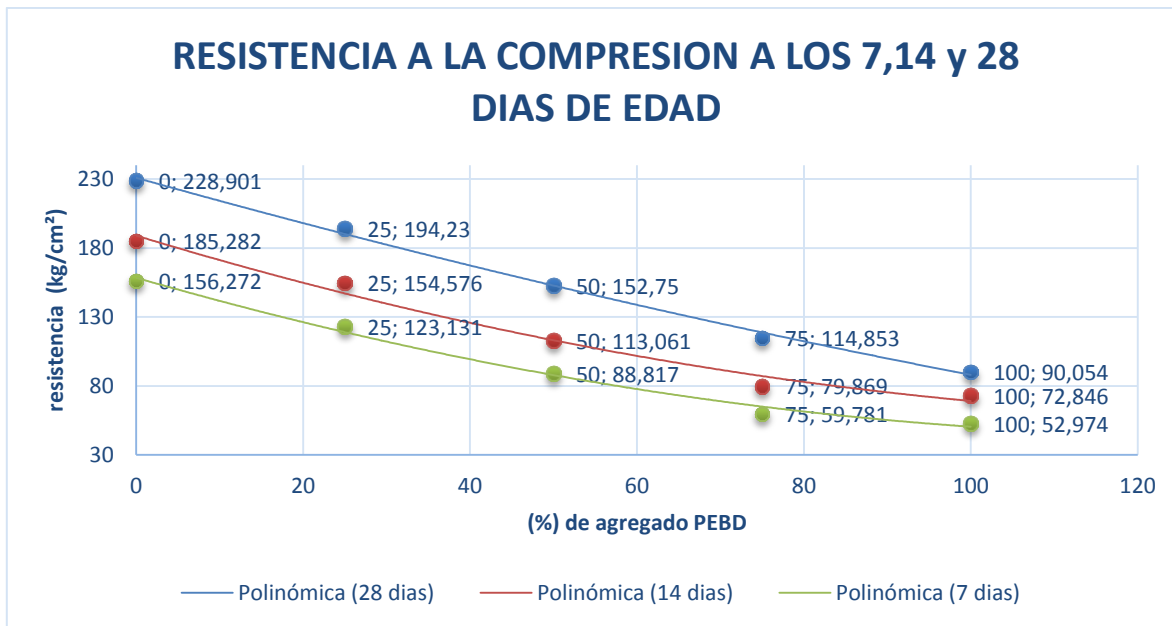


Figura 4.7 comportamiento de la resistencia para las 3 diferentes edades

FUENTE: Elaboración propia

4.3 Contrastación de hipótesis.

En los siguientes párrafos se hace referencia a los datos obtenidos en las pruebas aplicadas a los diferentes tipos de muestras elaboradas.

Partiendo como hipótesis de estudio que al sustituir el agregado grueso (grava) por un agregado nuevo obtenido por procesos creados y aplicados por primera vez en este proyecto, el hormigón disminuiría en peso hasta el punto de volverse un hormigón ligero, lo que se desconocía desde un principio es la resistencia que podía generar un hormigón a base de agregado PEBD, puesto que es la primera vez que se estudia este material como agregado en el hormigón, se tenía un ambiente de incertidumbre.

Formulas adquiridas para:

Calculo del peso unitario del hormigón a diferente % de agregado PEBD rango (0 -100%)

$$P.U = 0,0041x^2 - 8,0969x + 2496,1$$

Ec.4.1

Donde:

P.U= peso unitario del hormigon (kg/m³)

X=porcentaje aplicado de agregado PEBD (%).

De dicha formula encontraremos en % requerido de acuerdo a un P.U (peso unitario dado) de 2000 kg/m³

Despejando tenemos: **64,61%** como porcenaje de agregado PEBD minimo requerido para obtener un hormigon ligero de 1990kg/m³

Ahora tenido el porcentaje minimo requerido obtendremos la Resistencia maxima fck que podemos alcanzar, al obtener un hormigon ligero.

$$fck = 0,0066x^2 - 1,742x + 158,46 \quad 7 \text{ dias} \quad \text{Ec. 4.2}$$

$$fck = 0,0064x^2 - 1,8348x + 189 \quad 14 \text{ dias} \quad \text{Ec. 4.3}$$

$$fck = 0,0027x^2 - 1,6949x + 230,9 \quad 28 \text{ dias} \quad \text{Ec.4.4}$$

Donde:

fck= Resistencia en kg/cm² , para un determinado % de agregado PEBD

X = porcentaje de agregado PEBD.

Para la edad de 28 días podemos obtener que para un 64,61% de agregado PEBD (mínimo requerido para obtener un hormigón ligero), la resistencia máxima a alcanzar es de 132,67kg/cm², equivalente a 13,01 MPa.

Hormigón estructural cuyo valor supera los 12,5 MPa el valor mínimo requerido para ser tomado en cuenta como un hormigón estructural (norma CBH-87)

4.4 Análisis del agregado PEBD respecto al fuego.

A continuación se hará un listado de algunos cuidados que se debe de tener al utilizar el agregado PEBD, puesto que este es derivado del petróleo.

- El agregado PEBD puede ser utilizado hasta una temperatura máxima de 90°C.
- El agregado PEBD, empieza un reblandecimiento a partir de una temperatura de 110°C.
- No se recomienda su utilización en ambientes que estén sujetos a peligro de incendios como ser: cocinas, hornos industriales, etc.
- Antes de su utilización, se debe de hacer un análisis minucioso del uso que se dará a los ambientes donde se empleara el agregado PEBD, para que no presente algún peligro en el futuro.
- Para elementos estructurales decorativos y cuya función no es estructural, puede ser utilizado sin ningún inconveniente.

4.5 Costo de la elaboración del agregado PEBD.

Los precios, son adquiridos en práctica, son válidos para la ciudad de Tarija (año 2016) de proveedores particulares, estos pueden variar en otros departamentos o países, también pueden variar por el proveedor.

Los rendimientos determinados en el estudio fueron para 4 moldes independientes, de cemento, para 8 horas de trabajo y con una sola persona.

Rend: 0,064m³/día

P.U: 80 bs /día

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

| PROYECTO: | elaboracion agregado PEBD | FECHA: | 06/12/2016 | Nº | |
|-----------|---------------------------|----------------------|-------------|-----------------|----------------|
| UNIDAD: | m3 | CANTIDAD: | 1 | ACTIVIDAD | |
| | | MONEDA: | Bs | 1 | |
| Nº | DESCRIPCIÓN | UNIDAD | RENDIMIENTO | PRECIO UNITARIO | PRECIO PARCIAL |
| 1.- | MATERIALES | | | | |
| | agregado PEBD reciclado | bolsa | 28,57 | 20 | 571,40 |
| | aceite reciclado | caja | 2,5 | 5,00 | 12,50 |
| | | 1.- TOTAL MATERIALES | | | 583,90 |
| 2.- | MANO DE OBRA | | | | |
| | operario | operario | 15,62 | 80,00 | 1249,60 |

Tabla 4.22 precio unitario elaboración de agregado PEBD

Fuente: elaboración propia

Costo de elaboración con proyección para la industrialización.

De acuerdo a un análisis basado en encuestas realizadas a la empresa 3R recolectora de materiales, en la ciudad de Tarija, se evidencia que este material puede presentar disminución en su costo hasta 30%.

El rendimiento de elaboración del agregado PEBD, se puede aumentar considerablemente; proyectando para un molde de 1,5 x 1,5 mts, con cavidades separadas cada 10cm lo que equivaldría a 15 columnas por 15 filas (225 cavidades o moldes).

Rend: 3,6 m³/día.

P.U: 80 bs/ día

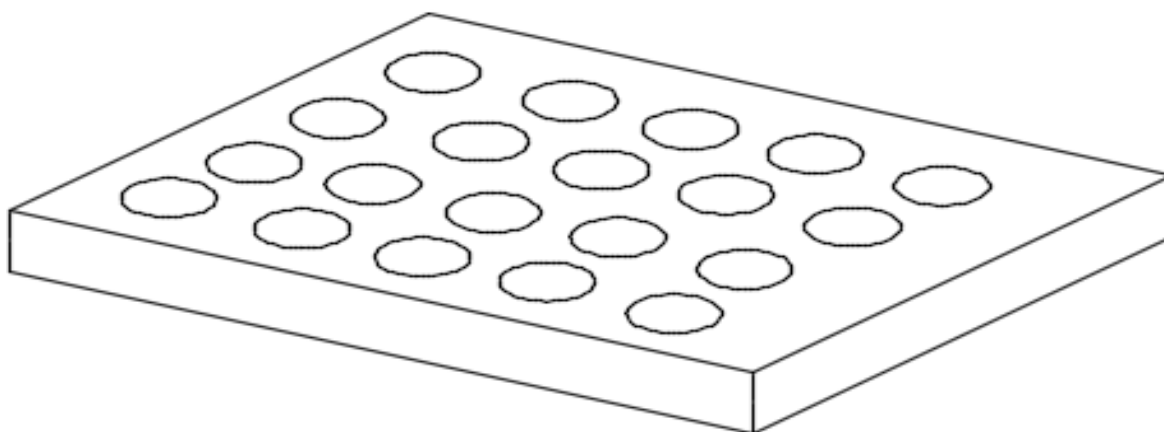


Figura 4.8 molde aparente para la industrialización

FUENTE: Elaboración propia

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

| PROYECTO: | elaboracion agregado PEBD | FECHA: | 06/12/2016 | Nº | |
|-----------|---------------------------|-----------|-------------|-----------------|----------------|
| UNIDAD: | m3 | CANTIDAD: | 1 | ACTIVIDAD | |
| | | MONEDA: | Bs | | 1 |
| Nº | DESCRIPCIÓN | UNIDAD | RENDIMIENTO | PRECIO UNITARIO | PRECIO PARCIAL |
| 1.- | MATERIALES | | | | |
| | agregado PEBD reciclado | bolsa | 28,57 | 14 | 399,98 |
| | aceite reciclado | caja | 2,5 | 5,00 | 12,50 |

Tabla 4.23 precio unitario elaboración de agregado PEBD

Fuente: elaboración propia

4.6 Conclusiones.

- Se viabilizo el uso de los desechos de polietileno de baja densidad PEBD, empleando un proceso de reciclaje novedosos y al alcance nuestro.

- Se obtuvo un agregado PEBD, de forma satisfactoria para el empleo en el hormigón.
- Se pudo recolectar grandes cantidades de material PEBD.
- Se abrieron fuentes de empleo, para personas de escasos recursos, que se dedican a recolectar esta clase de materiales.
- Se limpiaron zonas con alto grado de contaminación y de mal aspecto visual, como ser: plazas, quebradas, lotes baldíos, etc.
- El agregado PEBD, posee una densidad menor al agua.
- El agregado PEBD se distribuye de forma uniforme en todo el volumen de las muestras de hormigón realizadas en laboratorio, comparando con otros agregados ligeros este se comporta como un agregado grueso común.
- En los ensayos de compresión simple de las probetas se observó que las rupturas se dan en un 85% por adherencia y 15% por falla del agregado.
- En los ensayos de peso por unidad de volumen, se comprueba que al aumentar el % de agregado PEBD, el hormigón pierde peso hasta un 32% para un 100% de agregado PEBD y 0% de agregado grueso común.
- Para la prueba de compresión simple, se comprueba que al aumentar el % de agregado PEBD, el hormigón pierde resistencia hasta un mínimo de 90kg/cm² para un 100% de agregado PEBD y 0% de agregado grueso común.
- La forma esférica del agregado, hizo que las fuerzas cortantes por compresión no actúen de forma directa en el agregado.
- el hormigón con agregado PEBD es de gran utilidad para la construcción de elementos señalados en los capítulos 4.4 como hormigón ligero estructural (H-12,5).
- Para un porcentaje de 64,61% de agregado PEBD, en las muestras, se obtuvo un hormigón estructural con una resistencia a compresión simple de 13,01Mpa, mayor a lo requerido por norma CBH.
- La elaboración del agregado PEBD puede disminuir considerablemente en costos si se industrializa, como se muestra en las tablas de precios unitarios.
- El agregado PEBD, no presenta cambios físicos o químicos a bajas temperaturas.
- El agregado PEBD no presenta cambios con la utilización de agentes químicos.

- El material PEBD en el futuro puede ser usado para la fabricación de barras (para armaduras) por su característica física de ramificaciones.
- El agregado PEBD, no presenta cambios, por la acción de agentes químicos, ácidos o bajas temperaturas.
- El agregado PEBD presenta resistencia a elevadas temperaturas, similar al hormigón.

Recomendaciones.

- Leer el capítulo 4.4 antes de emplear en agregado PEBD en estructuras, donde se hace mención a algunas características importantes del agregado PEBD.
- En caso de emplear vibrador para la fabricación de elementos, se recomienda tener precaución en el uso del mismo, porque puede variar la distribución del agregado PEBD.
- En caso de querer aumentar la adherencia entre el agregado PEBD y el hormigón, se debe trabajar en la textura del mismo, o ver la forma de utilizar algún aditivo que pueda aumentar la adherencia entre los mismos.
- Se recomienda que en el futuro se pueda ampliar el estudio realizado con otras alternativas y otros usos posibles del material.