

CAPITULO I
EL OBJETO DE CONOCIMIENTO

1. EL OBJETO DE CONOCIMIENTO

1.1. El problema.

1.1.1. Antecedentes.

Hasta la fecha se han presentado diferentes adiciones y sustracciones a la mezcla de hormigón con el objeto de mejorar su comportamiento, abaratar costos y reducir el peso del mismo.

El hormigón es un material compuesto por “aglomerados y aglomerante”, el primero está constituido por los agregados pétreos que permiten formar una pasta moldeable y consistente; el segundo está compuesto por agua y cemento; esta combinación reacciona químicamente logrando así el endurecimiento.

En nuestro país el hormigón, es uno de los principales materiales utilizados en construcción de obras civiles.

Entre sus propiedades mecánicas es capaz de resistir esfuerzos a compresión y tracción, teniendo amplia ventaja su resistencia a compresión.

Entre sus propiedades físicas llama la atención el peso propio del mismo, siendo este considerable, más aun cuando nos referimos a hormigón armado, no está demás considerar a esta situación como desventaja cuando sucede que el peso propio de la estructura es mayor que la suma de las con-cargas.

1.1.2. Planteamiento.

Las variables comprometidas con el peso del hormigón, son directamente proporcionales al peso de cada uno de sus componentes, con mayor influencia los materiales que poseen mayor peso unitario, sea el caso del agregado grueso y el agregado fino, por ser estos aproximadamente el 75% de la mezcla, sumando a ello la hidratación del cemento, teniendo en conjunto un peso unitario de hormigón en masa equivalente a (2400 y/o 2600 Kg/m³).

Los efectos más desfavorables al presentarse estas situaciones limitan la industrialización de piezas pre-fabricadas por el costo elevado de transporte, siendo

este ítem cancelado por peso, resumiendo que a mayor peso, mayor costo, además este impedimento ocasiona que piezas de gran tamaño sean elaboradas in-situ con bastante probabilidad que la pieza obtenga variaciones geométricas por malos encofrados y características de resistencia mecánica menores a las de diseño por no tener un adecuado control de calidad como tuviera en fábrica. Se vio en muchas ocasiones que el peso de la estructura es mayor que la suma de las con-cargas debido a la amplitud de la sección, resumiendo en este caso que a mayor sección mayor peso, y todo ello acompañado de mayor costo.

Para aligerar el peso de estos hormigones se podría:

- Reemplazar los agregados pétreos naturales, por agregados pétreos artificiales ligeros (cascotes de ladrillo).
- Generar un hormigón ligero a base de papel maché (pulpa endurecida de papel).
- Generar un hormigón ligero utilizando fibra vegetal (aserrín y/o viruta de madera).

1.1.3. Formulación.

En el planteamiento de este trabajo surge la siguiente pregunta como punto de partida de la investigación:

¿Cómo se podría reducir el peso del hormigón?

Al reemplazar los agregados pétreos por materiales livianos sean pétreos o no, en consecuencia con las alternativas de solución planteadas al ocupar el mismo volumen y menor masa el efecto de ligereza se hará presente.

1.1.4. Sistematización.

Para aligerar el hormigón se identificó que es preciso reducir el peso de sus componentes como ser “peso de los agregados pétreos”, “peso del cemento hidratado”.

Variables independientes.

Peso de los agregados pétreos.- Al poseer mayor densidad dentro de la mezcla, son las variables indicadas a ser modificadas, además por ser aproximadamente el 75% de la mezcla del hormigón.

Peso del cemento al ser hidratado.- La hidratación del cemento es una variable que no puede ser sustituida y/o modificada pues dicho evento es necesario para que el cemento reaccione químicamente. Existen ventajas de contar con menor cantidad de agua en el preparado de la mezcla pero en el proceso de curado este es un requisito indispensable.

Alternativas de solución.

De las alternativas de solución planteadas, para corregir el considerable peso del hormigón, se descarta la utilización de materiales pétreos cerámicos, dejando como alternativas las dos restantes que son producto de residuo:

Generar un hormigón ligero a base de fibra vegetal (aserrín y/o viruta de madera):

Técnicamente, la fibra vegetal en este caso la escoria de madera (aserrín) carece de adherencia con el concreto y para obtener grandes cantidades el proceso de elaboración es tedioso generando pérdidas en dicho proceso.

Económicamente, la escoria de madera si bien es un producto de residuo, tiene un costo elevado a raíz de la producción controlada que los ambientalistas rigen sobre este material de construcción.

Generar un hormigón ligero a base de papel maché:

Técnicamente, el papel maché al ser en su estructura un elemento similar al asbesto cemento, propone buena adherencia como material compuesto en ensayos que anteceden la inquietud del presente estudio, en cuanto a su fabricación es muy sencillo y para poder adquirirlo en grandes cantidades es un material que podemos encontrar fácilmente.

Económicamente, por ser un material abundante gracias a los residuos que generan las empresas de prensa escrita es comercializado por peso y debido a la baja demanda lo convierte en un material accesible.

Alternativa seleccionada.

De las dos alternativas planteadas, se define como material alternativo viable al papel maché, puesto que la producción de papel, en particular el destinado al sector de prensa escrita representa en el mundo entero, uno de los principales causantes de contaminación ambiental, no simplemente por los desechos de la producción misma, sino por la deforestación de bosques que ocasiona su fabricación. Si bien las fábricas de papel reutilizan sus propios desechos como materia prima, no frena la devastación de bosques ya que prácticamente la producción neta del sector termina en nuestros hogares y por siguiente en la basura sin ser utilizado, y la demanda de prensa escrita es menor por que el papel con mayor cantidad de tinta es menos reutilizable.

En nuestro país actualmente, la contaminación ambiental es una preocupación superficial, al creer que todavía respiramos aire puro, a razón de ello no contamos con proyectos de recolección de basura, que nos permitan distribuir nuestros desechos del hogar por tipos de materiales.

Al momento de considerar un material de desecho, como material de construcción sin duda es un aporte al bienestar de nuestra ecología con la exterminación de basura y con menor explotación de áridos proveniente de los ríos y canteras.

1.2. Objetivos.

El presente trabajo de investigación tiene los siguientes objetivos:

1.2.1. General.

Estudiar la incidencia del papel maché en: el peso propio y en la resistencia mecánica a compresión del hormigón, a partir de un diseño de mezcla con una resistencia f'_{ck} de 210 kg/cm^2 , mediante los ensayos ASTM.

1.2.2. Específicos.

- Optimizar el aprovechamiento de papel de desperdicio, en el proceso de elaboración de papel maché mediante el reciclaje.
- Identificar los procesos mecánicos necesarios, para la fabricación y tratamiento del agregado propuesto (papel maché).
- Evaluar las características de los agregados (grava, arena, papel maché), a los efectos de identificar su compatibilidad y trabajabilidad.
- Diseñar un hormigón convencional (patrón – testigo) para una resistencia f'_{ck} de 210 kg/cm² basado en las norma de dosificación (A.C.I), American Concrete Institute.
- Comparar las mezclas de: hormigón alterado con “papel maché” (Vs.) hormigón convencional, con el fin de poder verificar si los agregados inciden o no en la consistencia de la mezcla y en la resistencia a compresión del hormigón endurecido.
- Identificar las aplicaciones del hormigón basado en papel maché, en función a sus características físicas y mecánicas, de manera que sea posible ser usado en obra como material de construcción.
- Establecer el procedimiento de diseño de mezclas del hormigón a base de papel maché, en dependencia de las características de los agregados naturales y artificiales.
- Generar una ecuación empírica que permita determinar la resistencia de un hormigón maché en función al porcentaje de papel.
- Generar una ecuación empírica que permita determinar el peso de un hormigón maché en función al porcentaje de papel.

1.3. Justificación.

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

1.3.1. Teórica.

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

1.3.2. Metodológica.

A través de la selección de un hormigón patrón de peso normal y resistencia mecánica f'_{ck} de 210 kg/cm², metodológicamente a partir de dicha dosificación, se pretende reemplazar parcial y progresivamente el agregado grueso, por el material propuesto en proporción volumétrica, representada en porcentaje de (0% a 100%), de manera que las partículas de este ocupen el mismo volumen del agregado extraído y generen menor masa; conservando, aumentando y/o disminuyendo la resistencia mecánica a compresión, procurando alcanzar una resistencia estructural, así sea la mínima requerida imitando a un hormigón convencional.

1.3.3. Práctica.

Prácticamente al reemplazar parcial o totalmente los agregados pétreos por otro material, en este caso el papel maché, efectivamente solucionará el problema del peso ya que el mismo presenta una generosa ligereza.

1.4. Hipótesis.

Como parte del método de este trabajo, se planteó la siguiente hipótesis para responder las preguntas de investigación:

- El papel maché equivalente al 40% del agregado grueso, reducirá el peso del hormigón, de manera que el peso unitario corresponda a la categoría de un hormigón ligero (será menor o igual a 2.000 kg/m³), y conservará una resistencia mecánica a compresión de un hormigón estructural mayor o igual al mínimo requerido equivalente a 140 kg/cm².

1.5. Alcance del estudio.

El campo del trabajo de investigación está delimitado a estudiar en cuanto a:

Característica Mecánica: Resistencia a compresión simple del hormigón

Característica Física: Densidad o peso unitario.

A través de un diseño de mezcla basado en la norma de dosificación A.C.I. 211, para una resistencia mecánica de f'_{ck} de 210 kg/cm², siendo el punto de partida para reemplazar parcial y completamente el agregado grueso, de manera que el material alternativo simule ser grava, en ese caso dichas variaciones se representarán en porcentajes, cuales tendrán las siguientes variaciones de manera progresiva ascendente, es decir valores del rango 0% a 100%. Ej. 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100% y así determinar su resistencia característica de manera respectiva a través de los ensayos de los materiales A.S.T.M. C39, American Society for Testing and Materials.

El procesamiento de datos tendrá como fin revelar la alternativa de solución más coherente de dosificación, donde haya un equilibrio de alto desempeño y alta ligereza.

1.5.1. Tipo de estudio.

El estudio está dirigido a generar proporciones óptimas de un hormigón ligero de manera experimental, mismo quedará delimitado en una línea de investigación experimental cuasi empírica, ya que el propósito es alterar la dosificación patrón obtenida para un hormigón de peso normal, de manera que se logre aligerar el hormigón tratando de conservar, mejorar, y/o reducir la característica mecánica a compresión, de manera que el papel maché reemplace parcial y completamente el volumen del agregado grueso con variaciones porcentuales aleatorias, es decir de 0% hasta un 100%, generando así ecuaciones empíricas que nos ayudarán a determinar el peso de la pieza para un determinado porcentaje del material propuesto, como también la resistencia mecánica a compresión para cierto porcentaje de dicho material.

1.5.2. Aspectos metodológicos.

Preparación de los agregados.- Para asegurarse de obtener un hormigón de alto desempeño se debe preparar los materiales pétreos a utilizar, de manera que no contengan envoltura limosa o arcillosa es decir utilizar materiales aparentemente limpios.

Elaboración del papel maché.- La preparación del papel consiste en remojar retazos de papel periódico por lo menos en un lapso de 2 horas como mínimo, para que este se sature por completo y pueda disgregarse o reducirse a pulpa; dicho efecto debe tener intervención mecánica de molienda para así formar una pasta homogénea y posteriormente reducir el exceso de agua para mezclarlo con el pegamento celulósico (Engrudo) que se encargará de convertirlo en una masa consistente que permita el moldeado deseado, y así dejarlo secar para su endurecimiento.

Caracterización de los agregados.- Es primordial conocer las características de los agregados que participarán tanto en la dosificación del hormigón patrón como en la dosificación del hormigón ligero a base de papel maché que de aquí en adelante llamaremos H°M° (Hormigón Maché).

Entre las caracterizaciones de los materiales que se realizarán son:

- Granulometría del agregado fino.
- Granulometría del agregado grueso.
- Granulometría del papel maché.
- Peso específico del agregado fino.
- Peso específico del agregado grueso.
- Peso específico del papel maché.
- Peso unitario del agregado fino.
- Peso unitario del agregado grueso.
- Peso unitario del papel maché.

Dosificación del hormigón con papel maché. Una vez obtenida la dosificación patrón en peso, el agregado grueso natural (grava) será remplazado en forma volumétrica por el papel maché, mismo se presentará en seco ya que se anulará la absorción del papel en la mezcla con el afán de conservar la relación agua/cemento (a/c) como constante y además de evitar que se convierta en alojamiento de micro organismos biológicos (moho) atraídos por la humedad del papel. Los porcentajes fueron definidos a manera de contar con once puntos y generar una ecuación a partir de la curva obtenida, correlacionada entre la resistencia del hormigón y el porcentaje de papel.

Efectivamente dentro de la proporción del papel maché existirá dispersión granulométrica, de manera que los terrones de papel maché o agregado fabricado, simule ser grava y cumplan con la granulometría ideal (graduada) que sugieren la norma ASTM C33. Conociendo el límite inferior en las mallas normalizadas, siendo esté el tamiz N°4 sería lógico separar y desechar las partículas menores a la granulometría real del agregado grueso natural (grava), para que así la simulación del agregado grueso artificial reemplace en mismas condiciones al agregado grueso natural.

Elaboración de probetas. La medida de la resistencia a compresión se efectúa por medio de pruebas estandarizadas. Por tanto las probetas serán elaboradas en cilindros de 15 cm de diámetro y 30 cm de alto.

Rotura de probetas. La información de datos recolectados tanto para la rotura como también el peso de probetas se basará en el procedimiento de muestreo, es decir cada medición tendrá una muestra de 4 unidades, que comúnmente en obras civiles dicha muestra se conoce como pastón de prueba.

Con el fin de estudiar la evolución de fraguado se someterán las probetas a resistencia mecánica de compresión simple a los: 7 y 28 días de edad, realizando una cantidad total de 88 probetas.

La investigación se puntualizará en el resultado generado más óptimo, siendo este el punto de equilibrio entre ligereza y resistencia con el cual se pretende construir un conocimiento analítico a partir de las características del material propuesto.

1.5.3. Tratamiento de la información.

Una vez completada la recolección de datos se procederá a los cálculos matemáticos en el cálculo de gabinete.

Una vez obtenidos los resultados de los esfuerzos a compresión de las probetas en función a cada uno de los porcentajes, se desarrollará una ecuación empírica con la ayuda de una gráfica en el plano cartesiano, que como dato en el eje horizontal será el porcentaje de papel en el hormigón y en el eje vertical la resistencia a compresión obtenida para cada porcentaje.

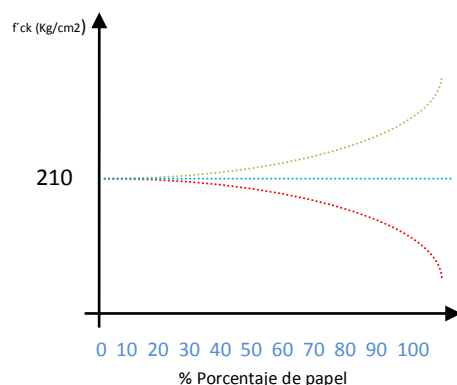


Figura 1.1 Ejemplo del tratamiento de la información % Papel Vs. Resistencia

FUENTE: Elaboración Propia

De la misma forma, se procederá a generar una ecuación en función al peso por unidad de volumen (peso unitario) en el eje vertical, que nos generará una curva en la cual identificaremos la reducción del peso unitario para cada porcentaje de papel.

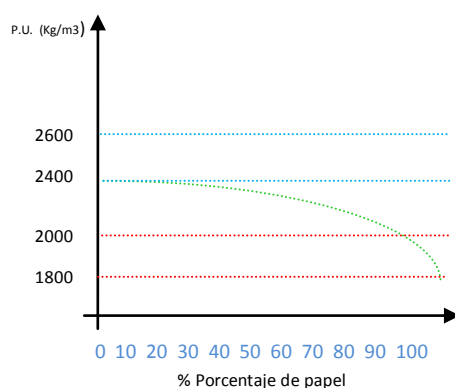


Figura 1.2 Ejemplo del tratamiento de la información % Papel Vs. P.U.

FUENTE: Elaboración Propia

1.6. Estado del arte.

Se entiende por “Estado del arte”, a la historia y análisis general en conjunto, de las publicaciones e investigaciones que se han hecho sobre el tema en específico.

El campo de investigación de los materiales compuestos es extenso, y los apartados que corresponden a las materias primas y tipo de compuesto que se pretende estudiar, tienen un avance constante. A continuación se enuncian algunas investigaciones que sirven de partida para este trabajo.

Vargas Robles Luis Arturo, “Uso de fibras de papel periódico, cal hidratada y alumbre en la elaboración de un material compuesto”, México, 2007, Universidad de Colima “Facultad de Arquitectura y Diseño” tesis para obtener el grado de maestro en arquitectura. Se hizo un diseño de muestras, donde se variaron las proporciones de los agregados (Pulpa de Papel, Cal y Alumbre) con el fin de analizar las características generadas en los diferentes tipos de mezcla. Se aplicaron a las muestras pruebas para materiales convencionales, basados en las normas ASTM, consistentes en: resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, densidad, contenido de humedad, absorción, resistencia a la compresión ante saturación y conductividad térmica. Posterior a ello se procesaron los resultados de las pruebas, para generar la información acerca de las características de las mezclas y analizarla por medio de métodos estadísticos.

Agulló, Aguado, y García (2006), investigaron la reutilización del desperdicio de la pulpa de papel en la manufactura de elementos de papel no estructurales, en la formación de un material compuesto en forma de empastado. Fueron analizadas algunas variables, como la cantidad de pulpa agregada o el proceso de mezclado. Aún cuando en los resultados de las pruebas del material recién elaborado o endurecido lo hacen factible, el alto contenido de agua y la formación de grumos, hacen necesario un tratamiento previo.

Bojórquez (2005), en su trabajo de tesis doctoral, planteó el uso de fibras de caoba en conjunto con cemento Pórtland, en la formación de paneles para uso como material de construcción. El autor, hace mención que no existe metodología definida para el diseño de ese tipo de materiales, que el análisis que se hace de este tipo de materiales hasta el momento es incompleto por no realizar análisis micro estructural; y que aún cuando los trabajos se plantean como materiales de bajo costo, no incluyen un análisis financiero.

Demir, Serhat y Orhan, (2005), realizaron un trabajo sobre el uso de los residuos de la producción de pulpa de papel kraft como agregado en la producción de ladrillos de arcilla. Las fibras que constituyen a este desecho son de tamaño corto, las cuales son usadas con propósitos agrícolas o para producir cartones para huevos. Un modo de incrementar la capacidad aislante del ladrillo es generar cavidades porosas en éste; para ello se utilizan aditivos formadores de poros de tipo orgánico que sean combustibles, y es por la naturaleza orgánica de la pulpa kraft que se investigó la capacidad para formar poros. Se incrementó la cantidad de pulpa hasta llegar a un 10% de esta en las mezclas; las muestras fueron calcinadas a 900° C. En los resultados se observaron aceptables características mecánicas y que la pulpa puede ser utilizada como agente en la formación de poros.

En una investigación hecha por Basta Abd, El-Sayed y El-Saied (2004) y otros investigadores se examinaron los efectos de tratar el papel de desecho antes y durante la elaboración del panel, con la adición de polímero acrílico, reemplazando parte del yeso por fosfo-yeso y escoria de cemento (desechos industriales de bajo costo). Para

establecer una comparación se utilizaron paneles ligeros hechos a base de tallos de maíz. En el experimento fueron usados materiales lignocelulosos como el papel periódico y los tallos de maíz; y como aglutinantes se usaron fosfo-yeso y escoria de cemento. Se basaron en trabajos anteriores de Basta para tratar los materiales: el papel periódico y los tallos de maíz se trataron con 6% de silicato de sodio durante 2 minutos y posterior a ello se agregó 6% de cloruro de magnesio, lo que se amasa por 3 minutos. Se concluyó que el tratamiento previo de las fibras resulta mejor que el tratamiento durante la elaboración del panel.

En la Universidad del Estado de Michigan, Wibowo, Mohanty, Mizra, y Drzal (2004), estudiaron las propiedades termo mecánicas y morfológicas, de materiales plásticos basados en materiales orgánicos, a base de celulosa, y reforzados con fibra de cannabis (variedad industrial). Una vez mezcladas las fibras de cannabis con una matriz bio-polimérica de éter de celulosa, nuevos materiales biocompuestos se formaron a partir de dos procesos: impregnación de polvo y extrusión, seguido de moldeado por inyección. En los resultados obtenidos demostraron, que no sólo el uso de refuerzo con fibras naturales es lo que contribuye al buen desempeño de los elementos, sino que los aditivos cumplen una importante función.

Shenton y Wool (2004), al frente del grupo de investigación del ACRES (Affordable Composites from Renewable Sources) de la Universidad de Delaware, investigaron el uso de los triglicéridos del frijol de soya como material puro en la síntesis de nuevos polímeros susceptibles para procesos de moldeado líquido. En la investigación se estudió cómo este material puede usarse en construcción de vivienda al combinarse con fibras naturales entre las cuales están: linaza, cannabis (de la variedad industrial), celulosa, papel reciclado, cartón reciclado, papel periódico y plumas de gallina. Con el uso de la resina del frijol de soya, se fabricó una variedad de “vigas tipo” con diferente diseño. La forma de las vigas fue la de una estructura con relleno interior, cuyas caras superior e inferior, están separadas por una espuma y redes intermitentes. Las vigas se fabricaron por medio de un sistema de moldeado por transferencia de resina, asistido por vacío, VARTM (por sus siglas en inglés). Las vigas tipo se

probaron en tres puntos de flexión hasta que fallaran. Se caracterizaron la resistencia, rigidez y modos de falla. De acuerdo a los resultados obtenidos el diseño de mezcla que resultó más prometedor fue el de resina basada en frijol de soya con papel reciclado como refuerzo. Se hace notar en este punto del diseño de la viga que la resistencia y rigidez del relleno formado por la resina y por las fibras naturales, se ha ignorado en el diseño de la misma pero sirve para proveer aislamiento.

Relacionado con la investigación de Shenton y Wool está la realizada dentro del mismo programa, que fue conducida por Chandrashekhara y otros investigadores, en la Universidad de Missouri-Rolla, donde se estudia la aplicación de la resina de soya y fibras naturales o sintéticas como materiales para la construcción de vivienda. Así también, Brazal y otros en la Universidad del Estado de Michigan, exploran el uso de fibras tratadas de vástago y hojas de piña, para poder conseguir las propiedades mecánicas requeridas del material compuesto basado en materiales orgánicos.

En el Instituto de Construcción en Acero, Inglaterra Tandy-Raven (2003), se desarrolló una investigación sobre el uso de la celulosa de papel reciclado como material aislante en construcciones metálicas modulares. Parte del proyecto, consistió en conocer los materiales que se utilizaban para tal fin, en el momento que pudieran ser sustituidos con materiales a base de celulosa de papel reciclado. La parte experimental de la investigación, consistió primero en la identificación de las mezclas de celulosa con otros aditivos. La primera mezcla fue hecha a base de celulosa de papel periódico reciclado, al cual se le añadió sulfato de aluminio y ácido bórico. La segunda mezcla incorporó celulosa de papel de alto brillo reciclado, al cual se le añadió trihidróxido de aluminio y ácido bórico. Los aditivos utilizados en ambas mezclas, son utilizados como retardantes de fuego y anticorrosivos. En segundo lugar, se sometieron los prototipos a pruebas de fuego y corrosión. Los resultados de las pruebas revelaron que los prototipos funcionaron adecuadamente para la resistencia al fuego, pero ante la corrosión, quedaron por debajo de los que existen en el mercado.

Bojórquez, Luna, y Gallegos (2000), investigaron sobre el uso de sílice y lodo de papel, ambos desechos industriales, los cuales fueron incorporados a un concreto ligero, con lo que se favorecen las propiedades de aglomeración y aislamiento térmico. Fueron caracterizadas las propiedades físicas y mecánicas de la mezcla de cemento, cal, sílice y lodo de papel, en varias dosificaciones, además de sus propiedades térmicas. En los resultados obtenidos se observó que el material posee características físicas y mecánicas aceptables como material de mampostería aislante térmico, así como el hecho de que la mezcla ofrece reducción de costos en construcción pues utiliza desechos industriales, requiere cimentaciones de menor dimensión por su baja masa volumétrica, y existe un ahorro en gasto energético por su capacidad aislante.

1.6.1. Uso histórico del papel en materiales compuestos.

Históricamente el papel de desperdicio se ha utilizado en materiales compuestos desde el descubrimiento de la elaboración del proceso mismo; ejemplos claros se pueden apreciar en la artesanía de la cultura China donde se dio origen a esta técnica, la cual fue importada por los europeos, e impulsada en el periodo de la revolución industrial con mayor impacto en Francia donde adquirió el nombre.¹

En épocas tardías, en Inglaterra 1772, Henry Clay desarrolló un nuevo panel de papel resistente al calor, cuya importancia de este desarrollo, residió en el uso de hojas laminadas en vez de la materia prima en pulpa. Más adelante, en la década de 1780, George Bielefeld, desarrolló un panel de mejores características, hecho de pulpa de papel para interiores. En 1788, George Ducrest, en Londres, patentó el uso de papeles laminados para botes, casas, mesas, y sillas. Fue innegable el éxito del papel en la manufactura de nuevos materiales compuestos plásticos, como paneles de interiores, paneles de carga, y muebles y su manufactura formó una industria creciente en Inglaterra, durante la revolución industrial.²

¹ Vargas Robles 2007

² White, Kimber, Hayes, James, y Atkinson, 1999.

La variedad de tipos de Papier Maché, como materiales compuestos fibrosos basados en materias orgánicas, proveyeron propiedades importantes de ligereza, fuerza, moldeado y acabado, que otros materiales no podían dar. La gran novedad, fue la adopción de paneles de este tipo de “papel macerado” en vez de madera, para el interior de los vagones de ferrocarril. Hay en existencia muchos ejemplos de productos manufacturados a base de estos materiales y uno de los más importantes sobrevivientes está en Inglaterra y es el domo de la sala de lectura en la Biblioteca Británica, con un techo de paneles, hechos de papel maché, el cual fue construido en 1855, bajo el principio de material compuesto, que en ciencia reciben ese nombre todos los materiales que se forman por la unión de dos o más materiales, para conseguir la combinación de sus propiedades que no es posible lograr por separado.

Existieron dos métodos de manufactura para paneles de papel: el primero, consistía en papel de desperdicio y fibras de varios tipos, hechas pulpa y comprimidas en tablas; las versiones estructurales tardías, incluían una variedad de resinas, betunes, pegamentos y agregados inorgánicos, tales como la “Pasta de Paris”, acorde a los requerimientos de uso final. El Cartón Pierre mejorado, fue el más exitoso de los manufacturados por Jackson & Son, los ornamentos hechos con este material, fueron hechos de pulpa de papel, mezclados con blanqueador y pegamento, colocados en moldes, y secados gradualmente en un cuarto caliente. Los materiales compuestos de pulpa de papel, fueron también usados en la fabricación de bandejas, muebles, botones, etc., pero éstos fueron artículos más baratos. El segundo, y considerado el mejor de los métodos (aún cuando consumía demasiado tiempo), consistía en la laminación de hojas de papel en tablas, sistema inventado por Henry Clay; pegamento y pasta de harina, eran aplicados en un papel sin dimensiones determinadas, cada hoja era presionada individualmente en un molde para remover las burbujas de aire, entonces las hojas eran sumergidas en aceite de linaza y después horneadas a 37.77° C (100° F); más hojas eran adicionadas y después horneadas hasta obtener el espesor deseado. El resultado era un panel rígido e inflexible, el cual, si tenía un grosor de 120 hojas aproximadamente, requería de un considerable número de días para su secado.

Los desarrollos en el siglo veinte, incluyen algunos elementos a base de pulpa y fibra moldeados, utilizados en interiores de automóviles y artículos domésticos, los cuales fueron fabricados entre 1897 y 1950, eran resistentes al agua y supuestamente irrompibles. Estos materiales utilitarios, fueron sucedidos por los plásticos modernos. Con el descubrimiento del formaldehído en la parte temprana del siglo veinte, una línea de laminados a base de papel y este agregado, fueron producidos y utilizados en la fabricación de componentes industriales, además de equipos y fuselaje de aeroplanos.³

³ White *et al*, 1999.

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2. MARCO TEORICO

2.1. El hormigón.

El hormigón es una mezcla de cemento portland, agregado fino, agregado grueso, aire y agua en proporciones adecuadas para obtener ciertas propiedades prefijadas, especialmente la resistencia.

$$\text{HORMIGÓN} = \text{CEMENTO PORTLAND} + \text{AGREGADOS} + \text{AIRE} + \text{AGUA}$$

El cemento es el pegamento o ligante hidráulico que reacciona químicamente en contacto con el agua, uniendo las partículas de los agregados, constituyendo un material heterogéneo. Algunas veces se añaden ciertas sustancias llamadas aditivos, que mejoran o modifican algunas de sus propiedades.¹

Agregados o áridos, se denominan a los materiales inertes tales como el agregado fino y el agregado grueso, pues estos constituyen el material llenante; están compuestos por una parte fina y por otra gruesa respectivamente. Al Agregado fino comúnmente se le conoce como arena y al agregado grueso como grava o piedra triturada. La diferencia entre arena y grava se ha establecido de forma conveniente y arbitraria tomando como parámetro su tamaño. En general la arena es aquella cuyo diámetro es inferior a 5 mm., mientras que la grava es aquella superior a los 5 mm.

El aire, no es más que la mezcla en contacto con el medio ambiente que puede quedar atrapado en el hormigón por efectos de manipuleo (mezclado, colocado, etc).

Hoy en día se considera al hormigón el rey universal de la construcción por sus indiscutibles ventajas:

En primer lugar, es un material que permite conseguir piezas de cualquier forma por complicada que está sea, con la única limitación de la complejidad del molde y ello debido al carácter plástico que posee cuando se encuentra en estado fresco.

¹ Abanto Castillo, Flavio. "Tecnología del Concreto (Teoría y Problemas)", Editorial San Marcos, Perú, S/A

En segundo lugar, es un material con resistencias apreciables a compresión y aunque posea ciertas resistencias débiles a tracción, permite aumentarlas apreciablemente valiéndose del acero que se puede colocar en su interior, dando lugar a una homogeneidad que en conjunto es llamado hormigón armado.

En tercer lugar, presenta ventajas sobre otros materiales resistentes de proporcionar piezas de un gran monolitismo, incluso en los nudos, haciendo que pueda prescindirse de juntas o uniones que a veces son zonas débiles.

Pero no todo son ventajas en el hormigón, pues a este material se le puede poner serios inconvenientes. Es un material pesado con una relación peso/resistencia elevada; comparando su resistencia a la tracción con la compresión se observa una fuerte descompensación lo que habla muy mal de su isotropía; presenta cierta inestabilidad de volumen frente a acciones térmicas, hidráulicas o mecánicas que pueden figurarlo, eliminando así una de sus principales características: su monolitismo; por otra parte, el hormigón es sensible a determinados agentes agresivos del tipo físico y químico, algunos pueden llevarlo a la ruina en un tiempo relativamente corto.

De todas formas, los inconvenientes que presenta el hormigón no responden a valores fijos ya que muchos de ellos pueden reducirse de tal forma hasta llegar a anularse dependiendo mucho de la elección que se haya hecho de los materiales componentes, la calidad del proyecto mismo, de su ejecución, puesta en obra, consolidación y curado. Las facetas negativas que puede presentar un hormigón pueden eliminarse si se posee un amplio conocimiento de sus problemas o desventajas y de las posibilidades que nos ofrecen los nuevos materiales y tecnologías.

2.1.1. Etimología.

El término hormigón procede de formicō palabra latina que alude a la cualidad "moldeable" o de dar "forma".

El término concreto también es originario del latín concretus, que significa "crecer unidos" o "unir". Su uso en español se transmite por vía de la cultura anglosajona, como anglicismo, siendo la voz inglesa concrete.

2.1.2. Recuento histórico.

El uso de materiales cementantes se remonta a tiempos muy antiguos. El concreto más viejo que se conoce data aproximadamente del año 6500 A.C. y descubierto durante excavaciones en los bancos del río Danubio, en Yugoslavia; fue usado para hacer los pisos de las chozas en una villa de cazadores y pescadores; consistía en una mezcla de cal roja, arena, piedra y agua, que era colocada y compactada para formar el piso.

Hace 5.000 años aparecen en el norte de Chile las primeras obras de piedra unidas por un conglomerante hidráulico procedente de la calcinación de algas.

Los antiguos egipcios (1900 A.C.), utilizaron yeso calcinado como material cementante y con ello construyeron la mayor parte de sus monumentos y edificaciones.

Los griegos (500 A.C.), usaron un mortero de cal y arena para cubrir muros. Basados en esto, los romanos copiaron y desarrollaron la fabricación de concreto, y fue así como ellos extrajeron una ceniza volcánica de una fuente cerca a Pozzuoli (300 A.C.). Este material que lo confundieron con arena, mezclado con cal y agua, formó un aglomerante mucho más fuerte que cualquier otra cosa. Este producto fue denominado Cemento Puzolánico y con él se construyeron obras como, el teatro de Pommpeii (75 A.C.), el Circo Romano, el Panteón, el Coliseo, etc. que en la actualidad se exhiben.

Debido a los exagerados espesores que resultaban de utilizar este material como componente único en muros alcanzaban hasta 8 metros, los romanos intentaron reforzar el concreto con varillas de bronce, pero no tuvieron éxito. Buscaron entonces piedras menos pesadas (rocas volcánicas porosas), creándose así el hormigón liviano y lo usaron por un periodo cercano a los 800 años, durante los cuales lo desarrollaron

desde un simple material estructural hasta la construcción de muros, pisos, mosaicos, puentes, murallas, esculturas, etc.

Con la caída del imperio Romano todos los conocimientos ganados en el uso del concreto desaparecieron casi completamente, pero luego fueron reintroducidos a Gran Bretaña por los normandos los cuales diseñaron y construyeron la primera mezcladora de la historia (700 D.C.). En ella utilizaban caliza como agregado y cal calcinada como aglomerante.

El concreto fue ampliamente utilizado en cimentaciones, castillos, iglesias, torres, puentes, etc., de estas obras, aun muchas subsisten.

Durante los periodos medieval y renacentista, aparte de las fundaciones y de pisos ocasionales, el concreto fue muy poco usado y su interés no se revivió sino hasta después de mediados del siglo XVIII (1750) cuando el señor William Champion construyó una gran mansión cerca de Bristol y erigió una estatua gigante de Neptuno en medio de un lago, fabricado con un cemento basado en cal y mezclado con cobre y escorias, dicha estatua aún sobrevive.

En 1756 un ingeniero de Leeds, Jhon Smeaton, fue comisionado para construir un faro en Eddystone, Inglaterra. (Anteriormente habían construido dos de madera, uno se quemó y el otro lo arrasó un vendaval). Smeaton pensó construirlo con bloques de piedra, pero el problema que tenía era cómo pegarlas, entonces decidió investigar las propiedades de los morteros probando las diferentes clases de todo el país y como resultado encontró que el mejor cemento que podía soportar el azote casi continuo del agua era la cal hidratada (resistente a la acción del agua), la que solo se podía obtener de una caliza que tuviera un alto contenido de arcilla. Con esto Smeaton fabricó el primer cemento de calidad desde la caída del imperio Romano.

James Parker, un vicario de Northfleet, calcinó por accidente unas rocas y en su inesperado experimento desarrolló un cemento que patentó en 1796 bajo el nombre de “Cemento Romano”. Parker le dio el nombre de “Romano” porque pensó que había descubierto como hacían el cemento los antiguos romanos.

Joseph Aspdin. Un ladrillero de Leeds, experimentó y encontró que calcinando en un horno una mezcla de piedra caliza con arcilla, moliendo y pulverizando este producto, se obtenía un aglomerante, el cual patentó en 1824 con el nombre de “Cemento Portland”. El nombre de portland se le dio por el parecido de color que adquiere después de endurecido con la piedra natural de la localidad de la iglesia de Portland.

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

A comienzos del presente siglo es cuando se desarrolla un rápido crecimiento de esta industria, reflejando así un avance tecnológico. El uso de la relación agua/cemento como medio para estimar la resistencia (reconocida cerca de 1918) y el impresionante aumento de la durabilidad con la inclusión de aire (introducido a principios de la década de 1940), marcaron dos significativos avances en la tecnología del concreto con base en ellos, se ha expandido la investigación exhaustiva y el desarrollo de muchas áreas incluyendo el uso de aditivos.

2.1.3. Clasificación del hormigón.

El hormigón se puede clasificar desde varios puntos de vista, siendo los más comunes: por consistencia, por resistencia y por densidad o peso unitario; cada uno de ellos se debe a un uso específico y/o aplicación particular.

2.1.3.1. Por consistencia.

La consistencia es una medida indirecta de la trabajabilidad de una mezcla de hormigón y se mide por medio de un ensayo de asentamiento. De acuerdo con esto, el hormigón se puede clasificar por su trabajabilidad tal como lo muestra la tabla 2.1. Este tipo de clasificación tiene por uso específico o aplicación particular, la puesta en obra del hormigón.

Para la adecuada colocación y compactación del hormigón en los encofrados, se requiere que éste tenga una consistencia apropiada; mayor fluidez en hormigones se

logra con la incorporación de aditivos y/o el incremento del agua. Un factor adverso a la resistencia del hormigón es la mayor cantidad de agua, en razón de que la relación agua/cemento es inversamente proporcional a la resistencia unitaria del hormigón. Por esta causa la fluidez no deberá ser mayor que la indispensable.

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

Tabla 2.1 Clasificación del hormigón por su consistencia

FUENTE: Tablas de dosificación ACI-211

2.1.3.2. 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.

Aunque las resistencias deberían 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 en los resultados. De acuerdo con lo anterior en la mayoría de los países del mundo se mide la resistencia por medio de morteros hechos con materiales específicos y en condiciones muy controladas. Las pruebas de resistencia que existen son: a compresión, tensión y flexión, siendo la primera la más importante, puesto que las restantes tienen un valor muy pequeño relativo al de compresión.²

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

Normal: Aquel cuya resistencia se encuentra entre 140 kg/cm^2 (2000 psi) y 350 kg/cm^2 (5000 psi).

Alta resistencia: Aquel cuya resistencia se encuentra entre 350 kg/cm^2 (5000 psi) y 1000 kg/cm^2 (14000 psi).

Ultra Alta resistencia: Aquel cuya resistencia es superior a 1000 kg/cm^2 (14000 psi).

2.1.3.3. Por peso unitario (peso por unidad de volumen)

Hormigón ligero: Aquel cuyo peso unitario es menor que 2000 Kg/m^3 .

Hormigón de peso normal: Aquel cuyo peso unitario está entre 2000 kg/m^3 y 2600 kg/m^3 .

Hormigón de peso pesado: Aquel cuyo peso unitario es mayor que 2600 kg/m^3 .³

² (UAJMS, "Manual del laboratorio del hormigón", Editorial "Universitario", Tarija – Bolivia 1991).

³ Vitervo O'Reilly

2.1.4. Contradicción de clasificación.

No siempre un hormigón puede ser clasificado por una sola característica, lo más probable es que pertenezca a dos o más grupos, incluso desde el preparado de la mezcla. Sea el caso de la consistencia; si bien está ligada a la cantidad de agua requerida por el tipo de estructura y colocación en obra, este parámetro está íntimamente comprometido con la relación agua/cemento y cuya incidencia es la resistencia, es decir estamos involucrando a dos tipos de clasificación para un mismo elemento.

Es precisamente lo que se pretende realizar en el presente estudio de investigación, donde un tipo de clasificación será por resistencia y el segundo tipo por densidad o peso unitario. Dentro del espectro, nos avocaremos a estudiar los **hormigones normales** en cuanto a la clasificación por resistencia y **hormigones ligeros**, en cuanto a la clasificación por densidad:

- a) *El hormigón de resistencia normal*, corresponde a valores de resistencia comprendidos entre 140 y 350 kg/m², la llamada "Resistencia", se refiere en líneas generales, a la tensión alcanzada al momento de romper los pastones de prueba (probetas cilíndricas) en el laboratorio por efecto de la compresión (método destructivo), la resistencia como tal, tiene su denominación simplificada, la cual clasifica a los hormigones de resistencia normal por "clase" y la misma se expresa con la letra H y un guión seguido del valor de su resistencia característica en M Pa. Por ejemplo, un hormigón de resistencia característica 210 kg/m² (21 M Pa), es llamado hormigón clase "H - 21" especificado en la Norma Boliviana CBH87 tabla 2.2. definiendo así al hormigón normal estructural como: hormigón en masa, que no contiene en su interior armadura y este es apto a resistir esfuerzos de compresión mayor o igual a 13 M Pa.⁴

⁴ Los tipos H12,5 a H25, se emplean, generalmente, en estructuras de edificación, y los restantes de la serie encuentran su principal aplicación en obras importantes de ingeniería y en prefabricación

Identificación del "hormigón de resistencia normal" por Clase					
Clase	Elemento	Uso específico	Resistencia característica mínima ($f_c'k$) [kg/cm ²]	Resistencia característica media ($f_c'k$) [kg/cm ²]	Resistencia característica máxima ($f_c'k$) [kg/cm ²]
H-8	Limpieza, Nivelación	Relleno	80	110	120
H-13	Estructural	Vigas Columnas Losas Cimientos	130	140	170
H-17	Estructural		170	190	210
H-21	Estructural	Vigas Columnas Losas Cimientos Zapatas	210	240	250
H-25	Estructural	Pavimento Rígido	250	280	300
H-30	Estructural	Pavimento Rígido	300	350	380
H-38	Estructural	Puentes	380	450	470
H-47	Estructural	Puentes	470	480	-

Tabla 2.2 Identificación del hormigón por clase

FUENTE: Elaboración propia, basado de Geofredo C. Renison

El hormigón de resistencia normal (H-13 – H25) tiene amplia utilización en elementos estructurales que no requieran ningún tipo de característica especial de transporte, manejo y colocación como:

- Cimentaciones poco profundas
- Vigas y columnas de estructuras convencionales
- Placas de entre pisos
- Bordillos
- Andenes
- Dinteles

b) *El hormigón ligero*, Por sus características y versatilidad, tiene un sin fin de aplicaciones. Desde hace décadas, se han mejorado las características de ellos de acuerdo a las propiedades que se deseen obtener, con técnicas como el adicionar ciertos materiales, aplicar procesos de transformación, o incluso omitir agregados en la mezcla. Los hormigones ligeros han tenido un desarrollo notable a partir de las ventajas que ofrecen: baja densidad y aislamiento térmico.

Por definición en cuanto a sus características físicas, un concreto ligero es aquel que posee una densidad no mayor de 2000 kg/m^3 . Tal precisión tuvo que ser revisada debido a la introducción en la construcción de elementos estructurales con agregados de tipo ligero, con lo que se obtienen concretos con densidades alrededor de 1840 kg/m^3 ; pero aun así, estos prácticamente son más ligeros que el concreto de uso común que pesa entre 2400, 2600 e incluso hasta 2800 kg/m^3 .⁵

Según Short y Kinniburgh (1967), para formar un hormigón ligero, se requiere incluir aire en su estructura, para lo cual se pueden usar los siguientes procedimientos:

- No agregar las partículas finas o granos a la mezcla común.
- Cambiar el uso de grava o piedra triturada por agregados con estructura porosa los cuales incorporan aire en la mezcla.
- Provocar la generación de burbujas de aire en la lechada de cemento, de modo que con el fraguado queden atrapadas y se forme una estructura porosa.

Por medio de los procesos anteriores, se obtienen tres tipos de concreto ligero:

Concretos sin finos a base de: Gravas, piedra triturada, escoria gruesa de hulla, cenizas sinterizadas de combustibles en polvo, arcillas o esquistos expandidos, pizarras expandidas, escorias espumosas.

⁵ CBH 87

Concretos con agregados de peso ligero a base de: escoria de hulla, escoria espumosa, arcilla expandida, esquistos expandidos, pizarras expandidas, cenizas sinterizadas de combustibles en polvo, vermiculita exfoliada, perlita expandida, pómez, agregados orgánicos.

Concreto aireado, por medio de: aireación química, por el método del polvo de aluminio o por el método del peróxido de hidrógeno y cloruro de cal; mezclas espumosas, con la incorporación de espuma preformada o espuma producida por la inclusión de aire.

En la tabla 2.3. se muestran las propiedades de diferentes tipos de hormigón ligero:

Tipo de concreto ligero	Agregado	Densidad del agregado kg/m ³	Densidad del concreto kg/m ³	Resistencia a la compresión a los 28 días kg/cm ²
Concreto aireado	-	-	400-800	14-49
Concreto ligero parcialmente compactado	Vermiculita y perlita expandidas	64 -240	400-1120	
	Pómez	480-880	720-1120	14-39
	Escoria espumosa	480-960	960-1520	14-56
	Cenizas sinterizadas de combustibles en polvo	640-960	1120-1280	28-70
	Arcillas y esquistos expandidos	560-1040	960-1200	56-84
	Escoria de hulla	720-1040	1040-1520	21-70
Concreto sin finos	Agregado natural	1360-1600	1600-1920	42-140
	Agregado ligero	480-1040	880-1200	28-70
Concreto para estructuras con agregados ligeros	Escoria espumosa	480-960	1680-2080	105-422
	Cenizas sinterizadas de combustibles en polvo	640-960	1360-1760	140-422
	Arcillas y esquistos expandidos	560-1040	1360-1840	140-422

Tabla 2.3 Propiedades características de los diferentes tipos de concretos ligeros

FUENTE: Elaboración propia, basado en Geofredo C. Renison

2.2. El papel maché.

El papel maché es una técnica que reutiliza papel de desperdicio como materia prima para la elaboración de objetos artesanales y tradicionales, hoy en día es una técnica conocida a nivel mundial y testigo de las diferentes culturas existentes en el planeta.

Al ser una técnica artesanal no tiene restricción alguna a las aplicaciones que nuestra imaginación nos permita llegar, siendo este material una simple mezcla de agua, papel reducido a pulpa y pegamento celulósico.

Por su fácil elaboración es una técnica que se la puede realizar desde la comodidad del hogar y de forma manual, de manera tal que hasta un niño se convierte en un artesano, ya sea desde obras de arte, hasta cosas prácticas de uso cotidiano, su fantástica ductilidad, permite acceder a los más variados resultados, desde piezas de aspecto rústico, hasta piezas de fina terminación. Se logran efectos piedra, arcilla, metal, mármol, madera, cerámica, etc.

Además esta técnica permite el uso de dos disciplinas del arte: el modelado y la pintura, que pueden alcanzar en el papel maché, altos niveles de calidad.

Por ser esta técnica una de las que más contribuyen con el reciclaje, es convertida hoy en día en la preferida de las escuelas que motivan la preservación del medio ambiente, por la preocupante situación del planeta (*que en cuestiones generales debería ser tarea y preocupación de todos los habitantes del planeta*).

El papel maché ha sido considerado por muchos investigadores y ecologistas, materia prima para la construcción de muebles y adornos, imitando al hormigón e incluso casas y elementos estructurales, sea el caso del ejemplo mencionado en el capítulo anterior que hace referencia al domo de la sala de lectura en la biblioteca Británica, con un techo de paneles, hechos de papel maché construido en 1855, bajo el principio de material compuesto, que en ciencia reciben ese nombre, todos los materiales que se forman por la unión de dos o más materiales, para conseguir la combinación de sus propiedades, que no es posible lograr por separado.

2.2.1. Etimología.

La etimología de papel maché proviene de la lengua francesa, los franceses lo llamaron "papier maché": (**Papier** – Papel); (**Maché** – Machacado, picado). Obteniendo así una correcta traducción papel picado y/o papel machacado, en Italia la técnica también adquirió su nombre, lo bautizaron con el nombre de "carta pesta", es con estos nombres, que los conocemos en la actualidad. En realidad ambas expresiones son sinónimas, sólo que tienen su origen en distintos países, pero en el mundo entero es llamado papel maché, porque la técnica alcanzó mayor impacto en Francia, en el período de la revolución industrial.

2.2.2. Recuento histórico.

El papel maché nace en el proceso mismo de fabricación del papel, es por tanto de suma importancia conocer el descubrimiento del papel y su evolución.

El papel se comienza a usar en China en el siglo II DC, cuando se logra hacer pulpa de madera y todos sus derivados, entre ellos el "**Papel Maché**".

En la guerra con los persas en el siglo VII, éstos se apropian de estas técnicas, que recorren la costa norte de África y de allí en el siglo X pasan a Europa, donde se popularizan, especialmente en Inglaterra, Alemania, Francia e Italia.

El arte de trabajar la pasta de papel se desarrolló en Persia y en India. Con la pasta de papel se hacían objetos útiles, como bandejas, juguetes, etc. Muchos de estos objetos se conservan todavía.

Esta técnica se introdujo en Europa gracias a los comerciantes venecianos. Durante el siglo XVII, donde surgió una autentica industria de cajas de papel. Estas cajas fueron las famosas "cajitas de rapé".

La técnica de esta época era demasiado lenta y costosa. El papel rasgado se ablandaba al calor, se remojaba en agua y luego se moldeaba en formas de madera y se saturaba de aceite de linaza. Se añadían capas de pasta, mezclada con arcilla roja, con hollín y con aceite. Después del secado, el objeto se pulía y laqueaba.

En 1722 el escocés Henry Clay, obtuvo una patente para la fabricación en pasta de papel, de muebles, puertas, lámparas, etc.



Figura 2.1 Lámpara ESCOCESA 1729

FUENTE: Walter Costas & Rubén Romero (ARTE, OBJETO Y CONTEXTO)

A mediados del siglo XIX, el papel maché se utilizó mucho en Inglaterra y en Francia. La idea de vaciar la pasta de papel con pegamento en moldes es una idea inglesa y data más o menos de 1820. Joshua Bettridge de Birmingham fue el más famoso fabricante de muebles en papel maché, exportó sus muebles al mundo entero. En la misma época, en Francia, Pierre Adt abre una fábrica. Se especializa en la fabricación de objetos de arte para la mesa (cestas para el pan, bandejas, cajitas, etc.).

Los objetos y muebles de papel maché que provienen de esta época, son raros de hallar en el mercado de las antigüedades y actualmente son obras calificadas como desconocidas. Sólo los aprecian los iniciados, la mayoría de ellos coleccionistas.

En algunas regiones de los Estados Unidos, la pasta de papel fue hasta 1900 objeto de un artesanado familiar.

Ahora la pasta de papel tiene un sitio relevante en el arte y está al alcance de cualquier persona que tenga la inquietud de crear algún objeto con sus manos.

Aunque muy simplificadas las técnicas modernas requieren paciencia. La pasta de papel puede adaptarse a las formas más caprichosas y más sorprendentes. Con un

poco de habilidad, se pueden modelar fantásticas estatuas, como las que fabrican los artistas mexicanos o diminutas figuras al estilo de los japoneses.



Figura 2.2 Mini estatuas moldeadas a mano – arte Japonés

FUENTE: Walter Costas & Rubén Romero (ARTE, OBJETO Y CONTEXTO)

En todos los continentes se conoce el uso tradicional del papel maché en numerosas variedades: títeres, muñecas, máscaras, juguetes, decoración, etc. porque es un material barato, versátil y de fácil obtención y procesamiento; pero no siempre fue así, por siglos el papel fue muy valioso y su procesamiento para convertirlo en papel maché, llevaba mucho tiempo y era muy laborioso.

Las francesas solían comprar papel de desecho a editores y encuadernadores y lo procesaban machacándolo y hasta a veces masticándolo. De allí su nombre: papier-mache. Eso fue antes de que se inventaran máquinas que pudieran moler el papel. Debemos remontarnos al invento del papel en sí, ocurrió en China, en el siglo II D.C. No fue hasta el siglo X, que el papel reemplazó al papiro, usado desde el antiguo Egipto, tomando su nombre.

En Francia en el siglo XVI, el papel maché se utilizaba para cabezas de muñecas. Pero recién en el siglo XVII los artesanos Franceses (los primeros en Europa), se interesaron en usar el papel maché en aplicaciones comerciales. A partir de 1670, el interés se extendió a Inglaterra, este creciente interés tuvo que ver con la popularidad de los objetos orientales: japoneses y chinos. Recién a mediados del siglo XVIII, este

nuevo material comienza a ser usado a gran escala. Así, los muebles y objetos de arte en papel maché hicieron su entrada en Francia. Serían muy buscadas, con el tiempo, las famosas cajas francesas de rapé. Pedro el Grande y Catalina de Rusia fueron apasionados coleccionistas. Ellos establecieron fábricas de papel maché en su imperio. El papel maché fue también popular como imitación de trabajos de estuco y ornamentos de yeso. Los ingleses importaban grandes cantidades de trabajos de laqueado, de China y Japón, que inspiraron a los manufactureros a producir papel maché laqueado.



Figura 2.3 Ornamento de papel maché – cultura China

FUENTE: Walter Costas & Rubén Romero (ARTE, OBJETO Y CONTEXTO)

El laqueado japonés se impuso con furor. Es increíble que todo era hecho y laqueado en papel maché, barnizado, dorado, incrustado de piedras preciosas, marmolados, o pintados con flores, helechos, animales, etc. Desde escenarios, techos para coches, asientos, cabinas de barcos de lujo, hasta puertas, escritorios, capiteles, bibliotecas, mesas y bandejas de té. De acuerdo a la Chambers's Enciclopedia de 1753, se usó también en marcos para retratos, y trabajos a la hoja, aplicados sobre alacenas y sillas.

A comienzos del siglo XVII, los teatros de títeres por artistas errantes, eran muy populares. Pensemos en la Comedia del Arte, en Italia, "Pulcinella", en Francia Polichinelle y "Guignol", en Rusia "Petroesjka", en los Países Bajos "Jan Klaassen".

Mundialmente famosos fueron los fabricantes de títeres de Nuerenberg. Los fabricantes de juguetes comenzaron la producción en masa de cabezas de muñeca prensadas, de acuerdo a un proceso de moldeado.



Figura 2.4 Vajillas de papel maché – laqueado Japonés

FUENTE: Walter Costas & Rubén Romero (ARTE, OBJETO Y CONTEXTO)

Durante el siglo XIX, el papel maché era muy popular en Europa, era la edad de oro de la producción de muebles en Inglaterra. En Rusia la fabricación de papel maché no llegó a su apogeo hasta 1830, fueron típicos los laqueados y pinturas con motivos folklóricos de muñecas, cajas de rapé, cigarreras, cajas, estuches de lapiceras, bandejas de té e infinidad de utensilios.

Un maravilloso ejemplo de la versatilidad del papel maché es un bote que Isaac Weld construyó en 1800, en el pueblo Irlandés de Cork y que navegó el Lago Killarny.

En 1833 Charles F. Bielefeld fabricó 10 casas prefabricadas para agricultores y una villa con 12 habitaciones para un cliente en Australia.

El físico francés Louis Auzoux comenzó a experimentar con modelos para anatomía. En 1922, lanzó la primera serie de maquetas técnicamente perfectas y con gran detalle de pintura, en papel maché. En 1830 introdujo el "Hombre de 6 pies de altura", hecho con 129 piezas diferentes y 1115 detalles numerados.

La obra maestra de un relojero de Dresden, Alemania fue un reloj de papel maché, hecho en 1833. Lo más espectacular fue también en Alemania, un barrio de casas prefabricadas y en Norway, una iglesia. Las casas alemanas a prueba de lluvia y la iglesia de Norway han durado más de 40 años.

Es muy famoso el parque "Tarrot Garden" de la artista Nikki De Saint Phalle.

Ella comenzó a trabajar en este proyecto en 1979, pero no fue hasta 1993, que abrió sus puertas al público.

Siempre se inventaron nuevas técnicas, permitiendo las más refinadas aplicaciones. Hasta 1820, sólo bronce, plata, hojas de oro y oro en polvo se utilizaban como materiales en la decoración, más tarde perlas incrustadas y luego el marmolado y ondeado se pusieron de moda.

Gradualmente, el mercado comenzó a saturarse y los fabricantes comenzaron a hacer productos de inferior calidad. El material se convirtió en un producto barato y masivo, las decoraciones hechas a mano fueron reemplazadas por decoraciones impresas mecánicamente mediante estenciles. En la "Gran Exhibición" en 1851, la decadencia en el diseño y la construcción fueron evidentes.

Numerosos intentos se hicieron para volver a los estándares de alta calidad, pero sin resultado. La invención del electro-plateado a mediados del siglo XIX, fue la sentencia de muerte para la industria del papel maché. Pero para muchos creativos, ya sean aficionados o profesionales, permitió plasmar sus fantasías. Y no será diferente en el siglo XXI. No fue hasta el siglo XIX que el papel maché, se impuso en los Estados Unidos de América. Fueron firmas inglesas, las que exportaron objetos de papel maché hacia América. George Washington, el primer presidente de los Estados Unidos, encargó papel maché a Londres, para el techo de su casa de Virginia.

Incluso en espacios abiertos, las estatuas de papel maché prosperaron como alternativas económicas, a las esculturas de mármol.

A mediados del siglo XIX, grandes fábricas de papel maché se establecieron en Connecticut: Litchfield y Wadham.

Inmigrantes ingleses de Birmingham introdujeron los conocimientos sobre las técnicas japonesas de laqueado e incrustación de madreperlas.

La firma Litchfield fue especialmente famosa por la producción de estuches para relojes decorados en oro y madreperlas.

En Europa se produjo un amplio surtido de objetos, como escritorios, sillas, barandas de escalera, pantallas, posa-cartas, tarjeteros, costureros, botones, tableros de ajedrez y estuches para cosméticos.

En México muchas de las aplicaciones del papel maché, tuvieron que ver con la religión y las supersticiones. Durante la semana de pascua se hacen muñecos de Judas.

En navidad, los niños juegan con piñatas decoradas con estrellas, peces, flores, pequeñas botas, etc., llenas de golosinas, frutas, nueces y juguetes. Al final de la fiesta, se rompen las piñatas y se comen los dulces.

En el "Día de los Muertos", los mexicanos toman a la muerte con humor. Llevan esqueletos, calaveras y ataúdes de brillantes colores, para asustar a los demás.

La tradición de las máscaras en México, es anterior a la conquista española y se conecta con los rituales pre-cristianos. En honor a los dioses, los sacerdotes como cazadores, se ponen máscaras de oro y piedras preciosas. Estas piezas, por supuesto, fueron apropiadas por los conquistadores. Actualmente las máscaras se hacen de papel maché.

A comienzos del siglo XV, el papel maché ya se utilizaba en Kashmir, para la decoración de estuches de lapiceras, pantallas de lámparas, teteras, tazas, cuencos, floreros, cajas, pendientes, brazaletes y joyeros. También para decoración de paredes

y cielorrasos. Actualmente, es la comunidad de Muslim, la que comercializa papel maché. Aunque el trabajo con el papel maché, está oficialmente reservado a los hombres, en la práctica son las mujeres quienes hacen la parte pesada, como el vaciado de pulpa en los moldes.

Cuando el siglo XVII comenzó a despuntar, creció el interés en Japón por los juguetes folklóricos para niños. De hecho estos objetos eran para fines rituales: Luego de visitar el templo, los adultos llevaban varios objetos pequeños, para proteger a sus niños de los malos espíritus. Estas miniaturas, habitualmente representaban a animales: pájaros, perros, tigres, monos y peces.

En las islas de Okinawa, los niños ricos, se han divertido por generaciones, con juguetes de papel maché. Los granjeros pobres y los cultivadores de arroz, usaban muñecos de madera, barro y papel maché como ofrenda, para pedir protección a los dioses para sus cosechas.

Hoy, a través del tiempo y a lo ancho de todos los continentes, podemos ver que el papel maché, fue y es utilizado por ricos y pobres, indistintamente. Reyes y emperadores se pavoneaban en carruajes, vivían en lujosos palacios y se rodeaban de elegantes muebles y objetos, todos hechos de papel maché.⁶

2.2.3. Elaboración del papel maché.

Tras al habernos familiarizado con el termino de “papel maché” y en qué consiste la técnica, es momento de conocer su composición y el proceso de elaboración del mismo, para definir sus proporciones, en otras palabras al ser insertado a ingeniería pasará de “receta” a “dosificación” de papel maché.

Composición: El papel maché está compuesto por una lista de materiales que no generan reacción química ante algún agente químico, pese a ello el papel maché llega a tener entre sus componentes FIBRAS + CARGAS + ADITIVOS.

- a) *La fibra*, Es un material vegetal que desde sus inicios se extraía de plantas como el algodón, la cebada, el lino, etc. A partir del siglo 19, se comenzó a

⁶ Walter Costas & Rubén Romero (ARTE, OBJETO Y CONTEXTO)

usar la madera que es el material de celulosa de mayor importancia en la actualidad. En consecuencia, cualquier compuesto que contenga celulosa en un porcentaje adecuado, puede ser útil para la fabricación del papel. Existen dos tipos de fibras: la fibra larga y la fibra corta.

- b) *Las Cargas*, Las cargas son elementos minerales, tales como “Talco, Calcio y Caolín”, los que quedan retenidos entre las fibras. Al tener una mayor densidad que la celulosa, las cargas varían el peso específico del papel, por lo tanto su porcentaje debe ser controlado según el papel que se desea fabricar.

Ejemplo:

Papel Voluminoso = Menos carga

- c) *Los aditivos*, Además de las fibras y de las cargas, el papel contiene aditivos, algunos de ellos específicos, para conseguir características determinadas, sea el caso de barnices, pinturas o acrílicos que tengan que estar involucrados con la terminación o acabado que se desee obtener.

Materiales:

El método de fabricación consiste en tomar materiales que podemos encontrar fácilmente en depósitos de desechos de papelería y en la comodidad de nuestro hogar siendo estos:

- Papel de periódico (periódico)
- Cola blanca o engrudo
- Agua
- Yeso o harina de cocina

Instrucciones:

- a) Cortar el papel de periódico en trozos pequeños.
- b) Dejar los trozos de papel así cortados en un poco de agua hasta que este se encuentre completamente saturado, esto puede demorar aproximadamente 2

horas. Hay que recordar que más blanca será la pasta cuanto menos tinta tenga el papel.

- c) Triturar con un molinillo manual o eléctrico para que el papel se reduzca aún más. También es posible usar una licuadora.
- d) Eliminar el exceso de agua utilizando un colador pero sin dejar la pasta demasiado seca. Ponerla luego en un recipiente.
- e) Añadir un poco del pegamento escogido (cola blanca o engrudo), en cantidad suficiente como para obtener una mezcla homogénea. Si no se va a usar toda la pasta y se pretende guardar parte de ella por unos días, es mejor dejarla aparte y no echar la cola en este momento.
- f) Mezclar amasando con las manos o revolviendo con la cuchara de palo. Agregar la tiza en polvo (yeso) o harina de cocina, esto para otorgarle a la mezcla consistencia de masa o mayor cuerpo, puede agregarse una cuchara sopera de aceite de linaza si se desea.

La pasta se puede guardar tapada o en una bolsa plástica por varios días en la nevera, siempre que no se le haya incorporado el pegamento. Es muy apropiada para rellenar el interior de un molde escogido (por ejemplo un plato o taza) o uno construido especialmente para este propósito (en arcilla, yeso o tela metálica) y también sirve para realizar pequeños objetos macizos a mano libre.

El resultado obtenido con papel maché es generalmente de aspecto tosco y áspero al tacto, por lo que es recomendable pulirlo cuidadosamente con papel de lija para maderas una vez que esté bien seco.

Para pintar los objetos de papel maché es posible usar prácticamente cualquier tipo de pintura, pero para corregir posibles imperfecciones o errores y abaratar costos, es recomendable usar pintura al agua (tipo témpera) y luego acabar con un barniz ligero o una capa delgada de cola vinílica, la que al secar dejará el objeto brillante y luminoso.

Para el caso de floreros, maceteros u otros objetos que pueden estar en contacto con humedad, es necesario aplicar una capa gruesa de impermeabilizante en aerosol en la parte que estará en contacto directo con el agua.

Cuando el objeto ya está seco es posible decorarlo con trozos de papel maché en forma de hojas, flores, peces, formas abstractas, etc.⁷

2.3. Consideraciones teóricas sobre los materiales compuestos.

Según la definición de las personas dedicadas al estudio de materiales compuestos, los definen como “la combinación de dos o más materiales para obtener un material nuevo con propiedades específicas”, uno de los ejemplos más populares es el hormigón.

(Vinson y Sierakowski, 1987, pag.1). Un material compuesto es el resultante de dos o más materiales con propiedades que difieren a las de los elementos que se usaron para hacerlo. Los materiales compuestos por formar una extensa diversidad en las combinaciones que se pueden realizar, son de naturaleza variada.

Hillig (*apud* Brostow, 1981, pag. 305), sugiere hacer una división entre éstos según el uso que se les da, y los separa en estructurales y funcionales; los estructurales son usados por sus propiedades mecánicas, y los funcionales de acuerdo a sus características especiales para desempeñar alguna tarea en particular. Por las nuevas relaciones que se establecen entre los agregados al combinarse y la complejidad de las mismas, es un hecho que es más difícil predecir las propiedades que tendrá un material compuesto que uno puro.

(Brostow, 1981, p. 305). Un material compuesto no surge solamente de mezclar al azar componentes, si no que existe un diseño previo basado en suponer en principio las propiedades que el material tendrá, como resultado de las ventajas que ofrezca cada agregado. El uso que se le dé, está en relación de los componentes que constituyen al material, y las características que resulten de la combinación. El

⁷ *Papel Maché, Colección Tiempo Libre, Ed. Parramón y Papel Maché Creativo, Birgitta Jetzek-Berkenhaus, Ed. Ceac.*

método de elaboración tiene especial importancia, pues influye de manera determinante en las características que el material compuesto tendrá; es decir que ciertos componentes tratados bajo un método de producción, generarán propiedades en el material compuesto que serán diferentes a las propiedades de un material compuesto formado por los mismos constituyentes, pero hecho bajo otro método.

De acuerdo a lo planteado por Matthews *et al* (2000), existen tres criterios que se deben cumplir para que un material sea compuesto: Las proporciones de ambos constituyentes deben ser razonables, los constituyentes deben tener diferentes propiedades y estas deben ser diferentes a las propiedades del compuesto. El compuesto se produce por la mezcla deliberada (hecho a propósito) de los constituyentes. Es así que al hacer la mezcla de los componentes, el método de fabricación del material compuesto es importante desde la perspectiva de que en la manera en que sean combinados, pueden ocurrir fenómenos físicos y químicos que comprometan el resultado final en las características del material. Sea por métodos de presión, temperatura, extrusión, mezclado manual, etc. el simple hecho de agregar un componente antes que otro, o el de tratar mediante procesos físicos o químicos a uno de los agregados previo a la unión en el compuesto, derivará en distintas consecuencias.

Según Vinson y Sierakowsky (1987), conforme a la clasificación estructural de los materiales compuestos, existen tres niveles: Básico elemental, que son las moléculas individuales, células de cristales, etc. micro estructural, que son los cristales, fases, y compuestos y macro estructural, que son matrices, partículas, y fibras.

La clasificación de los tipos de compuestos está en función de la geometría que describen en su mayoría los refuerzos, sin importar la matriz en la cual están constituidos, o en la relación morfológica de la matriz con el refuerzo. Por otro lado Matthews *et al* (2000), consideran que en el nivel microscópico los materiales compuestos tienen dos fases químicamente distinguibles: la matriz y el refuerzo. La matriz por lo general puede ser de un material: cerámico, metálico.

2.4. Comportamiento mecánico de los materiales.

Entre los comportamientos mecánicos que se pueden presentar a un material se presta atención a la resistencia sometida a compresión, ya que el presente estudio de investigación se rige al alcance, mismo está delimitado a estudiar en cuanto a sus características mecánicas, la resistencia a compresión.

Los comportamientos mecánicos de un material, pueden ser estimados cuando se les aplica una fuerza, sean fuerzas internas y/o deformaciones que son causadas por tal influencia externa.

En teoría, las fuerzas transmitidas al interior de un elemento, son transferidas por medio de fibras, lo cual es comparable con los hilos de un cable. La fuerza transmitida es dividida para ser cargada entre las fibras del cuerpo. La fuerza total que es transmitida al interior y soportada por las fibras del cuerpo es igual a la suma de las fuerzas individuales soportadas por cada fibra, pero en el análisis mecánico de un cuerpo no existe el término de fuerza total si no de intensidad de la fuerza, lo que se conoce como esfuerzo o esfuerzo unitario. El esfuerzo unitario resulta de dividir la fuerza inducida entre la unidad de área sobre la que es aplicada.

Esta relación algebraicamente se representa como:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2.1)$$

Donde:

σ = Esfuerzo unitario, en lb/plg² o en N/m²,

P = Carga aplicada, en lb o en N,

A = Área sobre la cual actúa la carga, en plg² o en m².

El conocer tales intensidades, indica en qué medida un material se deformará y podrá soportar los esfuerzos ocasionados por fuerzas externas que se le apliquen. En la fórmula $\sigma = P/A$ se debe hacer notar que ésta se relaciona solo con esfuerzos de tensión y compresión, y más importante aún es que las cargas deben ser aplicadas en el centroide de la sección transversal del elemento y además deben ser coincidentes

con su eje. Si no están presentes las condiciones antes mencionadas en el análisis de un cuerpo, la fórmula no puede ser aplicada.

2.5. Características físicas de los materiales.

Entre los comportamientos físicos que se pueden presentar a un material se presta atención a la densidad o peso volumétrico, ya que el presente estudio de investigación se rige al alcance, mismo está delimitado a estudiar en cuanto a sus características físicas, la densidad o peso unitario del hormigón.

Los materiales poseen características inherentes a su naturaleza, sean puros o compuestos. Los materiales compuestos conjugan las características individuales de sus componentes para adquirir nuevas características que son resultantes de la relación entre los agregados.

Densidad. El volumen y el peso de un cuerpo son características básicas que definen en primer lugar su tamaño, y en segundo la manera en la cual la gravedad del planeta lo afecta. Esta propiedad es conocida también como masa volumétrica en normas internacionales como ASTM. La densidad (ρ) de un elemento es la magnitud que relaciona estas dos variables. La densidad de un cuerpo se puede definir como su masa Δm entre su volumen ΔV : $\rho = \Delta m / \Delta V$.

Si la densidad de un cuerpo es la misma en todos sus puntos, entonces su densidad será igual a su masa total dividida entre el volumen del cuerpo:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.1)$$

Donde:

ρ = Densidad, en lb/plg³, o kg/m³,

m = Masa, en lb, o kg,

V = Volumen, en plg³, o m³.

La densidad de un cuerpo o sustancia depende también de factores ambientales como la presión y temperatura. En líquidos y sólidos, la variación de la densidad es poca en

espacios de variación grandes de presión y temperatura, por lo que se puede considerar a la densidad como constante.⁸

2.6. Materias primas.

Como parte de la dilucidación de las partes que componen al fenómeno del objeto de estudio y unidad de análisis en cuestión, el tema de las materias primas que lo formarán es primordial. A continuación se tratan los puntos generales sobre las fibras de celulosa de las que se forma el papel maché, los agregados fino y grueso, el cemento y el agua.

2.6.1. Fibras de celulosa.

La celulosa es el más abundante de los compuestos naturales de carbono. Es producida como resultado de la fotosíntesis de las plantas. Constituye el principal componente de la pared celular de la madera, paja, pasto, fibras liberianas, y pelos de semillas. La celulosa se usa como componente del papel y cartón, dada su característica de forma fibrosa y por consiguiente una elevada resistencia a la tensión, y su alta insolubilidad en agua caliente y fría.

La celulosa es un carbohidrato, y por consiguiente tiene relación con los azúcares. Es un polisacárido, lo cual indica que en su molécula existen muchas unidades de azúcar.⁹

La estructura del papel, está compuesta básicamente por fibras en su mayoría, y por arcilla y pigmentos, además a su peso se le añade la humedad.

La madera utiliza las fuerzas de adhesión de polímeros intercelulares para mantener unidas las fibras que la constituyen, es en el proceso de fabricación de la pulpa, donde se rompe este enlace para obtenerla y separar los residuos fibrosos de los que no lo son.¹⁰

⁸ Resnick, Halliday, y Krane, 2001

⁹ Libby, 1967

¹⁰ .Marúm, 1989

La pulpa de celulosa posee características que no están relacionadas con el proceso de fabricación y son: propiedades químicas, como es el contenido de lignina y hemicelulosas, y las condiciones mismas de la celulosa en la fibra; y propiedades físicas como la resistencia a tensión y a la flexión, las cuales son determinadas por la geometría de las fibras, constituida por su longitud, diámetro y espesor de sus paredes. En el tema del papel, la resistencia que le es otorgada depende del largo de las fibras. La resistencia al rasgado del papel tiene una correlación lineal con la longitud de las fibras: más longitud, más resistencia. Así también, tal resistencia depende de la unión que se dé entre fibras, la cual aumenta al ser mayor la longitud de éstas, aunque eso sólo se da de forma ligera; tal es el caso de la resistencia a la tensión. Parece haber una contradicción en tal aspecto, pues en un papel dicha resistencia es mejorada cuando las fibras del papel son refinadas, pero eso implica que disminuya su longitud. La rigidez en el papel es también afectada por la longitud de sus fibras, pues al ser más cortas, esta cualidad aumenta y viceversa, en aquellos papeles donde se utilizan fibras más largas, donde la flexibilidad, además de la compresividad, son mayores. Se puede observar como las fibras en el papel actúan de la misma manera que en teoría funciona el refuerzo fibrilar en un material compuesto, debido a sus características morfológicas.

Un punto de consideración es el hecho de que las propiedades de la celulosa están determinadas por el método que se utilice para hacer la pulpa, puesto que al emplearse procedimientos que sean agresivos, las fibras pueden degradarse. En caso de ser utilizada la celulosa de papel y cartón para la elaboración de materiales compuestos, deben contemplarse las posibles repercusiones de usar sustancias químicas o procesos que puedan afectar de tal manera a las fibras y que el material no pueda alcanzar los requerimientos físicos y mecánicos requeridos⁶.

2.6.2. Cemento portland.

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

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

El cemento está compuesto por dos materias primas principales:

Materiales calizos y materiales arcillosos. Los primeros suministran cal y los segundos sílice y alúmina, además de estos materiales, el cemento contiene pequeñas cantidades de óxido de hierro, óxido de magnesio, álcalis y anhídrido sulfúrico.

El cemento se obtiene a partir de materias primas abundantes en la naturaleza, pero como es difícil encontrar las calizas con la cantidad precisa de arcilla, la industria recurre a la dosificación artificial de estos insumos en proporciones determinadas, utilizando para ello dos procesos, por vía seca y húmeda.

El proceso de fabricación propiamente dicho se inicia con la trituración. La materia prima viene de las canteras en trozos con tamaños que alcanzan los 50 centímetros y aún un metro, es reducida en su trituración en dos o tres etapas, según sus características y tamaño. Se efectúa entonces la pre mezcla, que habrá de resultar esté acorde con estrictas normas de calidad y tenga la composición adecuada.

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

COMPUESTO	FORMULA	ABREVIATURA
	QUIMICA	USADA
Silicato tricalcico	3CaOSiO_2	C3S
Silicato dicálcico	2CaOSi_2	C2S
Aluminato tricálcico	$2\text{CaOAl}_2\text{O}_3$	C3A
Ferro Aluminato de tetracálcico	$4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$	CA4F

Tabla 2.4 Estado de equilibrio químico del cemento

FUENTE: Tecnología del hormigón Vitervo O'Reilly

Estos componentes han sido llamados “Compuestos de Bouge”.

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

Los constituyentes C3S Y C2S forman del 70 al 80% del cemento portland, son más estables y los que más contribuyen a la resistencia del cemento.

Entre sus propiedades del cemento portland, en términos generales, cuando el cemento se encuentra en presencia de agua se produce una reacción química en la cual el cemento desarrolla sus propiedades aglutinantes. En otras palabras, en presencia de agua, los compuestos del cerramiento (C2S, C3S, C3A y C4 AF) se hidratan produciendo la pasta que con el paso del tiempo forma una masa y más tarde endurece dando origen a propiedades mecánicas útiles en aplicaciones estructurales.

2.6.3. Agregados pétreos.

Son productos granulares inertes, de la naturaleza orgánica procedentes de las rocas de ríos y canteras que son los principales proveedores de los materiales pétreos utilizados en la construcción, sobre todo de aquellos que intervienen como componentes en el hormigón.

Los agregados pétreos o áridos deben ser inertes y no modificar las características del hormigón, para lo cual no deben reaccionar químicamente con el cemento. Aun que no toman parte del fraguado y endurecimiento del hormigón, los áridos desempeñan un papel muy importante en las características de este material. En efecto,

aproximadamente el 80% del volumen del hormigón está ocupado por los áridos siendo el resto de la pasta el cemento que rellena los vacíos existentes entre ellos y crea una capa que envolviendo a los granos los mantiene unidos.

Estos se clasifican en dos grupos, “agregado grueso” y “agregado fino”, ambos pueden ser rodados y/o chancados de forma natural o con intervención mecánica.

Agregado grueso (Grava). Se define como agregado grueso al material pétreo superior a un diámetro de 4.75mm, proveniente de la disgregación natural o mecánica de las rocas y que cumple con los límites establecidos en la norma ASTM C33. La grava comúnmente llamada canto rodado, es el conjunto de pequeños fragmentos de piedra, procedentes de la disgregación, natural de las rocas, por acción del hielo y otros agentes atmosféricos, suelen encontrarse corrientemente en canteras y lechos de ríos depositados en forma natural.

Granulometría (Grava). El agregado grueso debe estar graduado dentro de los límites establecidos en la norma ASTM C33, donde la distribución del tamaño de partículas se determina por separación con una serie de mallas normalizadas, considerando el tamaño máximo del agregado según el requerimiento de dosificación¹¹, el límite que separa el agregado fino de los agregados gruesos queda retenido en el tamiz N°4 – 4.75mm y puede llegar a tener un diámetro hasta 4” – 100mm.

Tamaño máximo. Define por tamaño máximo al agregado que logra pasar el 100% de sus partículas a la malla superior y retiene cierta cantidad en la malla siguiente. El tamaño máximo de los agregados en el hormigón se fija por la exigencia de que pueda entrar fácilmente en los encofrados y entre las barras de la armadura. En ningún caso el tamaño máximo del agregado grueso debería ser mayor que un quinto, de la menor dimensión, entre encofrados, un tercio de la altura de las losas y/o tres cuartos del espacio libre entre barras o alambres individuales de refuerzo.¹²

¹¹ Requerimiento de granulometría de los agregados gruesos – ANEXO 4

¹² Tecnología del concreto, Ing Flavio Abanto Castillo (Lima – Perú)

Requerimiento de Uso.- El agregado grueso deberá estar conformado por partículas limpias, de perfil preferentemente angular o semi-angular, duras, compactas, resistentes y de textura preferentemente rugosa, las partículas deben estar libres de tierra, polvo, limo, humos, escamas, materia orgánica, sales o otras sustancias dañinas³.

Agregado fino (Arena). Se considera como agregado fino a la arena o piedra natural finamente triturada, de dimensiones reducidas que no supera los 9.5 mm de diámetro según las normas CBH87 y la ASTM. Las arenas provienen de la desintegración natural de las rocas; y que arrastrados por las corrientes aéreas o fluviales se acumulan en lugares determinados.

La arena es el agregado de mayor responsabilidad, a diferencia de la grava. El agua e incluso el cemento, puede decirse que no es posible hacer un buen hormigón sin una arena de buenas características. Las mejores arenas son las de río que tiene mayor resistencia y durabilidad. Las arenas que provienen de trituración son también excelentes, siempre que sea producto de rocas sanas y sin presencia de limos. Las arenas de procedencia caliza siempre resultan más absorbentes y requieren más cantidad de agua de amasado que las silíceas. La humedad de la arena tiene gran importancia en la dosificación de hormigones sobre todo cuando se dosifica en volumen.

Granulometría (Arena).- La granulometría es la distribución por tamaños de las partículas de arena. La distribución del tamaño de partículas se determina por separación con una serie de mallas normalizadas. Las mallas normalizadas usadas para el agregado fino son las siguientes:

MALLA	3/8"	N° 4	N° 8	N° 16	N°30	N°50	N°100
	9.50 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	600 <i>mm</i>	300 mm	150mm

Tabla 2.5 Limites de granulometría según el ASTM C33

FUENTE: ABANTO CASTILLO Flavio, "Tecnología del concreto", Editorial San Marcos, Perú, S/A

2.6.4. Agua.

El agua (del latín *aqua*) es una sustancia cuya molécula está formada por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno (H_2O). Es esencial para la supervivencia de todas las formas conocidas de vida. El término agua, generalmente, se refiere a la sustancia en su estado líquido, pero la misma puede hallarse en su forma sólida llamada hielo, y en forma gaseosa denominada vapor. El agua cubre el 71% de la superficie de la corteza terrestre. Se localiza principalmente en los océanos donde se concentra el 96,5% del agua total, los glaciares y casquetes polares poseen el 1,74%, los depósitos subterráneos (acuíferos), los permafrost y los glaciares continentales suponen el 1,72% y el restante 0,04% se reparte en orden decreciente entre lagos, humedad del suelo, atmósfera, embalses, ríos y seres vivos. El agua es un elemento común del sistema solar, hecho confirmado en descubrimientos recientes. Puede ser encontrada, principalmente, en forma de hielo; de hecho, es el material base de los cometas y el vapor que compone sus colas.

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

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

La fluidez de la pasta depende de la cantidad de agua de mezclado. Si se aumenta esta cantidad sin modificar el contenido de cemento, la parte de agua de hidratación del cemento permanece constante incrementándose así la parte de agua evaporable; cierta porción de esta queda atrapada en el interior del concreto y al producirse la evaporación se forma una serie de conductos capilares que se llena de aire generando

un concreto endurecido poroso, menos resistente y más permeable. Por esto la dosificación del agua de mezclado se debe hacer con un control muy estricto.

Las impurezas que puede haber disueltas en el agua o presentes en forma de suspensiones, tales como azúcar, ácidos, sales, materia vegetal, aceites, sulfatos, etc. pueden interferir con la hidratación del cemento retrasando así el tiempo de fraguado y reduciendo la resistencia del concreto.

Como estos efectos varían de manera acentuada con la marca y tipo de cemento usado, así como la riqueza de la mezcla (cantidad de cemento), es conveniente conocer las cantidades de impurezas presentes en el agua.

En general, se puede decir que cualquier agua natural que sea apta para el consumo humano (agua potable) y no tenga sabor u olores fuertes pueden ser usadas para la elaboración de concreto, sin que esto implique que el agua adecuada para la elaboración de concretos sea potable.

En el caso de que tengan aguas ácidas, su aceptación o rechazo están basados en el grado de alcalinidad o acidez que se mide por medio del PH (El valor de PH del agua natural es de 7; valores por encima de 7 indican la alcalinidad y aquellos por debajo de 7, acides). Aguas que contienen ácidos inorgánicos como ácidos sulfúricos y clorhídricos en concentraciones menores a 10000 ppm, no producen efectos adversos a la resistencia del concreto. Las aguas con un PH menor que 3 deben evitarse por su alto grado de acidez, considerándose buenas para la producción del concreto aquellas cuyo PH está entre 6 y 8.

Agua de Curado.- Es aquella que aporta la humedad necesaria durante las primeras edades de endurecimiento para compensar la pérdida de agua por la evaporación y permitir que siga produciendo la progresiva hidratación del cemento que va dando lugar al aumento de resistencias mecánicas, ya que en el proceso de hidratación la partícula de cemento no se hidrata totalmente sino que, a medida que entra en contacto con el agua, se va formando una película superficial quedando en el interior una porción sin reaccionar y por tanto inerte. Para que este núcleo reaccione es

necesario un abastecimiento después del proceso de fraguado y lograr así que el cemento desarrolle todo su potencial aglutinante. A dicho suministro de agua se denomina proceso de curado del concreto, y a la que se utiliza para tal fin, agua de curado.

Los requerimientos para el agua de curado son menos exigentes que aquellos usualmente utilizados para el agua de mezclado, principalmente porque el agua de curado está en contacto con el hormigón por un periodo relativamente corto. Tal agua puede contener más materia inorgánica y orgánica, anhídridos sulfúrico, ácido, cloruro, etc. que un agua aceptable para el mezclado. Por lo general, el agua que se considera buena para el mezclado también es buena para el curado, pero se debe tener cuidado con aquellas aguas que fluyen lentamente sobre el concreto y se evaporan rápidamente y que además contienen materia orgánica o ferrosa por que pueden causar manchas en las superficies del concreto producidas por la presencia de algún óxido.¹³

¹³ Vitervo O'Reily / Tecnología del hormigón

CAPITULO III

DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

3. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

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. Primero se explica en resumen lo que consistió esta etapa, se trata también el proceso de preparación de la materia prima utilizada; en el apartado sobre el diseño de mezclas, se describe el proceso que se siguió para llegar a la definición de las mezclas con que se trabajaría, también se llevó a cabo una caracterización de la materia prima y se explica en su apartado correspondiente, en la parte de elaboración de las mezclas el proceso y observaciones derivadas del mismo; en la parte de pruebas aplicadas se describe el proceso que se siguió para cada tipo de muestra, de manera que los datos y resultados obtenidos de estas pruebas se muestran en el CAPITULO 4.

3.1. Resumen de la investigación.

Se propuso, elaborar un hormigón ligero, a través de un hormigón de peso normal, correspondiente a una resistencia mecánica f'_{ck} de 210 (kg/cm²) basado en la norma de dosificación (A.C.I.), siendo este el punto de partida, para que el agregado grueso fuera reemplazado parcial y completamente por el papel maché (como agregado ligero), en proporciones volumétricas expresadas en porcentajes, con ascensos progresivos de manera tal que dichos porcentajes ocuparían en la mezcla, valores correspondientes al rango de (0 a 100)%, siendo estos: (10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 y 100)%, generando un total 10 puntos de análisis, que fueron sujetos a revisar la incidencia del papel maché, en el peso unitario o densidad y la resistencia a compresión (f'_{ck}) en probetas cilíndricas a los 7 y 28 días de edad. En el siguiente diagrama se presenta un resumen del experimento.

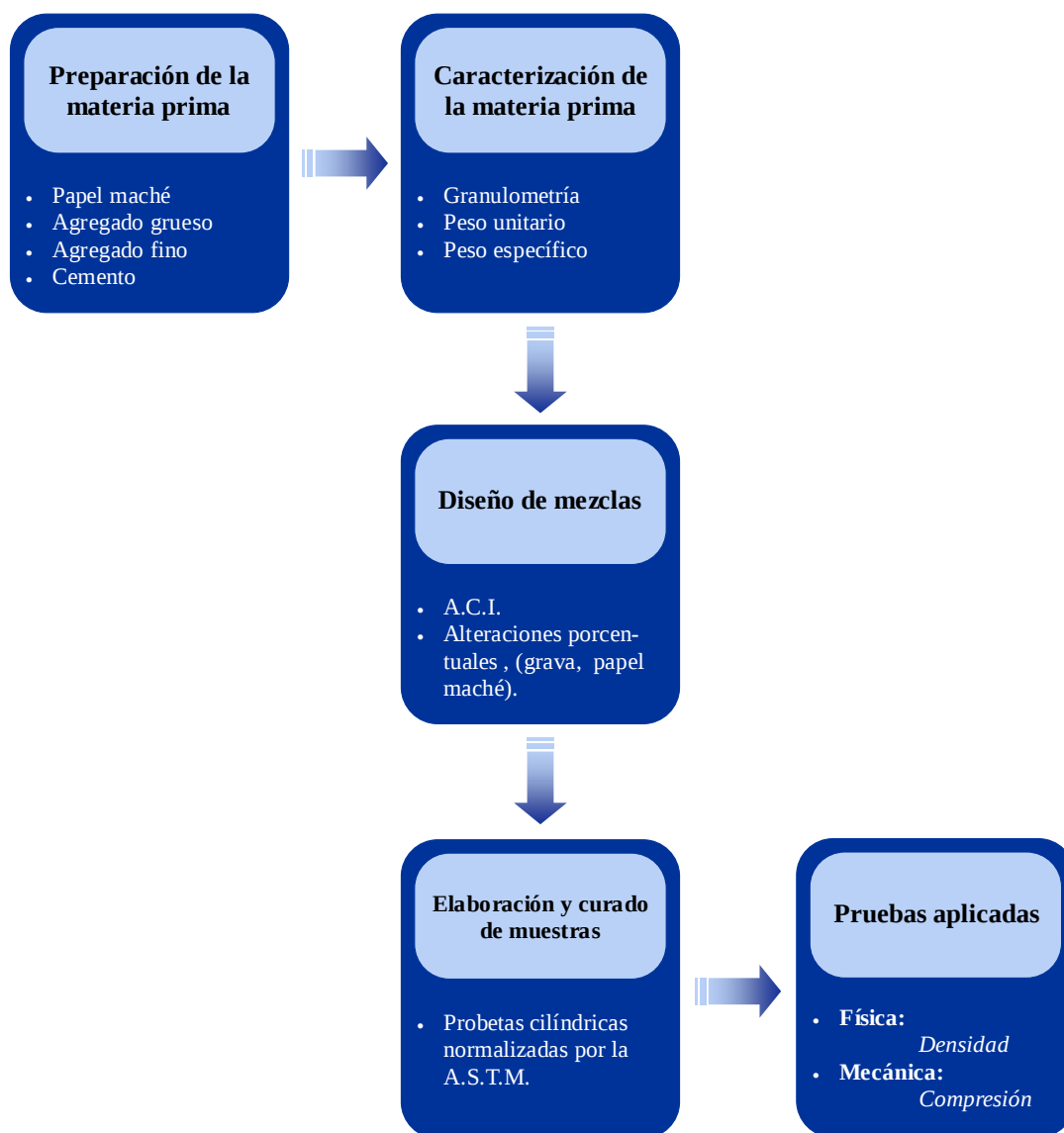


Figura 3.1 Diagrama del experimento

FUENTE: Elaboración propia

3.2. Preparación de la materia prima.

3.2.1. Papel maché.

La materia prima de mayor atención a preparar fue el papel maché, mismo tiene como base principal papel periódico, el cual para evitar la contaminación y tener uniformidad en la muestra, se adquirió los desechos correspondientes a un distribuidor de prensa escrita local.¹



Figura 3.2 Banco de papel periódico de desperdicio

FUENTE: Patio de almacenamiento de papel “ECO hardware” Santa Cruz - Bolivia.

Para incorporar el papel periódico a la mezcla del hormigón a cuenta del agregado grueso natural (grava), fue necesario realizar varios procesos para obtener un aspecto semejante, que gracias a esta peculiar técnica fue posible. Esta parte del proceso se la realizó de forma artesanal y desde la comodidad del hogar. Se inició con el proceso de separación de las fibras del papel periódico, o lo que se conoce como elaboración de la pulpa.² Se aprovechó que el desecho de papel periódico adquirido se encontraba en retazos a raíz del margen de impresión que es guillotinado por la misma impresora, lo cual nos evitó el proceso de fragmentación, se pesó el total y se depositó en fuentes donde se dejó en remojo para su saturación con agua durante un día. (Figura 3.3 – 3.4). Las condiciones climáticas promedio del lugar fueron de 17° C.

¹ Residuo de papel periódico proporcionado por la acopiadora “Recicladora del Sur” en calidad de donación.

² Pulpa se conoce como la mezcla de fibras de papel suspendidas en un medio acuoso



Figura 3.3 Papel periódico adquirido

FUENTE: Elaboración propia.



Figura 3.4 Papel periódico sometido a saturación

FUENTE: Elaboración propia.

Terminado el tiempo de saturación, se realizó la molienda del papel saturado, con el fin de reducirlo a pulpa, con la ayuda mecánica de un taladro y una adaptación estilo batidora. (Figura 3.5) Se utilizó aproximadamente entre 1.5 y 2 Kg de papel saturado (Papel+Agua), en bandejas diferentes y se procedió con la molienda por 30 a 40 minutos a velocidad nominal del equipo, hasta generar una disgregación uniforme.



Figura 3.5 Elaboración de la pulpa de papel maché

FUENTE: Elaboración propia.

Posteriormente, se redujo la cantidad de agua excedente en la pulpa, hasta adquirir una consistencia semi-seca pero todavía con presencia de humedad hasta que dicha

pulpa de papel tenga el aspecto de masa (Figura 3.6), (cuyo porcentaje de humedad óptimo aparente fue determinado con el ensayo de “contenido de humedad”, con el fin de ir conociendo las proporciones de cada componente, para el caso de que se quiera mezclar con pulpa en estado seco).³ En ese momento se agregó el pegamento celulósico (engrudo), que no es más que la combinación de agua y harina de trigo, sometida al calor, estas cantidades de agua y harina son equivalentes a 1000gr. de agua para 100gr. de harina obteniendo así una relación (a/h) igual a 10, la presencia del pegamento celulósico sobre la pulpa de papel es un factor muy importante, pues se verificó en el proceso que la consistencia dejó de ser grumosa y tomó un aspecto mucho más fino, dejando de ser una masa moldeable, por lo que solicitó a otro de sus componentes, “la harina” pero esta vez en polvo, para que la mezcla adquiriera la consistencia deseada. (Figura. 3.7).



Figura 3.6 Pulpa de papel, luego de retirar el exceso de agua

FUENTE: Elaboración propia.

³ Por ser “El papel Maché” una técnica artesanal y carecer de proporciones precisas y al ser estás más bien de apreciación, el contenido de humedad óptimo aparente de la pulpa de papel maché y las proporciones del resto de los componentes son considerados también un resultado, que por lo señalado serán expuestos en ANEXO 3.



Figura 3.7 Masa de papel maché lista para ser moldeada

FUENTE: Elaboración propia.

Una vez encontrada la consistencia deseada, se procedió al moldeo manual de cada una de las partículas a utilizar, se tuvo el respectivo cuidado que cada una de ellas tuviese una variación granulométrica semejante al agregado grueso de canto rodado, desde las partículas mayores hasta las partículas menores, según el requerimiento granulométrico de los agregados gruesos ASTM C33.



Figura 3.8 Moldeo de las partículas de papel maché

FUENTE: Elaboración propia.

Tras haber fabricado las partículas de papel maché, éstas fueron sometidas a deshidratación o secado, que se llevó a cabo a la intemperie, este proceso de secado tuvo una duración equivalente a 48Hrs. con una temperatura promedio de 20° C.

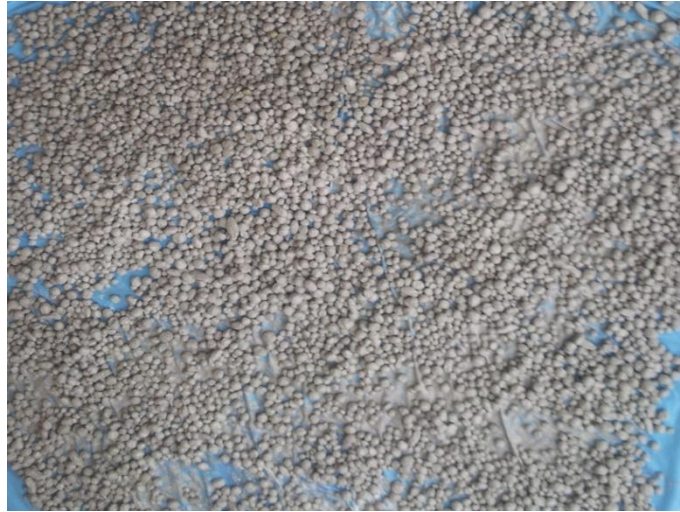


Figura 3.9 Secado de las partículas de papel maché

FUENTE: Elaboración propia.

Una vez secas dichas partículas, o más propiamente dicho el agregado grueso artificial ligero, se procedió a la impermeabilización del mismo, con el afán de conservar la relación agua cemento (a/c) en la mezcla de hormigón y evitar la presencia de micro organismos (moho) con el pasar del tiempo. Se procedió al bañado de dichas partículas en una solución producto de la combinación de barniz copal y tiner como disolvente (Figura 3.10), sabiendo que el segundo se evaporaría en el nuevo proceso de secado, obteniendo así un agregado artificial ligero (papel maché), con una apariencia semejante al agregado grueso (Figura 3.11).



Figura 3.10 Baño de impermeabilización

FUENTE: Elaboración propia.



Figura 3.11 Apariencia del agregado grueso artificial ligero – Papel maché

FUENTE: Elaboración propia.

3.2.2. Agregado grueso.

Si bien el agregado grueso (grava) será reemplazado por el agregado artificial ligero (Papel maché), no deja de ser una materia prima de atención, si bien es un material encontrado en la naturaleza, uno de los procesos de preparación, es la elección del banco, dado el caso del presente estudio de investigación, se vio por conveniente

elegir, el agregado grueso procedente del río Guadalquivir (canto rodado), mismo fue proporcionado en calidad de donación, por un distribuidor de áridos local.⁴



Figura 3.12 Banco de extracción de áridos – Grava

FUENTE: Elaboración propia.

La materia prima estando en el laboratorio, entre los tratamientos especiales que recibió, fue el lavado superficial del mismo, para que desapareciera la envoltura limosa-arcillosa que este presentaba, y de esa manera se aseguró la ausencia de partículas orgánicas que pudieran perjudicar al cemento en la mezcla; luego de haber esperado que este se haya secado, se procedió al cuarteo del material, de manera que las partículas sujetas a estudio serían elegidas al azar y pudieran estar acomodadas de forma equilibrada entre partículas grandes, medianas y pequeñas.

⁴ Seleccionadora 16 de Enero, proveedor de áridos naturales



Figura 3.13 Cuarteo del agregado grueso

FUENTE: Elaboración propia.

Posteriormente se procedió a su debido almacenamiento lejos del alcance de otros materiales que pudieran ligarse al agregado grueso, sea el caso de arcillas, limos y humedad, que ya fueron desechados en el proceso del lavado y secado de la muestra.



Figura 3.14 Almacenamiento aislado de arcillas, limos y humedad

FUENTE: Elaboración propia.

3.2.3. Agregado fino.

Al igual que el agregado grueso, el agregado fino fue proporcionado por el mismo proveedor de áridos, pues también para la arena, se eligió como banco al río Guadalquivir, en cuanto al tratamiento preliminar del agregado fino antes de que haya sido este almacenado, se realizaron exactamente los mismos procesos que para el agregado grueso, teniendo mayor complicación en el lavado, a continuación la ilustración del proceso.



Figura 3.15 Banco de extracción de áridos – Arena

FUENTE: Elaboración propia.

Al ser este un material granular fino, fácilmente la vista nos engaña con la presencia o ausencia de partículas más finas todavía, que puedan ocasionar cierta abrasión a partículas de mayor tamaño, e incluso al cemento, evitando una buena adherencia entre componentes, por lo que se procedió al lavado estricto del mismo, el cual resultó ser uno de los procesos más tediosos.



Figura 3.16 Lavado del agregado fino

FUENTE: Elaboración propia.

Luego de haber eliminado la mayor cantidad de partículas sueltas que se levantaban de la arena por efecto de la flotación, se escurrió el agua excedente y se depositó la arena en uno de los hornos eléctricos del laboratorio, con el fin de eliminar por completo las gotas de agua que la materia prima adquirió en el proceso de lavado.



Figura 3.17 Cuarteo del agregado fino

FUENTE: Elaboración propia.

Posteriormente se efectuó el cuarteo del agregado fino (arena) de la misma forma que el agregado grueso y con el mismo fin, ya que las partículas ligeras o de menor tamaño suelen depositarse en la superficie del depósito.

Finalmente se almacenó, en las mismas condiciones que el agregado grueso, evitando principalmente la humedad, por ser el principal conductor de partículas que puedan adherirse al agregado fino (arena).



Figura 3.18 Almacenamiento aislado de arcillas, limos y humedad

FUENTE: Elaboración propia.

3.2.4. Cemento.

Se comenzó por la selección del tipo, marca y proveedor de cemento a utilizar, pese a contar con una amplia variedad en el mercado nacional, se optó por elegir el cemento local tomando en cuenta que Tarija es uno de los productores nacionales de cemento, mismo fue adquirido de uno de los distribuidores comerciales de esta línea. En cuanto al tipo de cemento fue elegido el cemento tipo I-30, por ser apto para hormigones estructurales de resistencia normal.



Figura 3.19 Cemento I-30 adquirido de un distribuidor comercial

FUENTE: Elaboración propia.

3.2.5. Agua.

Para completar el proceso de preparación de los materiales, se vio por conveniente utilizar agua potable, pues esta al ser apta para el consumo humano nos garantiza estar libre de impurezas y un PH balanceado (5-7), libre de ácidos que puedan atacar al hormigón fresco, para la obtención de agua en las ciudades es necesario estar conectado a la red del sistema de agua potable, el caso particular de la red de COSAALT.

3.3. Caracterización de la materia prima.

Para determinar la caracterización de los agregados (arena, grava y papel maché), se realizaron los ensayos estándar para agregados en hormigones, basadas en las normas ASTM C 331.

Los ensayos mencionados a continuación fueron ejecutados en el “Laboratorio de suelos y hormigones” de la carrera de ingeniería civil, de la “Universidad Autónoma Juan Misael Saracho (UAJMS)”, ubicado en el mismo campus universitario, siendo estos ensayos los mínimos requeridos por la norma de dosificación ACI – 211.

3.3.1. Análisis granulométrico de los agregados para hormigones.

Granulometría del agregado fino – (Arena).

Para su realización se recurrió al siguiente material y equipo:

Material:

- Muestra representativa.

Equipo:

- Balanza sensible al 0.1 gr.
- Juego de Tamices (3/8, 4, 8, 16, 30, 50, 100, Tapa y Base).
- Horno de temperatura constante (105° C).
- Brocha de limpieza.
- Bandejas de secado y pesado.

La preparación de la muestra representativa del agregado fino obtenida por cuarteo, comenzó 24Hrs. antes de realizar el ensayo granulométrico, fue necesario introducir la muestra al horno de temperatura constante, porque la misma contenía cierto grado de humedad y en esas condiciones es muy difícil poder obtener datos confiables por la propiedad de adherencia que tienen estos materiales en estado húmedo, además de preparar la muestra para la granulometría se aprovechó de realizar el ensayo correspondiente al contenido de humedad de la muestra.

Una vez seca la muestra y a temperatura ambiente, se procedió con el ensayo apartando 750gr. del material para introducirlo al juego de tamices ordenados de abertura mayor a menor, en el siguiente orden.

Tamices	Abertura (mm)
3/8	9.50
Nº4	4.75
Nº8	2.36
Nº16	1.18
Nº30	0.60
Nº50	0.30
Nº100	0.15
BASE	-

Tabla 3.1 Granulometría agregado fino

FUENTE: Elaboración propia.

Posteriormente se procedió con el tamizado o agitado de las mallas, con movimientos rotativos en forma horizontal y golpes en forma vertical aproximadamente por 15 minutos, luego de ese lapso se procedió a retirar los tamices de mayor abertura, pesando las partículas retenidas en cada una de las mallas, cuyos datos fueron registrados cuidadosamente.



Figura 3.20 Juego de tamices o mallas estándar para hormigones

FUENTE: Elaboración propia.

Para el procesamiento de datos fue necesario aplicar las siguientes fórmulas: (que nos permitieron generar su respectiva curva granulométrica, su modulo de finura y el contenido de humedad de la muestra.⁵).

$$Ret. acum = \sum Peso Ret (3/8 + N^{\circ}4 \dots \dots + BASE) \quad (3.1)$$

$$\%Ret = \left(\frac{Ret. acum}{WM} \right) \cdot 100\% \quad (3.2)$$

⁵ Informe del laboratorio – ANEXO 6.

Donde:

% Ret: Porcentaje de retención

Ret. acum: Retenido acumulado

WM: Peso total de la muestra

$$\%Pasa = \%Ret - 100\% \quad (3.3)$$

Donde:

% Pasa: Porcentaje que llega a pasar por cada uno de los tamices del total

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

Donde:

MF: Módulo de finura

Σ (**%Ret**): Sumatoria de los porcentajes retenidos en las mallas (4,8,16,30,50,100).

$$\%Humedad = \left[\frac{(W_h - W_s)}{W_s} \right] \cdot 100\% \quad (3.5)$$

Donde:

%Humedad: Contenido de agua en porcentaje.

Wh: Peso húmedo de la muestra (humedad de banco)

Ws: Peso seco de la muestra (secado en horno a 105° C)

Granulometría del agregado grueso – (Grava – Papel maché).

Para su realización se utilizó el siguiente equipo y material:

Material:

- Muestra representativa obtenida por cuarteo.

Equipo:

- Balanza sensible al 0.1 gr.
- Juego de Tamices (2 ½, 2, 1 ½, 1, ¾, ½, 3/8, N° 4, Tapa y Base).

- Horno de temperatura constante (105° C).
- Brocha de limpieza.
- Bandejas de secado y pesado.

La preparación de la muestra representativa del agregado grueso natural, obtenida por cuarteo, comenzó 24Hrs. antes de realizar el ensayo granulométrico, fue necesario introducir la muestra al horno de temperatura constante, porque la misma contenía cierto grado de humedad y en esas condiciones es muy difícil poder obtener datos confiables por la propiedad de adherencia que tienen las partículas más finas en estado húmedo, además de preparar la muestra para la granulometría se aprovechó de realizar el ensayo correspondiente al contenido de humedad de la muestra. La preparación de la muestra para el agregado grueso artificial ligero, procedente de elaboración propia, también requirió tratamiento previo al ensayo granulométrico, por tanto se procedió a la obtención de la muestra representativa por cuarteo, aprovechando también de conocer el contenido de humedad de dicho agregado.

Una vez seca la muestra natural y a temperatura ambiente, se procedió con el ensayo apartando 5000gr. peso correspondiente al tamaño máximo del agregado (Tabla. 3.2), para introducirlo al juego de tamices ordenados de abertura mayor a menor, en el orden que indica la tabla 3.3, en cuanto al agregado artificial ligero (papel maché) se apartó 1000gr. que aunque no fue correspondiente al peso del tamaño máximo que le correspondía, se trató de imitar por apreciación un volumen semejante al del agregado grueso natural para introducirlo al juego de tamices que se indican a continuación:

Tamaño máximo de las partículas (plg)	Peso mínimo de la muestra (gr)
3/8	1000
½	2500
¾	5000
1	10000
1 ½	15000
2	20000
2 ½	25000
3	30000
3 ½	35000

Tabla 3.2 Peso de la muestra según tamaño máximo nominal

FUENTE: Elaboración propia – basado en el manual de laboratorio de hormigón

Tamices	Abertura (mm)
2 ½	63
2	50.8
1 ½	38.10
1	25.40
¾	19.05
½	12.50
3/8	9.50
N° 4	4.80
BASE	-

Tabla 3.3 Granulometría agregado grueso

FUENTE: Elaboración propia.

Se procedió con el tamizado respectivo para cada uno de los agregados (natural – artificial), agitado de las mallas, con movimientos rotativos en forma horizontal y golpes en forma vertical aproximadamente por 15 minutos, luego de ese lapso se procedió a retirar los tamices de mayor abertura, pesando las partículas retenidas en cada una de las mallas, cuyos datos fueron registrados cuidadosamente.

Para el procesamiento de datos fue necesario aplicar las siguientes fórmulas que nos permitieron generar su respectiva curva granulométrica, su modulo de finura y el contenido de humedad de la muestra:

$$Ret. acum = \sum Peso Ret (2^{1/2}, \dots + BASE) \quad (3.6)$$

$$\%Ret = \left(\frac{Ret. acum}{WM} \right) \cdot 100\% \quad (3.2)$$

Donde:

% Ret: Porcentaje de retención

Ret. acum: Retenido acumulado

WM: Peso total de la muestra

$$\%Pasa = \%Ret - 100\% \quad (3.3)$$

Donde:

% Pasa: Porcentaje que llega a pasar por cada uno de los tamices del total

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

Donde:

MF: Módulo de finura

Σ (%Ret): Sumatoria de los porcentajes retenidos en las mallas (4,8,16,30,50,100).

$$\%Humedad = \left[\frac{(Wh - Ws)}{Ws} \right] \cdot 100\% \quad (3.5)$$

Donde:

%Humedad: Contenido de agua en porcentaje.

Wh: Peso húmedo de la muestra (humedad de banco)

Ws: Peso seco de la muestra (secado en horno a 105° C).

3.3.2. Determinación del peso unitario de los agregados.

Peso unitario de los agregados – (Grava – Papel maché – Arena)

Para su realización se utilizó el siguiente equipo y material:

Material:

- Muestra representativa obtenida por cuarteo:

Grava aproximadamente 25kg.

Papel maché aproximadamente 2kg.

Arena aproximadamente 5kg.

Equipo:

- Balanza sensible al 0.5% del peso de la muestra.
- Una varilla de 5/8" diámetro y unos 60 cm de largo.
- Cuchara
- Juego de recipientes cilíndricos de volumen:
Grava – 14950 cm^3 .
Papel maché – 4145 cm^3 .
Arena – 3103 cm^3 .

La preparación de la muestra representativa obtenida por cuarteo de cada uno de los agregados contenían humedad ambiente, es decir, no fue necesario recurrir al secado de los mismos, posterior a ello se realizó la calibración de los diferentes moldes cilíndricos con el fin de tener mayor precisión en sus proporciones volumétricas.

Para cada uno de los agregados se realizó el peso unitario suelto, (acomodación natural de sus partículas) y el peso unitario compactado, (acomodación forzada por apisonamiento uniforme en 3 capas de 25 golpes).

Para el primer caso (peso unitario suelto), se llenaron los moldes hasta enrazarlos, de manera que la superficie del molde quedó al ras del agregado (Grava, Papel maché, Arena, en sus moldes respectivos), una vez conforme con el enrase se pesaron los moldes y se registraron los datos, repitiendo el mismo procedimiento, en un total de 3 mediciones para cada uno de los agregados.

Para el segundo caso (peso unitario compactado) para cualquiera de los agregados, se llenó el molde hasta una tercera parte de su capacidad y se procedió con el compactado o apisonamiento del mismo con la varilla, ejecutando 25 golpes sobre la primer capa de manera uniforme, de la misma forma en la capa correspondiente al

segundo tercio y sobre una tercera capa con el molde completamente lleno, seguidamente se enrazó hasta llegar a cumplir que la superficie del molde quede al ras del agregado, pesando y registrando el dato correspondiente, repitiendo el mismo procedimiento, en un total de tres (3) mediciones para cada uno de los agregados.

Para el procesamiento de datos fue necesario aplicar las siguientes formulas: (que nos permitieron generar su respectivo peso por unidad de volumen.

$$PUs = \frac{Ws}{Vol} \quad (3.7)$$

Donde:

PU_s: Peso unitario suelto.

W_s: Peso de la muestra suelta.

Vol: Volumen del molde.

$$PUc = \frac{Wc}{Vol} \quad (3.8)$$

Donde:

PU_c: Peso unitario compactado.

W_c: Peso de la muestra compactada.

Vol: Volumen del molde.

3.3.3. Determinación del peso específico y absorción de los agregados.

Peso específico y absorción del agregado fino – (Arena)

Para su realización se utilizó el siguiente equipo y material:

Material:

- Muestra representativa obtenida por cuarteo.
- Agua

Equipo:

- Balanza sensible a 0.1gr.

- Matraz de 500 ml.
- Bandeja de saturación y secado
- Secadora eléctrica

La preparación del agregado fino para este ensayo, requirió de un tratamiento especial, 2000gr de la muestra fue sometida a saturación 24Hrs. antes de la ejecución del ensayo.

Pasadas las 24Hrs, se procedió al escurrimiento de la muestra saturada, con el fin de eliminar el exceso de agua y con la ayuda de una secadora eléctrica se eliminó por completo la humedad presente en la superficie, inspeccionando dicho fenómeno con la ayuda de un molde cónico y una varilla de compactación, que tuvo un proceso muy particular (repartido en tres capas a 25 golpes por capa), entonces se colocó primero el molde cónico y se procedió al llenado con la muestra, y al momento de retirarlo dicha forma cónica se desplazó libremente.

Se utilizaron 500gr. de la muestra para introducirla en un matraz, el cual luego se llenaría de agua a su máxima capacidad y se registraría el peso total, (matraz + agua + muestra), posteriormente se trasladó dicha muestra en un plato para ser introducida al horno de secado y registrar su peso pasadas las 24Hrs, se repitió el proceso en un total de tres mediciones. Para el procesamiento de datos fue necesario aplicar las siguientes formulas que nos permitieron generar su peso específico a granel, saturado con superficie seca, aparente y el porcentaje de absorción:

$$PEg = \frac{A}{V-W} \quad (3.9)$$

$$PEsss = \frac{PM_{sss}}{V-W} \quad (3.10)$$

$$PEA = \frac{A}{(V-W)-(500-A)} \quad (3.11)$$

$$\%Ab = \left(\frac{PM_{sss}-A}{A} \right) \cdot 100 \quad (3.12)$$

Donde:

PEg: Peso específico a granel.

PEss: Peso específico saturado con superficie seca.

PEA: Peso específico aparente.

%Ab: Porcentaje de absorción

V: Volumen del matraz en ml.

W: peso en gr. o volumen en ml. de agua agregado al matraz.

PMss: Peso de la muestra saturada con superficie seca.

A: Peso en el aire de la muestra secada al horno en gr.

Peso específico y absorción del agregado grueso – (Grava)

Para su realización se utilizó el siguiente equipo y material:

Material:

- Muestra representativa obtenida por cuarteo.
- Agua

Equipo:

- Balanza sensible al 0.1gr.
- Cesto cilíndrico de malla metálica N°4 (h:20; D:20)
- Toalla
- Bandeja de saturación y secado
- Turril para sumergir el cesto

Al igual que el agregado fino, el agregado grueso fue sometido a saturación 24Hrs. antes de ejecutar el ensayo, la cantidad necesaria de dicha muestra representativa fue equivalente a 20.000gr.

Veinticuatro horas más tarde, se procedió al secado de las partículas con la ayuda de una toalla, dejando la superficie de cada una de ellas completamente secas y saturadas

interiormente, habiendo registrado el peso de la muestra en esas condiciones, fue introducida al cesto metálico y sumergida al turril, y así de esa forma haber conocido el peso de la muestra saturada dentro del agua; a dicho peso fue descontado el peso del cesto metálico, y se procedió a introducir la muestra al horno en un recipiente, se repitió el proceso para un total de tres mediciones. Para el procesamiento de datos fue necesario aplicar las siguientes formulas que nos permitieron generar su peso específico a granel, saturado con superficie seca, aparente y el porcentaje de absorción:

$$PEg = \frac{A}{B-C} \quad (3.13)$$

$$PEss = \frac{B}{B-C} \quad (3.14)$$

$$PEA = \frac{A}{A-C} \quad (3.15)$$

$$\%Ab = \left(\frac{B-A}{A} \right) \cdot 100 \quad (3.16)$$

Donde:

PEg: Peso específico a granel.

PEss: Peso específico saturado pero con superficie seca.

PEA: Peso específico aparente.

%Ab: Porcentaje de absorción.

A: Peso de la muestra secada en el horno, en gr.

B: Peso de la muestra saturada pero con superficie seca, en gr.

C: Peso de muestra saturada dentro del agua.

Peso específico y absorción del agregado grueso artificial – (Papel maché)

Para su realización se utilizó el siguiente equipo y material:

Material:

- Muestra representativa.

- Agua

Equipo:

- Balanza sensible al 0.1gr.
- Probeta graduada de 500 ml.
- Bandeja de saturación y secado
- Toalla

Al igual que en los agregados naturales, el papel maché también fue sometido a saturación por 24Hrs antes de ejecutar el ensayo, pero se pudo apreciar que las partículas flotaban en la superficie.

Veinticuatro horas más tarde se procedió al secado de las partículas con la ayuda de una toalla, dejando la superficie de cada una de ellas completamente secas y saturadas interiormente (aparentemente), habiendo registrado el peso de la muestra en esas condiciones, fue introducida al cesto metálico y sumergida al turril para conocer el peso de la muestra sumergida, saturada, pero dicho propósito fue fallido ya que las partículas flotaban sobre la superficie y se tuvo que abortar el experimento dando paso a otro tipo de ensayo similar al de la arena para conocer el volumen desplazado.⁶

Se utilizaron 50gr. de la muestra para introducirla en una probeta graduada, luego de llenar las probetas hasta un volumen de 100ml, y observar el volumen de incremento, o en otras palabras conocer el volumen desplazado y se registraría el peso total, (probeta + agua + muestra), posteriormente se trasladó dicha muestra en un plato para ser introducida al horno de secado y registrar su peso pasadas las 24 Hrs, se repitió el proceso en un total de tres mediciones. Para el procesamiento de datos fue necesario aplicar las mismas formulas que para el peso específico del agregado fino ya que el procedimiento de la toma de datos fue semejante, obteniendo su peso específico a granel, saturado con superficie seca, aparente y el porcentaje de absorción.

$$PEg = \frac{A}{V-W} \quad (3.9)$$

⁶ Informe fotográfico – ANEXO 8

$$PE_{sss} = \frac{PM_{sss}}{V-W} \quad (3.10)$$

$$PEA = \frac{A}{(V-W)-(PM_{sss}-A)} \quad (3.11)$$

$$\%Ab = \left(\frac{PM_{sss}-A}{A} \right) \cdot 100 \quad (3.12)$$

Donde:

PEg: Peso específico a granel.

PE_{sss}: Peso específico saturado con superficie seca.

PEA: Peso específico aparente.

%Ab: Porcentaje de absorción

V: Volumen del matraz en ml.

W: peso en gr. o volumen en ml. de agua agregado al matraz.

PM_{sss}: Peso de la muestra saturada con superficie seca.

A: Peso en el aire de la muestra secada al horno en gramos.

3.4. Diseño de mezclas.

Se realizó un diseño de mezclas para hormigones normales, basado en la norma de dosificación ACI-211, a la cual se realizó alteraciones volumétricas en cuanto a las proporciones que correspondían al agregado grueso de forma porcentual y ascendente, dicho proceso de cálculo se explica a continuación:

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

Tras los ensayos de caracterización de los agregados naturales y contando con los datos necesarios para dicho cálculo de dosificación, se procedió con el mismo:

1er paso: se designó la resistencia de diseño f_c' , (resistencia a la que se pretende alcanzar o superar) para este caso fue de 210 kg/cm², juntamente a ello se obtuvo la

resistencia característica f_{ck} con ayuda de la tabla A5.1⁷, resistencia que se utilizó para el proceso de cálculo.

2do paso: Se realizó la selección del asentamiento (S) con ayuda de la tabla A5.2⁷, seleccionando así una consistencia para estructuras como losas, vigas y columnas.

3er paso: Se interpoló la relación agua cemento (a/c) de la tabla A5.3⁷, en función a la resistencia característica (mayorada).

4to paso: De la tabla A5.4⁷, se interpoló el factor de volumen del agregado grueso compactado (b/b_o), a través de su tamaño máximo nominal y módulo de finura del agregado fino.

5to paso: Se identificó el requerimiento de agua (A) en función al desplazamiento por asentamiento seleccionado en el segundo paso, en la tabla A5.5⁷.

6to Paso: Se procedió a la utilización de las siguientes fórmulas, que nos ayudaron en el cálculo de esta dosificación.

$$PaG = (b/b_o) \cdot PUc \quad (3.17)$$

Donde:

PaG: Peso del agregado grueso, en (kg/m^3).

(b/b_o): Factor de volumen del agregado grueso compactado, adimensional.

PUc: Peso unitario compactado, en (kg/m^3).

$$PC = \frac{A}{(a/c)} \quad (3.18)$$

Donde:

PC: Peso del cemento, en (kg/m^3).

A: Requerimiento de agua, en (kg/m^3).

(a/c): Relación agua cemento, adimensional

⁷ Tablas de dosificación ACI-211 – ANEXO 5

$$VaG = \frac{PaG}{\gamma aG} \quad (3.19)$$

Donde:

VaG: Volumen del agregado grueso, en (lt/m³).

PaG: Peso de agregado grueso, en (kg/m³).

γaG : Peso específico del agregado grueso, en (gr/cm³).

$$VC = \frac{PC}{\gamma C} \quad (3.20)$$

Donde:

VC: Volumen del cemento, en (lt/m³).

PC: Peso del cemento, en (kg/m³).

γC : Peso específico del cemento, en (gr/cm³).

$$VaF = 1000 - VC - VaG - A \quad (3.21)$$

Donde:

VaF: Volumen del agregado fino, en (lt/m³).

VC: Volumen del cemento, en (lt/m³).

VaG: Volumen del agregado Grueso, en (lt/m³).

A: Requerimiento de agua, en (kg/m³).

$$PaF = VaF \cdot \gamma aF \quad (3.22)$$

Donde:

PaF: Peso del agregado fino, en (kg/m³).

VaF: Volumen del agregado fino, en (lt/m³).

γaF : Peso específico del agregado fino, en (gr/cm³).

7mo paso: Tras haber obtenido los resultados de dosificación en peso para un metro cúbico (kg/m^3) de cada uno de los agregados, se multiplicó por el volumen correspondiente a 8 probetas (m^3), para obtener el resultado en peso (kg) para la misma cantidad de probetas, añadiéndole a la proporción un 20% de pérdida.

3.4.2. Alteración de la dosificación para el agregado grueso.

El peso total del agregado grueso obtenido al aplicar la fórmula 3.17, equivale al 100% de su peso en la mezcla, como también al 100% de su volumen, es por ello que se consideró a este valor como punto de partida para extraer el agregado grueso natural (grava) y añadir el agregado grueso artificial ligero (papel maché), con la finalidad de reponer la porción desplazada y mantener constante el volumen total del agregado grueso (siendo a partir de la primera modificación la combinación de grava y papel maché), y así no alterar el volumen total de la mezcla de hormigón.

Volumen de grava (%)	Volumen de papel maché agregado (%)	Volumen del agregado en conjunto (%)
100	0	100
90	10	100
80	20	100
70	30	100
60	20	100
50	50	100
40	60	100
30	70	100
20	80	100
10	90	100
0	100	100

Tabla 3.4 Equivalencia de papel maché por volumen desplazado de grava

FUENTE: Elaboración propia

Para contar con equivalencias precisas que en teoría imitaron la idealización expuesta en la tabla 3.4, fue necesario acudir a la fórmula 3.17, que dio lugar a revisar las variables que intervenían, siendo éstas: el peso unitario compactado (PUC), y el factor de volumen del agregado grueso compactado (b/bo), dato propuesto por las tablas de dosificación ACI-211, por lo que dirigió al ensayo a determinar volúmenes con la

utilización del peso unitario compactado (PUc), y a verificar con el factor de volumen del agregado grueso compactado (b/bo). Para su cometido se realizó el siguiente procedimiento de cálculo:

Determinación del volumen del agregado grueso natural equivalente al 100%.

Teniendo como datos el peso unitario compactado (PUc), y el peso del agregado grueso (PaG) para un determinado número de probetas en (kg), se utilizó la fórmula del peso unitario, teniendo como única incógnita el volumen del agregado grueso, que fue despejado como se indica a continuación.

$$VaG_{100\%} = \frac{PaG}{PUc} \quad (3.23)$$

Donde:

$VaG_{100\%}$: Volumen del agregado grueso al 100%, en (m³).

PaG: Peso del agregado grueso, en (kg).

PUc: Peso unitario compactado, en (Kg/m³).

Reducción volumétrica del agregado grueso expresada en porcentaje.

Una vez obtenido el volumen equivalente al 100% del agregado grueso, se comenzó por disminuir el porcentaje (%) del mismo a partir de la siguiente expresión:

$$VaG_{(100-\%)} = VaG_{100\%} - \left(VaG_{100\%} \cdot \frac{(\%)}{100} \right) \quad (3.24)$$

Donde:

$VaG_{-\%}$: Volumen del agregado grueso menor al 100%

$VaG_{100\%}$: Volumen del agregado grueso al 100%

(%): Porcentaje de extracción.

Ejemplo.

Para extraer el 10% del agregado grueso, la expresión quedó de la siguiente manera. (Volumen del agregado grueso al 90%).

$$VaG_{(90\%)} = VaG_{100\%} - \left(VaG_{100\%} \cdot \frac{10\%}{100} \right) \quad (3.24)$$

La disminución porcentual fue fijada para intervalos de 10%, restando su volumen progresivamente hasta que el agregado grueso sea sustraído por completo.

Si bien el porcentaje extraído del agregado grueso era conocido, fue preciso determinar su porción volumétrica, simplemente con la diferencia de volúmenes, es decir, el volumen equivalente al porcentaje extraído, no es más que la resta del volumen inicial al 100% y el volumen final (después de la extracción).

Ejemplo. (Sea el caso de la extracción del 10%.)

$$VE = VaG_{100\%} - VaG_{90\%} \quad (3.25)$$

Donde:

VE: Volumen extraído, en m³.

VaG_{100%}: Volumen del agregado grueso inicial, equivalente al 100%, en m³.

VaG_{90%}: Volumen del agregado grueso final, menor al 100%, en m³.

El volumen extraído, también fue un cálculo sucesivo, alcanzando a extraer en su totalidad el volumen, lo que quiere decir que el volumen extraído llegó a ser igual que el volumen del agregado correspondiente al 100%.

Compensación del volumen extraído

Si bien el volumen extraído (VE), pertenece al agregado grueso natural (grava), esa porción volumétrica fue devuelta, cumpliendo la condición de “volumen extraído (VE), igual al volumen añadido (VA), teniendo así la siguiente expresión.

$$VE_{(grava)} = VA_{(papel\ maché)} \quad (3.26)$$

Donde:

VE: Volumen extraído, en m³.

VA: Volumen añadido, en m³.

Al estar de acuerdo con la condición de igualdad, fue momento de devolver dicho volumen a la mezcla, pero como el resto de materiales que participan en el hormigón se encuentran en proporciones de peso, se vio por conveniente añadir ese volumen en peso, usando nuevamente la fórmula del peso unitario, participando esta vez el peso unitario compactado (PUc), del papel maché, el volumen añadido (VA), y el peso correspondiente a ese volumen, que sería introducido a la mezcla, que despejado en la fórmula quedó de la siguiente manera.

$$PaG_A = PUc_A \cdot VA \quad (3.27)$$

Donde:

PaG_A : Peso del agregado grueso artificial (papel maché), en kg.

PUc_A : Peso unitario compactado del agregado artificial, en (Kg/m^3).

VA : Volumen del agregado añadido, en m^3 .

Verificación de compensación.

Si bien el punto de partida fue la fórmula 3.17, se vio adecuado justificar el procedimiento realizado con una verificación a partir de dicha fórmula, pero en función a los datos del papel mache.

Comencemos por analizar el factor de volumen compactado del agregado grueso (b/bo), mismo indica la proporción del agregado grueso; en función al tamaño máximo de sus partículas y el modulo de finura del agregado fino (arena).

En cuanto al tamaño máximo de sus partículas, el papel maché fue elaborado imitando al agregado grueso natural (grava) en apariencia y tamaño, y los ensayos granulométricos al que fue sometido revelan que es cierto; por tanto el tamaño máximo es exactamente igual al de la grava y el modulo de finura de la arena seguirá siendo el mismo valor ya que este agregado no tiene alteración alguna y por ello el valor correspondiente a el factor de volumen de agregado grueso compactado (b/bo), será el mismo.

$$PaG = (b/bo) \cdot PUc \quad (3.17)$$

Mientras tanto en la fórmula, el peso unitario compactado (PUC) de la grava, será reemplazado por el peso unitario compactado (PU_{CA}) del agregado artificial (papel maché). Obteniendo la dosificación en peso de papel maché para un metro cúbico de hormigón (kg/m^3).

$$PaG_A = (b/bo) \cdot PU_{CA} \quad (3.28)$$

Donde:

PaG_A : Peso del agregado artificial, en (kg/m^3).

(b/bo): Factor de volumen del agregado grueso compactado, adimensional.

PU_{CA} : Peso unitario del agregado grueso artificial (papel maché), en (kg/m^3).

Con el peso total de papel maché para un metro cúbico de hormigón equivalente al 100% de su peso, fue posible también determinar el peso para porcentajes menores al 100%, de forma directa, sin necesidad de convertir a estos porcentajes en volumen, siendo esta verificación el procedimiento óptimo de dosificación para combinar el agregado natural con el agregado artificial, o para remplazarlo por completo.

A continuación indicamos el proceso de cálculo y las fórmulas que utilizamos para dicho proceso.

Con el peso de papel maché para un metro cúbico (kg/m^3), se multiplicó por el volumen correspondiente a 8 probetas en (m^3), para obtener así el resultado en peso (kg) para la misma cantidad de probetas, siendo este el peso al 100% de papel maché, una vez agregada una pérdida equivalente al 20% del insumo, se procedió a la disminución de porcentajes con un intervalo cada 10%, para reemplazar al agregado extraído, valga el ejemplo de la disminución del agregado en un 10%, para obtener el peso del agregado artificial al 90% de su volumen

$$PaG_{A(90\%)} = PaG_{A100\%} - \left(PaG_{A100\%} \cdot \frac{10\%}{100} \right) \quad (3.29)$$

Donde:

$PaG_{A(90\%)}$: Peso del agregado grueso artificial menor al 100%, en kg.

$PaG_{A(100\%)}$: Peso del agregado grueso artificial al 100%, en kg.

3.5. Elaboración de las muestras.

A continuación, se describe el proceso que se siguió, para la elaboración de los diferentes tipos de muestras basados en ensayos de testificación de materiales (ASTM), constando de probetas cilíndricas estándar de 15cm. de diámetro y 30cm de alto.

3.5.1. Hormigón Simple.

Se inició el vaciado de probetas (patrón) de hormigón simple, pesando los agregados, de acuerdo a las proporciones obtenidas del cálculo de dosificación correspondiente a cada agregado (cemento, arena, grava, agua), en condición seca.

A continuación se introdujo a la mezcladora el agregado grueso y gran parte del agua, segundos más tarde, luego de que el agregado grueso se haya saturado, se introdujo el cemento y la arena, seguido del agua restante para fluidificar la mezcla y esta se homogenice en función al diseño de cálculo.



Figura 3.21 Hormigonera o mezcladora en proceso de producción de hormigón

FUENTE: Elaboración propia.

Luego de transcurridos un par de minutos en la mezcladora, se vació la pasta de hormigón sobre un recipiente, para proceder al vaciado de las probetas y al ensayo de consistencia o desplazamiento de cono, a través del cono de Abrams, que nos permitió verificar que la muestra mantenga las condiciones óptimas que se establecieron en el proceso de cálculo, para ello se tomó en cono y se vació la muestra hasta una tercera parte de su altura, distribuyendo la mezcla sobre su base con 25 golpes efectuados por la varilla de compactación, repitiendo así el proceso en el segundo tercio y así también en el nivel superior, y se enrazó la mezcla para contar con una superficie plana (Figura 3.22), se extrajo cuidadosamente el cono y se midió el desplazamiento (Figura 3.23), mismo se esperaba sea menor o igual al asumido en el proceso de cálculo equivalente a 3”.



Figura 3.22 Ensayo de consistencia del hormigón
FUENTE: Elaboración propia.



Figura 3.23 Desplazamiento de cono

FUENTE: Elaboración propia.

Seguido a ello, se procedió al vaciado de la mezcla en los moldes cilíndricos, usando un procedimiento similar al cono de Abrams y al peso unitario de los agregados, repartiendo la altura total del molde en tres partes aparentemente iguales y sometidas a 25 golpes sobre cada una de ellas, con la varilla de compactación



Figura 3.24 Vaciado de probetas de hormigón en moldes cilíndrico

FUENTE: Autor.

Una vez las probetas llenas de mezcla, se procedió al traslado de las mismas a un lugar de superficie plana, donde se realizó el vibrado con la ayuda de un martillo o combo de goma, para eliminar las burbujas y reacomodar las partículas, luego fueron enrazadas, dándoles un acabado fino, de manera que la probeta de hormigón mantenga una línea horizontal entre base y superficie para no toparse con problemas en el momento de rotura, ya que la asimetría es uno de los principales causantes de variación en la resistencia.



Figura 3.25 Enrazado y fraguado de las probetas cilíndricas

FUENTE: Elaboración propia.

Se dejó fraguar al hormigón por 24Hrs. y se procedió al desmolde para que las piezas de hormigón (probetas cilíndricas), sean sometidas al curado, proceso descrito en el punto (3.6 Curado de las probetas).

3.5.2. Hormigón maché.

El hormigón maché, no es más que la disminución del agregado grueso natural (grava), desplazado por el agregado grueso artificial (papel maché), en diferentes proporciones, que recibió exactamente el mismo tratamiento en el proceso de mezcla.

Para los porcentajes de papel maché correspondientes al 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90%. Al igual que en el hormigón patrón, el agregado grueso, en este caso la combinación de los agregados gruesos fueron introducidos a la mezcladora junto con gran parte de agua, hasta que las partículas de agregado natural se saturaron, y de ahí en adelante el mismo procedimiento con el cemento, la arena y la cantidad de agua restante.

Para el porcentaje correspondiente al 100% de papel maché, se conservó la metodología de mezcla, agregando inicialmente el agregado grueso artificial (papel maché), que en este caso reemplazó por completo al agregado grueso natural (grava) con gran parte del agua, pero en este caso dicho agregado no fue saturado porque sus partículas pese a estar alborotadas por la energía de la mezcladora, estas no se sumergían, sino que flotaban sobre la superficie, segundos después se añadió el cemento, la arena y la cantidad restante de agua bajo el mismo procedimiento que un hormigón convencional.

Para verificar que el contenido de agua fuera constante para cada porcentaje de papel maché añadido, se realizó el ensayo de consistencia o desplazamiento de cono, demostrando así que la consistencia del hormigón era la misma para todos los casos⁸, adquiriendo alguna variación en función a la humedad ambiente que para este estudio fue despreciable. Para el vaciado de probetas se utilizó el mismo tratamiento que para el hormigón patrón, de las tres capas y 25 golpes en cada una de ellas.

Luego de ello se realizó el traslado de los moldes llenos de mezcla a una superficie plana para su vibrado y enrazado correspondiente, donde se pudo apreciar que las partículas livianas llegaban a la superficie, complicando un poco el acabado de las probetas, que con un poco paciencia se obtuvo buena apariencia.

⁸ Imágenes de los diferentes asentamientos registrados en ANEXO 8



Figura 3.26 Traslado de los moldes para el enrazado

FUENTE: Elaboración propia



Figura 3.27 Enrazado y fraguado de las probetas de hormigón

FUENTE: Elaboración propia

Se dejó fraguar al hormigón maché por 24Hrs. y se procedió al desmolde para que las piezas de hormigón (probetas cilíndricas), sean sometidas al curado, proceso descrito en el punto (3.6 Curado de las probetas).

3.6. Curado de las probetas.

Luego del proceso de fraguado del hormigón, fue necesario mantenerlo tan saturado de agua como sea posible, con el fin de terminar de hidratar las partículas del cemento y conseguir así su máxima eficiencia.

Las probetas del presente estudio de investigación, recibieron una combinación de tratamientos para el proceso de curado, siendo el curado ideal y el curado similar a obra que consintió en sumergir las probetas completamente en una piscina hasta los 7 días de edad y a partir del séptimo día un regado o roseado de las probetas tres veces al día durante 10 minutos hasta los 28 días de edad respectivamente.

Se optó por retirar las probetas al séptimo día, para mantener un equilibrio de ventajas tanto para las partículas de cemento que necesitaban hidratarse y para las partículas de papel maché ya que dicha hidratación se convertiría en una desventaja total, pues en evidencia el papel es un material absorbente y si bien tuvo un tratamiento de impermeabilización fue para conservar la relación agua cemento de la mezcla y no así para tolerar una sumersión obligada por el peso propio de las probetas, por ello todas las muestras recibieron el mismo tratamiento, tanto las probetas del hormigón patrón, como las probetas de hormigón maché correspondiente a cada uno de los porcentajes ya conocidos.



Figura 3.28 Curado de las probetas – tratamiento ideal

FUENTE: Elaboración propia.



Figura 3.29 Curado de las probetas – similar a obra

FUENTE: Elaboración propia.

3.7. Pruebas aplicadas.

Como parte del desarrollo del experimento, se realizaron las siguientes pruebas a las muestras elaboradas.

3.7.1. Densidad o peso por unidad de volumen.

Las pruebas de densidad o peso por unidad de volumen, se basaron en la norma ASTM C 1185, utilizando muestras cilíndricas de 15cm. de diámetro y 30cm. de alto, con presencia de humedad correspondiente a la saturación del proceso de curado correspondientes al a los 7 días de edad y a los 28 días de edad.

Se pesaron las muestras en una balanza digital de precisión marca KERN, de procedencia Alemana (capacidad máxima 60 kg, precisión ± 5 gr, carátula digital), y se midió con cinta métrica sus dimensiones para determinar un promedio de su geometría.



Figura 3.30 Prueba de densidad – o peso volumétrico

FUENTE: Elaboración propia.

3.7.2. Resistencia a la compresión.

Las pruebas de resistencia a compresión se llevaron a cabo conforme a la norma ASTM C39, sobre probetas cilíndricas estandarizadas, se utilizó una prensa digital de pruebas a compresión marca CONTROL'S, de procedencia Italiana, (sistema de pistón hidráulico, capacidad máxima de fuerza 2000 KN., velocidad nominal 0.5Mp/s, controlada electrónicamente).

Para las pruebas se utilizaron muestras cilíndricas normalizadas de 15cm. de diámetro y 30cm de alto. Con un total de ochenta y ocho (88) probetas, correspondientes a 11 muestra y cada muestra agrupaba por 8 probetas.



Figura 3.31 Rotura a compresión

FUENTE: Elaboración propia.

CAPITULO IV

ANALISIS DE RESULTADOS

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos en el tratamiento de los agregados y de las diferentes pruebas realizadas a las muestras elaboradas, las cuales fueron descritas en el capítulo anterior. Los resultados son presentados por tipo de prueba realizada, donde se muestran los datos obtenidos y la información generada a partir de los mismos. Después se realiza el análisis de la información y correlaciones con la información generada.

4.1. Datos obtenidos.

Los datos obtenidos llegan a ser la información de primera mano para el investigador, por tanto se expone a continuación todos los datos obtenidos, en la caracterización de los agregados, en el diseño de mezclas y en las pruebas aplicadas.

4.1.1. Caracterización.

Los datos obtenidos para la caracterización de los agregados, fueron tabulados, bajo el procedimiento de cálculo descrito (*en el punto, 3.3 Caracterización de la materia prima del CAPITULO 3.*), obteniendo así sus propiedades cuyos resultados, forman parte de los datos necesarios para procesar el cálculo de dosificación.

Análisis granulométrico de los agregados:

Agregado grueso:

Para el ensayo de granulometría se utilizó una muestra equivalente a 5000 gr. dato obtenido de la tabla 3.2.

Peso. Total (gr):		5000
JUEGO DE TAMICES	Tamaño (mm)	Peso Ret. (gr)
2 1/2"	63	0.00
2	50.8	0.00
1 1/2	38.10	0.00
1	25.40	0.00
3/4	19.05	85.00
1/2	12.50	2497.30
3/8	9.50	1020.20
Nº4	4.80	1405.00
BASE	0	10.50
SUMA :		5000.00
PÉRDIDAS :		0.00
Modulo de finura MF :		6.73
Tamaño máx nominal :		1"

Tabla 4.1 Datos granulométricos del agregado grueso

FUENTE: Elaboración propia

Obteniendo de ello el modulo de finura siendo esté igual a 6.73, el tamaño máximo nominal de los agregados igual a 1" de pulgada y los porcentajes rebasados de cada malla expuestos en anexos¹, los mismos cumplen la granulometría ideal propuesta por la norma ASTM C33.

HUMEDAD			
DATOS	M1	M2	M3
	(gr)	(gr)	(gr)
Peso Muestra Húmeda	900.00	900.00	900.00
Peso Muestra seca	893.03	892.86	892.92
Peso Agua	6.97	7.14	7.08
% de Humedad	0.78	0.80	0.79
	0.79		

Tabla 4.2 Datos del contenido de humedad del agregado grueso

FUENTE: Elaboración propia

¹ Informes de laboratorio – ANEXO 6

La humedad obtenida es igual al 0.79% misma corresponde a la humedad del agregado en estado de almacenamiento en el ambiente del laboratorio de suelos y hormigones.

Agregado fino (Arena):

La muestra para realizar el ensayo granulométrico del agregado fino fue el promedio de los pesos requeridos siendo estos (500 y 1000)gr. utilizando un total de 750gr.

Peso Total (gr):		750
JUEGO DE TAMICES	Tamaño (mm)	Peso Ret. (gr)
3/8	63.00	0.00
Nº4	50.80	4.00
Nº8	38.10	153.80
Nº16	25.40	122.30
Nº30	19.05	109.30
Nº50	12.50	240.60
Nº100	9.50	95.60
BASE	4.80	23.60
SUMA :		749.20
PÉRDIDAS :		0.80
Modulo de finura MF :		2.92
Tamaño máx nominal :		3/8"

Tabla 4.3 Datos granulométricos del agregado fino

FUENTE: Elaboración propia

Obteniendo de ello el modulo de finura siendo este igual a 2.92, el tamaño máximo nominal de los agregados igual a 3/8" de pulgada y los porcentajes rebasados de cada malla expuestos en anexos¹, los mismos cumplen la granulometría ideal propuesta por la norma ASTM C33.

HUMEDAD			
DATOS	M1	M2	M3
	(gr)	(gr)	(gr)
Peso Muestra Húmeda	550.00	550.00	550.00
Peso Muestra seca	547.13	546.92	547.30
Peso Agua	2.87	3.08	2.70
% de Humedad	0.52	0.56	0.49
	0.53		

Tabla 4.4 Datos del contenido de humedad del agregado fino

FUENTE: Elaboración propia

La humedad obtenida, es igual al 0.53%, misma corresponde a la humedad del agregado en estado de almacenamiento, en el ambiente del laboratorio de suelos y hormigones.

Agregado grueso artificial (papel maché):

Para el agregado grueso artificial se utilizó una muestra de 700gr. tratando de imitar un volumen semejante al del agregado grueso natural, para que imite en todas sus condiciones, e incluso de tratamiento.

Peso. Total (gr):		700
JUEGO DE TAMICES	Tamaño (mm)	Peso Ret. (gr)
2 1/2"	63	0.00
2	50.8	0.00
1 1/2	38.10	0.00
1	25.40	0.00
3/4	19.05	16.00
1/2	12.50	242.00
3/8	9.50	291.00
Nº4	4.80	145.00
BASE	0	6.00
SUMA :		700.00
PÉRDIDAS :		0.00
Modulo de finura MF :		6.80
Tamaño máx nominal :		1"

Tabla 4.5 Datos granulométricos del papel maché

FUENTE: Elaboración propia

Obteniendo de ello el modulo de finura siendo este igual a 6.80, el tamaño máximo nominal de los agregados igual a 1" de pulgada y los porcentajes rebasados de cada malla expuestos en anexos¹, los mismos cumplen la granulometría ideal propuesta por la norma (ASTM C33).

HUMEDAD			
DATOS	M1	M2	M3
	(gr)	(gr)	(gr)
Peso Muestra Húmeda	150.00	150.00	150.00
Peso Muestra seca	50.00	50.00	50.00
Peso Agua	0.00	0.00	0.00
% de Humedad	0.00	0.00	0.00
		0.00	

Tabla 4.6 Datos del contenido de humedad del agregado grueso artificial papel

FUENTE: Elaboración propia

Obteniendo una humedad igual al 0.00%, misma corresponde a la humedad del agregado en estado seco, almacenado en el ambiente del laboratorio de suelos y hormigones.

Determinación del peso específico y absorción de los agregados.

Agregado grueso (Grava):

Se utilizó un poco más de 15.000gr. de muestra saturada con superficie seca, para realizar tres ensayos con aproximadamente 5.000gr. cada uno.

PESO MUESTRA SECADA "A" (gr)	PESO MUESTRA SATURADA CON SUP. SECA "B" (gr)	PESO MUESTRA SATURADA DENTRO DEL AGUA "C" (gr)	PESO ESPECÍFICO APARENTE (gr/cm3)	% DE ABSORCIÓN
4950.00	5040.00	3006.00	2.55	1.82
4952.00	5041.00	3010.00	2.55	1.80
4953.00	5043.00	3017.00	2.56	1.82
			2.55	1.81

Tabla 4.7 Datos del peso específico del agregado grueso natural

FUENTE: Elaboración propia

Obteniendo en promedio un peso específico aparente de 2.55 (gr/cm³), y un porcentaje de absorción de 1.81%, (tabla completa expuesta en anexos).¹

Agregado fino (Arena):

Se apartó 1.500gr. de la muestra saturada con superficie seca, para realizar tres ensayos con aproximadamente 500gr. de muestra cada uno.

PESO MUESTRA S.S.S (gr)	PESO DE MATRÁZ (gr)	MUESTRA + MATRAZ + AGUA (gr)	PESO MUESTRA SECADA "A" (gr)	P. E. APARENTE (gr/cm ³)	% DE ABSORCIÓN
475.5	196	950.2	460.50	2.23	3.15
476.2	196	951.3	461.60	2.24	3.07
475.9	196	950.8	461.40	2.23	3.05
				2.23	3.09

Tabla 4.8 Datos del peso específico del agregado fino

FUENTE: Elaboración propia

Obteniendo en promedio un peso específico aparente de 2.23 (gr/cm³), y un porcentaje de absorción de 3.09% (tabla completa expuesta en anexos)¹.

Agregado grueso artificial (papel maché):

PESO MUESTRA S.S.S (gr)	PESO DE MATRÁZ (gr)	MUESTRA + MATRAZ + AGUA (gr)	PESO MUESTRA SECADA "A" (gr)	P. E. APARENTE (gr/cm ³)	% DE ABSORCIÓN
50	295.1	443.4	50.00	0.61	0.00
50	295.1	443.4	50.00	0.61	0.00
50	295.1	443.4	50.00	0.61	0.00
				0.61	0.00

Tabla 4.9 Datos del peso específico del agregado grueso artificial

FUENTE: Autor

Obteniendo en promedio un peso específico aparente de 0.61 (gr/cm³), y un porcentaje de absorción de 0.00% en 24Hrs (tabla completa expuesta en anexos)¹.

Determinación del peso unitario de los agregados.

El peso unitario de los agregados se ejecutó bajo dos procedimientos: el peso unitario suelto, sin energía de compactación y el peso unitario compactado con energía de compactación repartido en tres capas con veinticinco golpes cada una, en este caso se exponen los datos del ensayo con energía de compactación, por ser este el aplicado para el cálculo de dosificación.

Agregado grueso (Grava):

Para el peso unitario de la grava, se utilizó aproximadamente 25kg. De muestra, equivalente a un molde volumétrico de 15lt.

PESO RECIPIENTE (gr)	VOLUMEN RECIPIENTE (cm3)	PESO RECIP. + MUESTRA COMPACTA (gr)	PESO MUESTRA COMPACTA (gr)	PESO UNITARIO SUELTO (gr/cm3)
8135.00	14950.00	32810.00	24675.00	1.651
8135.00	14950.00	32827.00	24692.00	1.652
8135.00	14950.00	32840.00	24705.00	1.653
				1.652

Tabla 4.10 Datos del peso por unidad de volumen, del agregado grueso

FUENTE: Elaboración propia

Obteniendo en promedio un peso unitario igual al 1.652 gr/cm³ (tabla completa expuesta en anexos)¹.

Agregado fino (Arena):

Para el peso unitario compactado de la arena se utilizó aproximadamente 5kg. de muestra, equivalente a un molde de 3lt. de volumen.

PESO RECIPIENTE	VOLUMEN RECIPIENTE	PESO RECIP. + MUESTRA COMPACTA	PESO MUESTRA COMPACTA	PESO UNITARIO SUELTO
(gr)	(cm3)	(gr)	(gr)	(gr/cm3)
3079.10	3103.00	7829.30	4750.20	1.531
3079.10	3103.00	7859.00	4779.90	1.540
3079.10	3103.00	7824.00	4744.90	1.529
				1.533

Tabla 4.11 Datos del peso por unidad de volumen, del agregado fino

FUENTE: Elaboración propia

Obteniendo en promedio un peso unitario igual al 1.533 gr/cm³ (tabla completa expuesta en anexos)¹.

Agregado grueso artificial (papel maché):

Para el peso unitario del papel maché, se utilizó aproximadamente 8kg, de muestra equivalente a un molde de 15lt.

PESO RECIPIENTE	VOLUMEN RECIPIENTE	PESO RECIP. + MUESTRA COMPACTA	PESO MUESTRA COMPACTA	PESO UNITARIO SUELTO
(gr)	(cm3)	(gr)	(gr)	(gr/cm3)
8135.00	14950.00	15460.50	7325.50	0.490
8135.00	14950.00	15465.00	7330.00	0.490
8135.00	14950.00	15484.30	7349.30	0.492
				0.491

Tabla 4.12 Datos del peso por unidad de volumen, del agregado grueso artificial

FUENTE: Elaboración propia

Obteniendo en promedio un peso unitario igual a 0.491 gr/cm³ (tabla completa expuesta en anexos)¹.

4.1.2. Diseño de mezcla.

El diseño de mezclas fue tabulado como se indica en el punto 3.4 *Diseño de mezclas, del CAPITULO 3*; a partir de los siguientes datos obtenidos de la clasificación de los agregados y especificaciones de cada producto, sea el caso del cemento.

ENSAYO	UNIDAD	VALOR
1.- Modulo de finura de la arena (MF)	s/u	2.92
2.- Peso unitario compactado de la grava (PUC)	kg/m ³	1652
3.- Peso unitario compactado del papel maché (PUc)	kg/m ³	491
4.- Peso específico de la arena (γ_f)	gr/cm ³	2.23
5.- Peso específico de la grava (γ_g)	gr/cm ³	2.55
6.- Peso específico del papel maché (γ_m)	gr/cm ³	0.61
7.- Absorción de la arena (Aa)	%	3.09
8.- Absorción de la grava (Ag)	%	1.8
9.- Absorción del papel maché en 24 Hrs (Ap)	%	0.00
9.- Humedad de la arena (Ha)	%	0.53
10.- Humedad de la grava (Hg)	%	0.79
11.- Humedad del papel maché (Hp)	%	0.00
11.- Tamaño máximo nominal (TMN) “grava”	Pulg	1"
12.- Tamaño máximo nominal (TMN) “papel maché”	Pulg	1"
13.- Peso específico del cemento	gr/cm ³	3.14

Tabla 4.13 Datos obtenidos de la caracterización de los agregados

FUENTE: Elaboración propia

Obteniendo como resultado las siguientes proporciones de mezclas para un metro cúbico de hormigón inalterado u hormigón patrón, imitando a la relación ideal (1-2-3). (Informe completo expuesto en anexos)¹

Ingrediente	Peso Seco	Peso Húmedo
	kg/m ³	kg/m ³
Cemento	373.91	373.91
Agua	187.00	199.41
Grava	1073.50	1082.02
Arena	643.91	643.33

Tabla 4.14 Proporción de mezcla en peso para un metro cúbico

FUENTE: Elaboración propia

Cemento	Arena	Grava
1.0	1.7	2.9
1.0	2.0	3.0

Tabla 4.15 Relación de mezcla

FUENTE: Elaboración propia

Recapitulando, la variación de dosificación, consistió en alterar de forma volumétrica el agregado grueso (grava), en proporciones porcentuales donde el volumen desplazado de grava, fuera reemplazado por el papel maché o agregado grueso

artificial, en las siguientes proporciones, equivalentes al volumen de ocho (8) probetas cilíndricas.

Grava			Papel maché		
%	Volumen (m^3)	Peso (Kg)	%	Volumen (m^3)	Peso (Kg)
100%	0.03307	54.61	0%	0.00000	0.00
90%	0.02979	49.15	10%	0.00331	1.62
80%	0.02645	43.69	20%	0.00661	3.25
70%	0.02315	38.23	30%	0.00992	4.87
60%	0.01984	32.77	40%	0.01323	6.49
50%	0.01653	27.30	50%	0.01653	8.12
40%	0.01323	21.84	60%	0.01984	9.74
30%	0.00992	16.38	70%	0.02315	11.36
20%	0.00661	10.92	80%	0.02645	12.99
10%	0.00331	5.46	90%	0.02979	14.61
0%	0.00000	0.00	100%	0.03307	16.24

Tabla 4.16 Porcentaje ocupacional de grava y papel maché

FUENTE: Elaboración propia

Donde el 100% del agregado grueso corresponde al hormigón patrón inalterado utilizando 0% de papel maché, haciendo una suma total entre ambos del 100% y un volumen de $0.03307 m^3$, manteniendo constante el volumen para cualquiera de los casos.

El resto de los materiales que componen el hormigón se mantuvieron inalterados sea el caso del cemento, agua y arena. (Exponiendo en anexos cada uno de los tipos de dosificación aplicados).¹

4.1.3. Pruebas aplicadas.

A continuación se presentan los datos promedio que se obtuvieron en las pruebas de resistencia a compresión y densidad, mismas corresponden a las pruebas planteadas en el presente estudio de investigación, habiendo desarrollado la toma de datos en dos etapas, mismas se aplicaron a cuatro especímenes por tipo de muestra, por lo que el cálculo real por tipo se tomó como el promedio de los cuatro, y los resultados individuales de resistencia a la compresión correspondientes a cada porcentaje se muestran en anexos.

Etapa inicial: Edad del hormigón 7-D (siete días)

PESO Y RESISTENCIA PROMEDIO A LOS 7 DÍAS					
Hormigón simple			Hormigón maché		
N° Muestra	Peso [w] (kg)	Resistencia a compresión [fc'k] (kg/cm2)	Porcentaje de papel maché (%)	Peso [w] (kg)	Resistencia a compresión [fc'k] (kg/cm2)
1	13.02	165.54	10%	12.91	159.0
2	13.02	165.54	20%	12.17	137.5
3	13.02	165.54	30%	11.60	103.5
4	13.02	165.54	40%	11.26	87.4
5	13.02	165.54	50%	10.91	60.9
6	13.02	165.54	60%	10.24	57.5
7	13.02	165.54	70%	9.65	49.0
8	13.02	165.54	80%	9.32	44.6
9	13.02	165.54	90%	9.08	41.2
10	13.02	165.54	100%	8.47	35.5

Tabla 4.17 Datos promedio de peso y resistencia a los 7 días de edad

FUENTE: Elaboración propia

Etapa final: Edad del hormigón 28-D (veintiocho días)

PESO Y RESISTENCIA PROMEDIO A LOS 28 DÍAS					
Hormigón simple			Hormigón maché		
N° Muestra	Peso [w] (kg)	Resistencia a compresión [fc'k] (kg/cm2)	Porcentaje de papel maché (%)	Peso [w] (kg)	Resistencia a compresión [fc'k] (kg/cm2)
1	12.97	245.19	10%	12.82	239.50
2	12.97	245.19	20%	11.91	212.73
3	12.97	245.19	30%	11.30	164.20
4	12.97	245.19	40%	10.96	141.30
5	12.97	245.19	50%	10.59	106.66
6	12.97	245.19	60%	10.04	95.85
7	12.97	245.19	70%	9.46	85.36
8	12.97	245.19	80%	9.15	79.94
9	12.97	245.19	90%	8.84	72.04
10	12.97	245.19	100%	8.18	62.63

Tabla 4.18 Datos promedio de peso y resistencia a los 28 días de edad

FUENTE: Elaboración propia

4.2. Resultados obtenidos.

Se expone la información que se generó a partir de los datos, en las tablas y gráficos sobre los resultados obtenidos.

Para el caso de la resistencia a compresión, en el eje de las abscisas se ubican las proporciones de papel maché como agregado grueso en la mezcla; y los valores en el eje de las ordenadas, indican la resistencia a compresión correspondiente a cada porcentaje de papel maché.

Mientras tanto en el caso de la densidad o peso volumétrico, en el eje de las abscisas se ubican las proporciones de papel maché como agregado grueso en la mezcla; y los valores en el eje de las ordenadas, indican el peso unitario del hormigón correspondiente a cada porcentaje de papel maché.

Resistencia a la compresión.

Etapla inicial: Edad del hormigón 7-D (siete días)

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN A LOS 7 DÍAS				
Hormigón simple [fc'k] (kg/cm2)	Porcentaje de papel maché (%)	Hormigón maché [fc'k] (kg/cm2)	Diferencial de resistencia [Δ fc'k] (kg/cm2) (%)	
165.5	0	165.5	0.00	0.00
165.5	10	159.04	6.50	3.92
165.5	20	137.52	28.02	16.93
165.5	30	103.46	62.08	37.50
165.5	40	87.41	78.13	47.20
165.5	50	60.87	104.67	63.23
165.5	60	57.46	108.08	65.29
165.5	70	49.02	116.52	70.39
165.5	80	44.56	120.98	73.08
165.5	90	41.21	124.33	75.11
165.5	100	35.46	130.07	78.58

Tabla 4.19 Resistencia a compresión los 7 días de edad

FUENTE: Elaboración propia

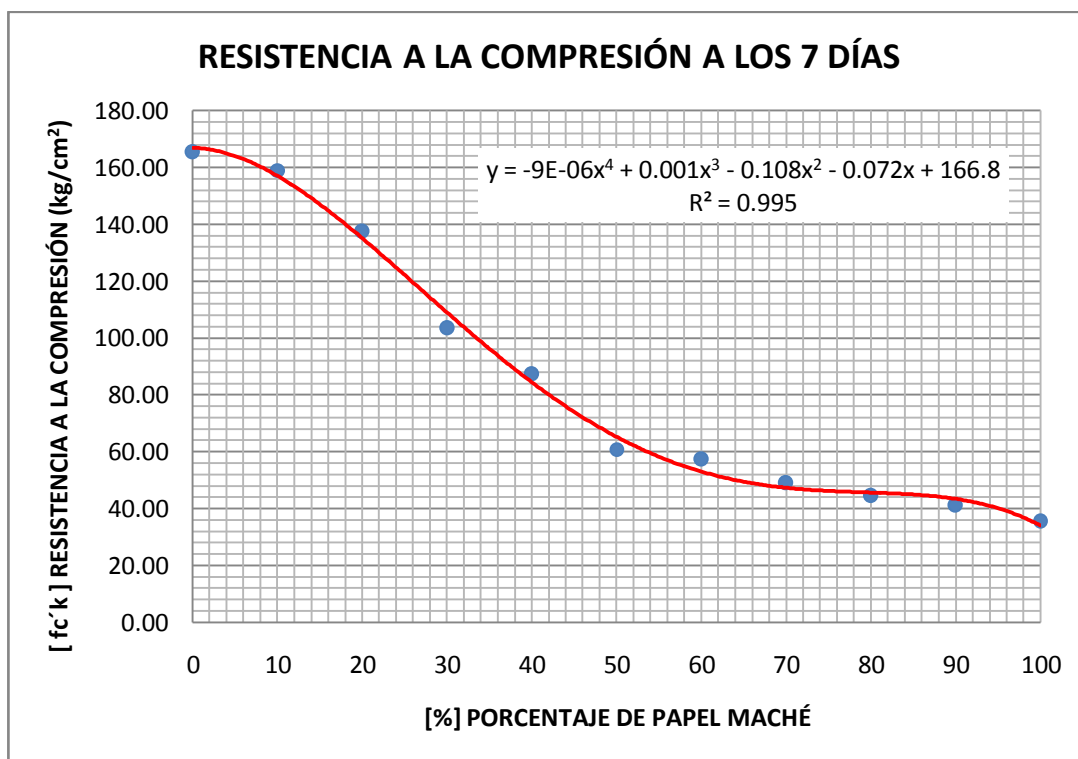


Figura 4.1 Porcentaje de papel maché Vs Resistencia a compresión a los 7 días

FUENTE: Elaboración propia

En la gráfica los puntos azules, representan la resistencia a compresión para cada porcentaje de papel aplicado a la mezcla y la línea roja, la tendencia que se ajusta a los mismos, otorgándonos una ecuación de aplicación empírica para calcular la resistencia del hormigón en función a determinado porcentaje de papel maché a los 7 días de edad.

$$fc'_{k_{7D}} = -9 \cdot 10^{-6} \cdot x^4 + 0.001 \cdot x^3 - 0.108 \cdot x^2 - 0.072 \cdot x + 166.8 \quad (4.1)$$

Donde:

$fc'_{k_{7D}}$: Resistencia a compresión a los 7 días

x: Porcentaje de papel maché aplicado

Se puede observar que la resistencia del hormigón decrece al incrementar el porcentaje de papel maché, llamando la atención que al reemplazar el agregado grueso por el papel maché equivalente a un 50% de su volumen se observa una caída

de hasta un 65% de su resistencia con relación al patrón, pero al reemplazar el 50% restante reduce hasta un 79% de su resistencia con relación al patrón, obteniendo una diferencia entre ambos puntos de apenas un 14%.

Etapa final: Edad del hormigón 28-D (veintiocho días)

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN A LOS 28 DÍAS				
Hormigón simple [fc'k] (kg/cm ²)	Porcentaje de papel maché (%)	Hormigón maché [fc'k] (kg/cm ²)	Diferencial de resistencia [Δ fc'k] (kg/cm ²) (%)	
245.2	0	245.2	0.00	0.00
245.2	10	239.5	5.7	2.32
245.2	20	212.7	32.5	13.24
245.2	30	164.2	81.0	33.03
245.2	40	141.3	103.9	42.37
245.2	50	106.7	138.5	56.50
245.2	60	95.8	149.3	60.91
245.2	70	85.4	159.8	65.19
245.2	80	79.9	165.3	67.40
245.2	90	72.0	173.2	70.62
245.2	100	62.6	182.6	74.46

Tabla 4.20 Datos promedio de peso y resistencia a los 28 días de edad

FUENTE: Elaboración propia

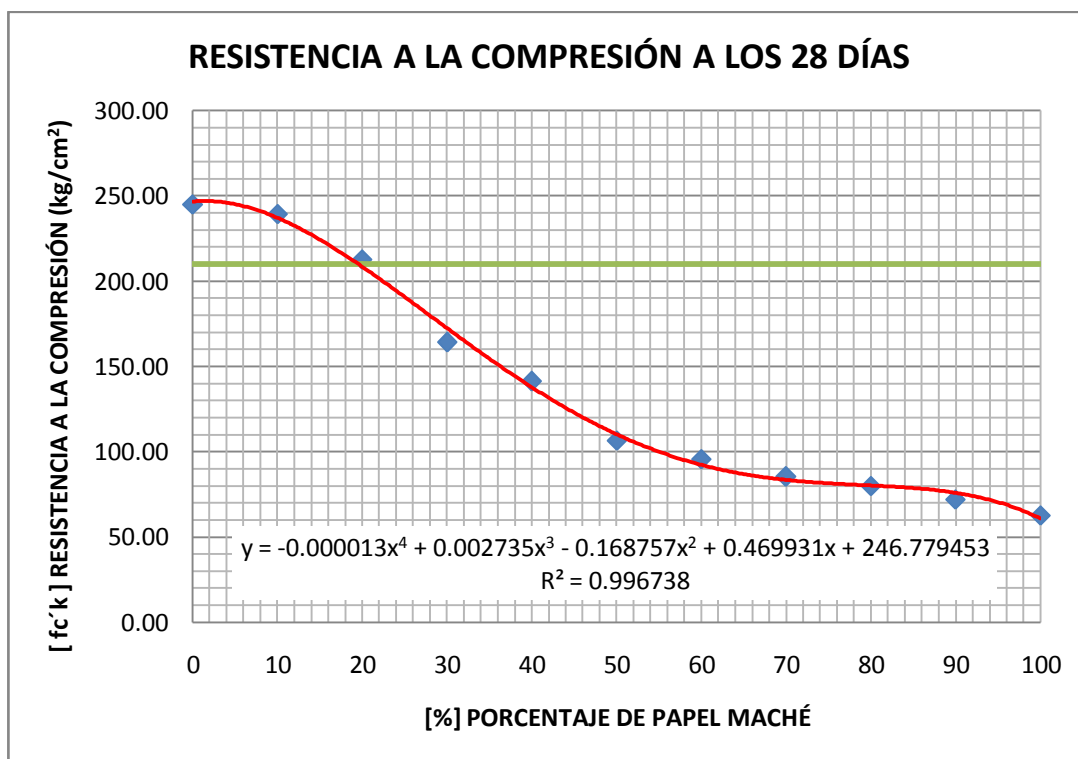


Figura 4.2 Porcentaje de papel maché Vs Resistencia a compresión a los 28 días

FUENTE: Elaboración propia

En la gráfica la línea horizontal de color verde, representa la resistencia a la compresión equivalente a 210 kg/cm², de forma constante como parámetro para medir la variación de resistencia. Los puntos azules, representan la resistencia a compresión para cada porcentaje de papel aplicado a la mezcla y la línea roja, la tendencia que se ajusta a los mismos, otorgándonos una ecuación de aplicación empírica, para calcular la resistencia del hormigón en función a un determinado porcentaje de papel maché a los 28 días de edad.

$$f'c'_{k_{28D}} = -0.000013 \cdot x^4 + 0.0273 \cdot x^3 - 0.1687 \cdot x^2 - 0.0469 \cdot x + 246.7 \quad (4.2)$$

Donde:

$f'c'_{k_{28D}}$: Resistencia a compresión a los 28 días

x: Porcentaje de papel maché aplicado

Se puede observar que la resistencia del hormigón decrece al incrementar el porcentaje de papel maché, llamando la atención que al reemplazar el agregado grueso por el papel maché equivalente a un 50% de su volumen, se observa una caída de hasta un 57% de su resistencia con relación al patrón, pero al reemplazar el 50% restante reduce hasta un 74% de su resistencia con relación al patrón, obteniendo una diferencia entre ambos puntos de apenas un 18%.

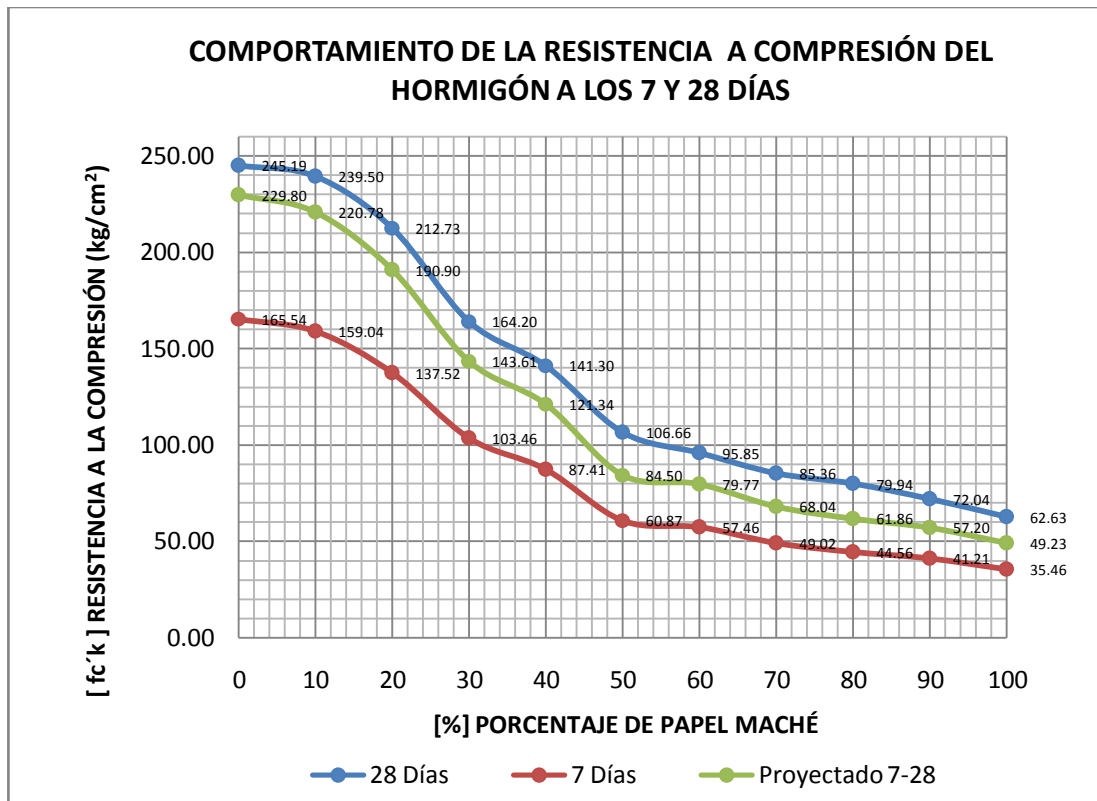


Figura 4.3 Comportamiento de la resistencia proyectada 7- 28

FUENTE: Elaboración propia

Solapando las curvas de resistencia a la compresión correspondiente a los 7 y 28 días, y la resistencia proyectada a los 28 días; se puede ver que la curva de proyección, se encuentra por debajo de la curva real; por lo que generó el interés de realizar una calibración de proyección para cada tipo de hormigón, a partir de la evolución de resistencia para cada porcentaje de papel presente en la mezcla, los valores de proyección se encuentran en anexos, en el informe de laboratorio.

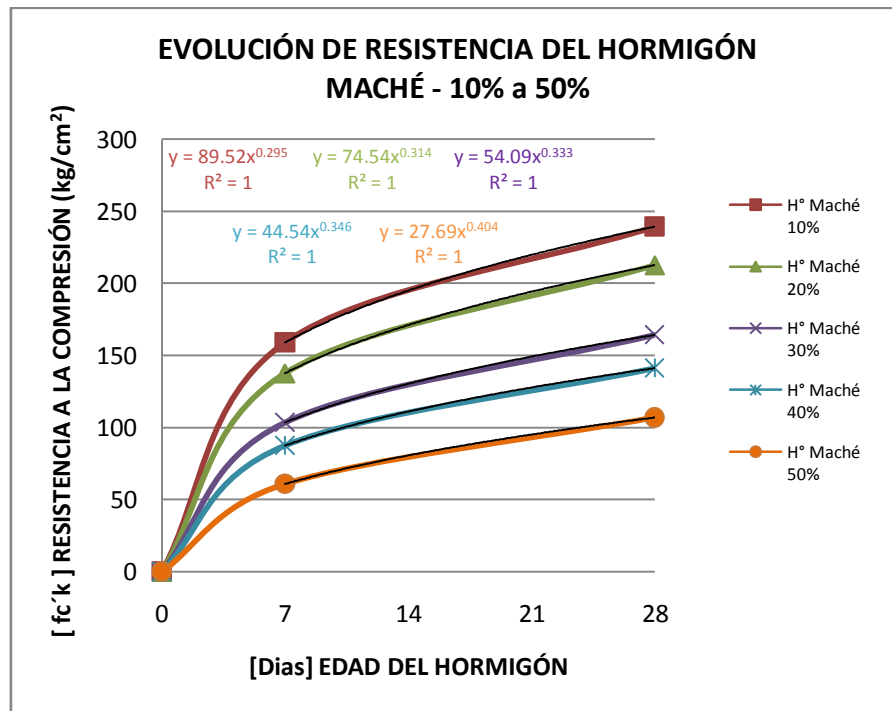


Figura 4.4 Evolución de resistencia del hormigón maché 7 a 28 días

FUENTE: Elaboración propia

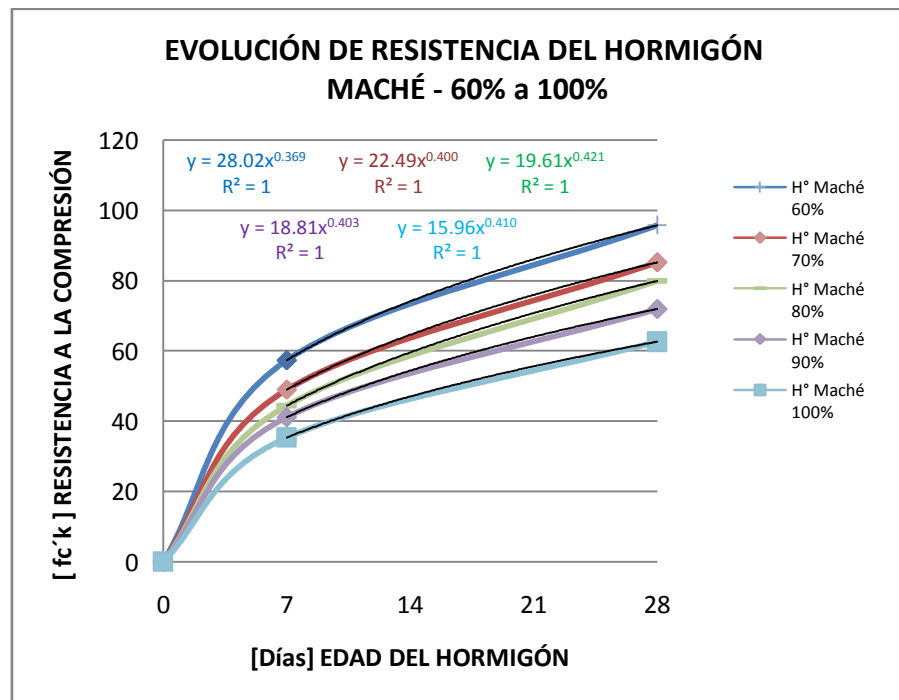


Figura 4.5 Evolución de resistencia del hormigón maché 7 a 28 días

FUENTE: Elaboración propia

Cada ecuación está identificada, según el color de la curva de evolución, mismas tendrán aplicación siempre y cuando la rotura sea ejecutada a los 7 días de edad y los agregados tengan las mismas características que las del presente estudio.

Densidad o peso por unidad de volumen.

En el proceso de la prueba de densidad se recabaron los datos tal como se describe en el acápite 3.7 pruebas aplicadas correspondientes al CAPITULO 3.

Las dimensiones geométricas de los cilindros, corresponden a la luz de los moldes cilíndricos estándar, de manera que todas las muestras tienen las mismas dimensiones volumétricas.

Geometría de las muestras de hormigón					
Diámetro	Altura	Área		Volumen	
[Ø]	[h]	[A]		[Vol]	
(cm)	(cm)	(cm ²)	(m ²)	(cm ³)	(m ³)
15	30	176.72	0.0177	5301.45	0.0053

Tabla 4.21 Geometría de las probetas de hormigón

FUENTE: Elaboración propia

Obtenida la geometría de las muestras, se obtuvieron también las densidades o pesos volumétricos para cada muestra, exponiendo a continuación las densidades o pesos unitarios promedio para ambas etapas de medición y correspondiente a cada porcentaje de papel maché.

Etapa inicial: Edad del hormigón 7-D (siete días)

PESO POR UNIDAD DE VOLUMEN [P.U.] A LOS 7 DÍAS						
Peso del hormigón simple (kg)	Porcentaje de papel maché	Peso	Volumen del cilindro	P.U.	Diferencial de peso	
	(%)	(Kg)	(m ³)	(Kg/m ³)	ΔW (kg)	(%)
13.02	0	13.02	0.00530	2458	0.00	0.00
13.02	10	12.91	0.00530	2437	0.11	0.83
13.02	20	12.17	0.00530	2296	0.85	6.56
13.02	30	11.60	0.00530	2188	1.43	10.96
13.02	40	11.26	0.00530	2125	1.76	13.53
13.02	50	10.91	0.00530	2058	2.11	16.24
13.02	60	10.24	0.00530	1932	2.79	21.39
13.02	70	9.65	0.00530	1822	3.37	25.87
13.02	80	9.32	0.00530	1759	3.70	28.42
13.02	90	9.08	0.00530	1714	3.94	30.27
13.02	100	8.47	0.00530	1599	4.55	34.94

Tabla 4.22 Peso por unidad de volumen a los 7 días

FUENTE: Elaboración propia

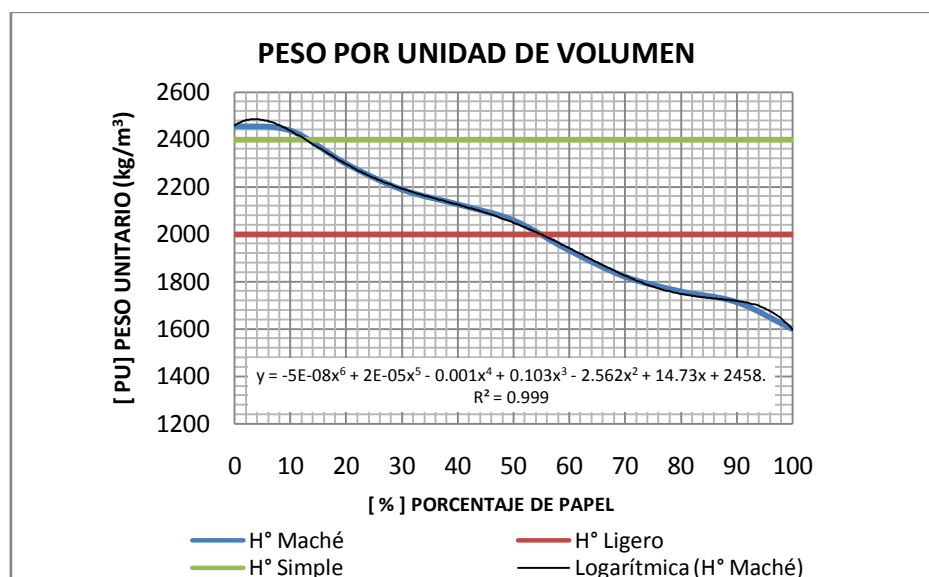


Figura 4.6 Porcentaje de papel maché Vs Peso unitario – a los 7 días

FUENTE: Elaboración propia

Etapa final: Edad del hormigón 28-D (veintiocho días)

PESO POR UNIDAD DE VOLUMEN [P.U.] A LOS 28 DÍAS						
Peso del hormigón simple (kg)	Porcentaje de papel maché [%]	Peso [Kg]	Volumen del cilindro [m ³]	P.U. [Kg/m ³]	Diferencial de peso [ΔW] (kg)	[%]
12.97	0	12.97	0.00530	2448	0.00	0.00
12.97	10	12.82	0.00530	2419	0.15	1.17
12.97	20	11.91	0.00530	2248	1.06	8.16
12.97	30	11.30	0.00530	2133	1.67	12.86
12.97	40	10.96	0.00530	2069	2.01	15.47
12.97	50	10.59	0.00530	1998	2.39	18.39
12.97	60	10.04	0.00530	1895	2.93	22.60
12.97	70	9.46	0.00530	1785	3.51	27.08
12.97	80	9.15	0.00530	1726	3.82	29.48
12.97	90	8.84	0.00530	1669	4.13	31.84
12.97	100	8.18	0.00530	1544	4.79	36.94

Tabla 4.23 Peso por unidad de volumen a los 28 días

FUENTE: Elaboración propia

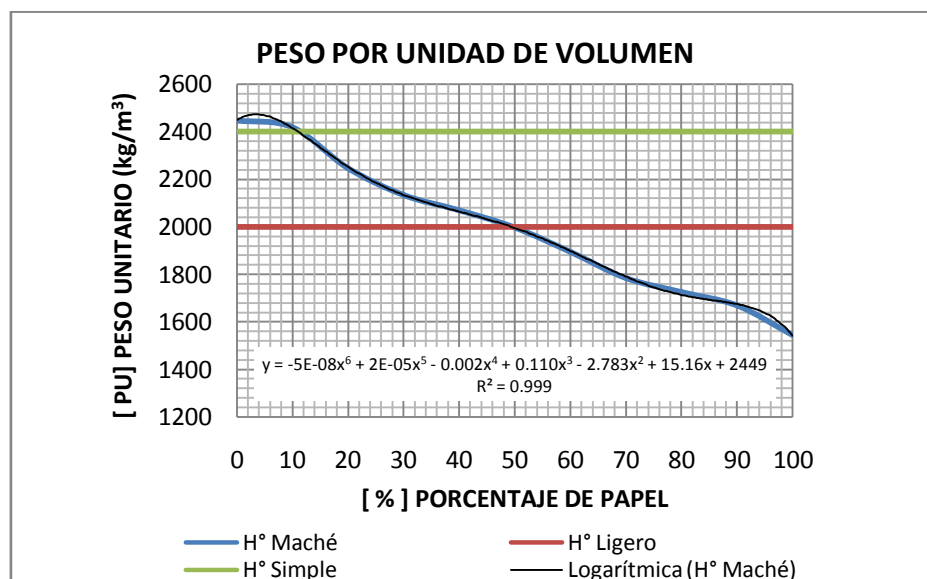


Figura 4.7 Porcentaje de papel Vs Peso unitario – a los 28 días

FUENTE: Elaboración propia

Al agregar papel maché a la mezcla en mayor proporción se pudo evidenciar que la reducción de peso se hizo notar tal como se había esperado.

En la primera etapa a los 7 días de edad, al reemplazar el 50% de grava por papel maché, el peso redujo hasta un 17% de su peso original, y al reemplazar el 50% restante redujo hasta un 35%, obteniendo una diferencia entre ambos de un 16%.

En la segunda etapa a los 28 días de edad, al reemplazar el 50% de grava por papel maché el peso redujo hasta un 19% de su peso, y al reemplazar el 50% restante redujo hasta un 37%, obteniendo una diferencia entre ambos de un 18%, por lo que se puede decir que en ambos casos se presentó simetría en los resultados, ya que la reducción de peso correspondiente al 100% de papel maché, es aproximadamente el doble que la reducción de peso correspondiente al 50% de papel maché.

4.3. Contrastación de hipótesis.

En los siguientes párrafos se hace la discusión sobre los resultados obtenidos en las pruebas aplicadas a los diferentes tipos de muestras elaboradas.

Partiendo de la hipótesis planteada para el desarrollo del presente estudio de investigación: *“El papel maché equivalente al 40% del agregado grueso generará, en el hormigón reducir el peso del mismo, de manera que el peso unitario corresponda a la categoría de un hormigón ligero, mismo será menor o igual a $2000 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ y conservará una resistencia mecánica a compresión de un hormigón estructural mayor o igual al mínimo requerido equivalente a $140 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$ ”,* se puede deducir que la misma ha sido demostrada, de acuerdo a los resultados obtenidos.

En cuanto a la característica mecánica, la resistencia a compresión del hormigón maché, se pudo evidenciar que la resistencia tuvo un comportamiento decreciente mientras se iba incrementando el contenido de papel maché, pese a haber cumplido la hipótesis se esperaban mejores resultados, ya que la apariencia del agregado artificial (papel maché) prometía a simple vista excelentes resultados. En cuanto a la característica física, la densidad del hormigón maché presentó resultados esperados, ya que al incrementar el agregado grueso artificial ligero, el peso reducía con

tendencia al peso de hormigones ligeros, cruzando dicha frontera a partir de del 40% del agregado.

4.4. Conclusiones y recomendaciones.

- Se analizó la incidencia del papel maché en el peso propio y en la resistencia mecánica a compresión del hormigón, sobre un diseño de mezcla con una resistencia f'_{ck} de 210 kg/cm², mediante los ensayos ASTM C39, cuya incidencia fue la reducción de peso en función a los porcentajes utilizados dentro de la mezcla y reducción de la resistencia f'_{ck} .
- Se optimizó el aprovechamiento de papel de desperdicio convirtiéndolo en materia prima para elaborar agregados semejantes a canto rodado, anhelando que dicha propuesta promueva el reciclaje y el proceso de fabricación del papel maché pase de artesanal a mecánico, para que dicho producto pueda ser introducido en la lista de materiales de construcción, haciendo un gran favor a la naturaleza.
- Para el fabricado del agregado grueso artificial (papel maché), se identificó al proceso de impermeabilización como tratamiento especial, de manera que dicho proceso anule totalmente el ingreso de agua e incluso al estar sumergido, por lo que se recomienda que el impermeabilizante sea incluido al momento de elaborar la pasta de papel maché, además para no eliminar la rugosidad de dicho agregado ya que a mayor rugosidad mayor será la adherencia con el hormigón; para el proceso de moldeado se sugiere sea sometido a presión, para eliminar los vacíos internos otorgando un agregado ligero y compacto en estado seco, por tanto el proceso mecánico debe ser ejecutado con los equipos necesarios, tomando como punto de partida el reciclado del papel, ya que uno de los procesos es la reducción de papel a pulpa, en tambores cilíndricos con turbinas o aspas giratorias, pasando por cintas transportadoras a moldes que producirían las partículas de papel maché sometidas a compresión mismo efecto generará pérdida de humedad

acelerando el proceso de secado, dichos moldes cumplirían el control granulométrico ASTM C33.

- En la caracterización de los agregados se pudo evaluar: tamaño, peso, volumen, humedad, absorción, el cual nos permitió identificar la compatibilidad de los agregados y trabajabilidad de cada uno en la mezcla en el proceso de cálculo.
- Se ha diseñado un hormigón convencional inalterado, para una resistencia f'_{ck} de 210kg/cm^2 , mediante la aplicación de cálculo, basado en las normas de dosificación ACI 211, American Concrete Institute.
- Se ha comparado las mezclas de hormigón alterado con “papel maché” Vs. hormigón convencional, verificando que el agregado grueso natural incide en la resistencia a compresión, otorgándole características positivas, en cambio el agregado grueso artificial le otorga resistencia negativa o decreciente, en cuanto a las comparaciones de consistencia los desplazamientos de las mezclas se mantuvieron constantes en todos los casos.
- Se identificó las aplicaciones del hormigón basado en papel maché sujeto a estudio, en función a sus características físicas y mecánicas, para elementos estructurales limitados como ser: muros o tabiques pre-fabricados, carpeta final de distribución de losas alivianadas en combinación con acero de refuerzo, carpeta de nivelación en losas como sobre-piso, carpeta de nivelación para fundaciones, y en elementos estructurales sin requerimiento de carga para hormigones ornamentales en pisos superiores.
- Se ha generado una ecuación empírica para determinar la resistencia de un hormigón maché en función al porcentaje de papel, expuesto entre los resultados obtenidos en la ecuación 4.1, siempre y cuando las características de los agregados sean semejantes a los del presente estudio de investigación
- Se ha generado una ecuación empírica que ayudará a determinar el peso de un hormigón maché en función al porcentaje de papel, expuesto entre los

resultados obtenidos en la ecuación 4.2, siempre y cuando las características de los agregados sean semejantes a los del presente estudio de investigación.

- El curado de probetas sumergidas en agua, si bien es una ventaja sobre las partículas de cemento, generó desventaja sobre las partículas de papel maché, pues se pudo evidenciar que a los 7 días de edad, dichas partículas habían absorbido bastante agua, dejando de funcionar como estructura dentro de la mezcla por la consistencia plástica que adquirió en ese periodo, por lo que se recomienda realizar una investigación basada en alternativas de curado para este tipo de hormigones.
- Para evitar que las partículas de papel maché absorban agua en el proceso de curado, sería óptimo utilizar aditivos plastificantes en el proceso de mezcla.
- El desprendimiento de las partículas de papel maché que se encontraban cerca de la superficie es habitual cuando se trabaja con agregados de menor densidad, ya que tienden a flotar en la mezcla fresca, pero no altera las prestaciones de resistencia, por lo que se recomienda un delicado vibrado al momento de vaciar el elemento para obtener mejor distribución de la mezcla.
- En lo posible se debe tratar de realizar la mayor cantidad de muestras para cada ensayo.
- Se debe utilizar agua potable sin impurezas, ni sólidos en suspensión.
- Se recomienda respetar las proporciones de cálculo, ya que son determinadas bajo las características de los agregados.
- Pese a haber obtenido bajas resistencias, se prevé que estas mejoren siempre y cuando el papel maché reciba un cuidadoso tratamiento de impermeabilización, sin embargo queda abierta la investigación para realizar diferentes tratamientos al respecto y se propone como una opción de tratamiento la inclusión de cemento como ingrediente en la mezcla de papel maché por la propiedad impermeable que este presenta dando paso a una nueva técnica conocida como papel piedra.