

**“EVALUACIÓN DE LA DENSIDAD Y LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN  
DE BLOQUES DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DEL AGREGADO DE  
PIEDRA POR DESECHOS DE LA INDUSTRIA DEL PAPEL”**

**DANIELA ÁLVAREZ MEJÍA**

**UNIVERSIDAD EAFIT**

**ESCUELA DE INGENIERÍA**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE PROCESOS**

**MEDELLÍN**

**2014**

**“EVALUACIÓN DE LA DENSIDAD Y LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN  
DE BLOQUES DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DEL AGREGADO DE  
PIEDRA POR DESECHOS DE LA INDUSTRIA DEL PAPEL”**

**DANIELA ÁLVAREZ MEJÍA**

**Proyecto de Grado para optar al título de Ingeniero de Procesos**

**Asesor:**

**Marco Valencia Ing. Met. Msc. Ph.D.**

**UNIVERSIDAD EAFIT**

**ESCUELA DE INGENIERÍA**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE PROCESOS**

**MEDELLÍN**

**2014**

Nota de aceptación:

---

---

---

---

Presidente del Jurado

---

Jurado

---

Jurado

Medellín, Junio de 2014

## **AGRADECIMIENTOS**

Cada una de las personas que tan solo con una pequeña idea pudo apoyarme en el desarrollo de este proyecto merece mis agradecimiento y ser mencionados como parte de esto.

Agradezco a Dios y a mi familia por brindarme las oportunidades necesarias para cumplir con este objetivo propuesto desde el inicio de mi formación académica como Ingeniera de Procesos.

Gracias a mi asesor, Marco Valencia, por el tiempo, la disposición, el conocimiento transmitido, el acompañamiento y el direccionamiento entregado a este trabajo de grado, sin el cual no sería posible la finalización de mis estudios de pregrado.

A la Universidad EAFIT, en especial al Departamento de Ingeniería de Procesos, gracias por la asesoría, la ayuda y la comprensión que recibí en cada una de las situaciones externas que tuvieron relación con el desarrollo de este proyecto y para las que siempre recibí una solución.

Al personal del Laboratorio de Suelos, Concretos y Pavimentos de la Universidad EAFIT un agradecimiento especial por su diligencia, por su colaboración, su amabilidad, su atención y su entera disposición en todo lo referente al trabajo experimental.

Y a todas las personas que merecen mi gratitud, un sincero reconocimiento, gracias por contribuir a terminar con éxito el presente trabajo de grado.

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	1
1. OBJETIVOS .....	3
1.1. OBJETIVO GENERAL.....	3
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	3
2. MARCO TEÓRICO .....	4
2.1. EL CONCRETO LIGERO.....	4
2.1.1. PROPIEDADES.....	4
2.1.2. DESARROLLO HISTÓRICO .....	6
2.1.3. APLICACIONES .....	7
2.2. PRODUCCIÓN DE PAPEL Y LODO DE PAPEL .....	9
2.2.1. DESARROLLO HISTÓRICO .....	9
2.2.2. PROCESO DE PRODUCCIÓN DE PAPEL .....	9
3. METODOLOGÍA.....	14
3.1. MATERIALES .....	14
3.1.1. Cantidad de Agua en relación con la cantidad de cemento (A/C).....	14
3.1.2. Cemento .....	15
3.1.3. Agregados .....	15
3.2. MÉTODOS .....	19
3.2.1. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	19
3.2.2. ELABORACIÓN DE BLOQUES.....	20
3.2.3. ANÁLISIS CUANTITATIVO: RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN .....	21
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	23
5. DISEÑO CONCEPTUAL DEL PROCESO .....	32
5.1. ESPECIFICACIONES DEL PROCESO.....	32
5.2. DIAGRAMA DE ENTRADAS Y SALIDAS .....	33
5.3. DIAGRAMA DE BLOQUES (BFD) .....	34
5.4. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO .....	35

5.5.	DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO (PFD) .....	36
5.6.	ESPECIFICACIONES DE EQUIPOS.....	39
5.7.	ANÁLISIS ECONÓMICO.....	42
6.	CONCLUSIONES .....	46
	BIBLIOGRAFÍA.....	48

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Composición química del lodo paplero.....	13
Tabla 2. Resultado Diseño de Mezclas.....	23
Tabla 3. Resistencia a la compresión a los 28 días .....	25
Tabla 4. Resultados de Densidad .....	26
Tabla 5. Resistencia a la compresión y densidad de bloques convencionales .....	30
Tabla 6. Porcentaje de variación de propiedades evaluadas.....	30
Tabla 7. Tabla de corrientes para Diagrama de flujo de proceso (PFD) .....	38
Tabla 8. Hoja de especificación Bomba – Agua de Mezcla .....	39
Tabla 9. Hoja de especificación mezcladora de concreto. ....	40
Tabla 10. Hoja de especificación compactadora de bloques .....	41
Tabla 11. Relación de salarios.....	42
Tabla 12. Valoración de equipos .....	42
Tabla 13. Relación materias primas para la producción de 1000 bloques/día .....	43
Tabla 14. Consumo de servicios para el proceso de producción.....	43
Tabla 15. Relación de costos de venta .....	44
Tabla 16. Relación de costos de logística de recolección de lodo de papel .....	44
Tabla 17. Análisis financiero para el proceso de producción de bloque de concreto con lodo de papel.....	45

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama Proceso de producción de papel .....	12
Figura 2. Distribución granulométrica agrgado fino .....	16
Figura 3. Separación y selección manual de lodo de papel.....	17
Figura 4. Recubrimiento manual con lechada de cemento .....	18
Figura 5. Secado del lo de papel. ....	18
Figura 6. Prensa manual Gracomaq.....	20
Figura 7. Mezclado. ....	24
Figura 8. Vaciado de bloques .....	24
Figura 9. Tiempo de fraguado.....	24
Figura 10. Curado de bloques .....	24
Figura 11. Relación Densidad – Resistencia a la compresión .....	28
Figura 12. Cantidad de lodo – Resistencia a la compresión a 28 días .....	29
Figura 13. Diagrama de Entradas y Salidas para la elaboración de bloques de concreto con la sustitución del agregado grueso por desechos de la industria de papel.....	33
Figura 14. BFD elaboración de bloques de concreto con la sustitución del agregado grueso por desechos de la industria de papel .....	34
Figura 15. PFD proceso de elaboración de bloques de concreto con la sustitución del agregado grueso por desechos de la industria de papel.....	37



## RESUMEN

El lodo de papel es un desecho resultante de la etapa de molino del proceso de producción de papel que por su naturaleza química, el comportamiento relacionado con ésta en la disposición final del elemento residual y por las cantidades generadas diariamente que son del orden de toneladas, ha sido considerado como objeto de estudio en la búsqueda de alternativas de uso del mismo. Empleado para la fabricación de concreto ha cobrado importancia como material ligero que favorece algunas propiedades de los bloques en la industria de la construcción.

En este proyecto se valoró la utilización del lodo papelerero en reemplazo del agregado grueso en mezclas para la elaboración de bloques de concreto. Se evaluaron las propiedades de densidad y resistencia a la compresión del material resultante y las variaciones de éstas con respecto a los valores obtenidos para las mismas variables en bloques de concreto convencionales.

Para el análisis estadístico de Diseño de Mezclas de tres componentes se establecieron como factores el porcentaje en peso de cemento, porcentaje en peso de arena de concreto y porcentaje en peso de lodo de papel. Definiendo como variable respuesta la resistencia a la compresión a los 28 días y por medio de un análisis de regresión lineal de segundo grado se encontró que el mayor valor presentado para la variable respuesta (resistencia a la compresión), se tiene para una mezcla con las siguientes proporciones en porcentaje de peso, 57% de arena de concreto, 31 % de cemento, 12 % de lodo de papel y una relación agua cemento de 0,58 con resultados de resistencia a la compresión de 2,83 MPa .

Bajo las condiciones experimentales ejecutadas se comprobaron relaciones directamente proporcionales entre las propiedades físicas (densidad) y mecánicas del material (resistencia a la compresión).

## INTRODUCCIÓN

Ante la necesidad de encontrar maneras eficientes de aprovechar los desechos industriales perjudiciales para el medio ambiente, la industria de la construcción ha iniciado en los últimos años un sinnúmero de investigaciones fundamentadas en la búsqueda y desarrollo de materiales novedosos, que con la incorporación de residuos, adquieran diferentes propiedades físicas y además características que benefician la rentabilidad de los productos.

En el proceso de producción del papel se utiliza gran cantidad de agua y se generan, a su vez, efluentes cargados de fibras de celulosa que deben ser tratados, ya sea con el fin de recircular el agua al proceso o para cumplir las políticas de gestión ambiental de las compañías; el material removido en el tratamiento de las aguas residuales forma un lodo con un contenido de sólidos entre el 3% y el 6%, que se trata, con el fin de eliminar parte del agua y llevarlo al estado sólido para facilitar su manejo; como resultado de esto, se produce una suspensión fibrosa conocida como “lodo papelerero” o torta de lodo según Gallón y Londoño (2000). Quinchía, et al, 2005 expone que la producción de este desecho en la ciudad de Medellín asciende a más de 100 toneladas diarias y su disposición se ha constituido, en los últimos años, en un problema ambiental y social, ya que por sus características físico-químicas genera riesgos de inestabilidad cuando se le dispone en suelos y adicionalmente, las grandes cantidades producidas diariamente hacen que sea considerado un residuo especial por lo que se requieren alternativas de uso y valorización diferentes (Quinchía, et al, 2007).

Por su parte, en el campo de la construcción, debido al sub-dimensionamiento de los elementos estructurales y el aumento excesivo de las cargas al utilizar materiales que incrementan el peso propio de la estructura y que llevan a un menor periodo de vida útil, se están analizando diferentes materiales compuestos que proporcionen ventajas en el aspecto económico con la reducción del peso de

los bloques usados como elementos de construcción que puede generar reducción en los costos relacionados con el transporte de materiales, requerimientos de equipos con capacidades menores (plumas, grúas, mezcladoras) y disminución de la mano de obra.

Fundamentado en lo expuesto anteriormente, este proyecto evalúa la posibilidad de desarrollar bloques para construcción a base de cemento, arena y la inclusión de desechos de la industria papelera como reemplazo del agregado grueso de la mezcla para obtener las condiciones mínimas de densidad y resistencia a la compresión requeridas por la norma técnica Colombiana NTC 4076 “Ingeniería civil y arquitectura. Unidades (Bloques y ladrillos) de concreto para mampostería no estructural interior y chapas de concreto” establecida para la elaboración de este tipo de material y pretende responder las siguientes preguntas de investigación:

- ¿Qué propiedades de los bloques de concreto se favorecen y cuáles se desfavorecen cuando se reemplaza el agregado de piedra por lodo de papel?
- ¿Cuál es la proporción adecuada de cada uno de los componentes de la mezcla para obtener un valor de resistencia a la compresión aceptable con respecto a lo establecido en la Norma Técnica Colombiana NTC 4076?
- ¿Cuál es la variación en la densidad y la resistencia a la compresión de un bloque de concreto con agregados de lodo papel con respecto a las de un bloque de concreto convencional?
- ¿Cómo es el diseño conceptual del proceso investigado y su factibilidad económica?

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1. OBJETIVO GENERAL**

Evaluar propiedades físicas y mecánicas de bloques de concreto desarrollados con residuos de la industria del papel, presentados como alternativa para la construcción y que contribuyen a la mitigación del impacto ambiental generado por este desecho.

### **1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Identificar la influencia sobre la densidad y la resistencia a la compresión de bloques de concreto cuando se reemplaza el agregado de piedra por lodo de papel en diferentes proporciones.
- Determinar, por medio de un diseño de experimentos, la proporción adecuada en porcentaje de peso de cemento, agua, lodo de papel y arena que se requiere para obtener un valor aceptable de resistencia a la compresión en bloques de concreto según la NTC 4076.
- Comparar la densidad y la resistencia a la compresión de un bloque de concreto convencional con las mismas propiedades de un bloque de concreto en el que se reemplaza el agregado de piedra por lodo de papel.
- Efectuar el diseño conceptual del proceso de elaboración de bloques de concreto en los que se sustituye el agregado grueso de la mezcla por desechos de la industria del papel (Lodo de papel).

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. EL CONCRETO LIGERO**

El concreto ligero, se define como un concreto hecho a base de agregados de peso ligero (encapsulamiento del aire). Fue conocido durante muchos años como un concreto cuya densidad superficialmente seca no fuese mayor a  $1600 \text{ kg/m}^3$ , más ligero que el concreto común que usualmente se encuentra entre los  $2400$  y  $2560 \text{ kg/m}^3$ . La característica más evidente del concreto ligero es la densidad que con frecuencia es solo una fracción de la densidad del concreto normal. Las ventajas de los materiales con baja densidad pueden enfocarse en la reducción de las cargas muertas, mayor rapidez en la construcción y menores costos de transportes y acarreos (Vélez, 2012).

#### **2.1.1. PROPIEDADES.**

Algunas características importantes del concreto ligero se enuncian a continuación:

- **Aislamiento térmico:** El concreto ligero posee un valor relativamente alto de aislamiento térmico debido a la porosidad de los materiales inorgánicos usados en su fabricación. El aislamiento térmico resulta siendo inversamente proporcional a la densidad del material (Short y Kinnburgh, 1967).
- **Propiedades acústicas:** Los elementos de concreto ligero poseen ventajas de reducción de la transmisión del sonido con respecto a materiales más

densos, debido a la absorción inherente que se proporciona en la cavidad por la existencia de cámaras de aire en la textura (Pérez, 2006).

- **Trabajabilidad:** La trabajabilidad del concreto puede definirse como la propiedad que determina el esfuerzo requerido para manipular una cantidad de mezcla de concreto fresco. En concretos normales para estructuras es necesaria la compactación del concreto, pero para el concreto ligero se obliga a que la estructura quede parcialmente compactada o porosa (Short y Kinnburgh, 1967). Tanto la cantidad de agua como la granulometría de los agregados son factores que intervienen directamente en la trabajabilidad; en este caso, la forma del agregado de lodo de papel, la finura de la arena y del cemento utilizado para la elaboración de los bloques favorecen la mezcla en relación con esta propiedad.
- **Resistencia Mecánica:** Este concreto, por su bajo módulo de elasticidad y densidad desarrolla una resistencia mecánica a compresión menor a la del concreto convencional. Esta variación se debe a la utilización del agregado liviano que tiene su propia resistencia y a que la densidad depende en la mayoría de los casos de la granulometría del árido empleado. Al aumentar la resistencia, aumenta la densidad del concreto aproximadamente en igual medida. Esto se debe a que al incrementar la resistencia disminuye la cantidad de agregados ligeros, aumentando la proporción de la masa de cemento más pesada (Short y Kinnburgh, 1967).

Según lo especificado en la norma NTC 4076, la resistencia a la compresión a los 28 días para unidades de mampostería no estructurales es de mínimo 5 MPa.

### **2.1.2. DESARROLLO HISTÓRICO**

El concreto ligero fue usado por primera vez hace 2000 años cuando los romanos usaron piedra pómez como agregado en concreto usado en notables construcciones como el Panteón (Castro, 2012).

En Estados Unidos se utilizó concreto con agregados de arcilla expandida en la construcción de barcos durante la Primera Guerra Mundial, así como también en la fabricación de bloques del mismo material que han sido empleados desde la década de los años veinte, hasta la fecha.

Aunque el concreto liviano se ha hecho más común en los últimos años, desde finales del siglo XIX ha sido empleado en Estados Unidos, Inglaterra y en muchos otros lugares no sólo para viviendas y habitaciones populares de bajo costo, sino también para ciertas estructura de edificios y monumentos como el museo británico terminado en 1907 y antes de la última guerra mundial, el concreto a base de agregados ligeros se usaba en el reino unido principalmente en la fabricación de bloques para muros que no fueran de carga. Luego, y debido a la mejor calidad del concreto obtenido con el uso de escorias espumosas como agregado, este material se empezó a utilizar también para elementos de carga y con el paso de los años fue empleado para elementos estructurales de concreto reforzado (Short y Kinnburgh, 1967).

El desarrollo a gran escala del concreto de peso ligero tuvo lugar inicialmente en Estados Unidos de Norteamérica debido a la extensión territorial del país que generaba altos costos de transporte para el movimiento en largas distancias de materiales pesados. No obstante, el concreto ligero es actualmente un material de construcción de firme aceptación en todo el mundo y debido a la evolución del mismo se ha incentivado el desarrollo de nuevos tipos de concreto ligero, como el concreto celular, y de diferentes agregados ligeros para que además de las

ventajas técnicas en la construcción, este material se constituya como una posibilidad de uso de ciertos desechos de plantas industriales (Luzardo, 2004).

### **2.1.3. APLICACIONES**

Las aplicaciones y usos del concreto ligero varían y dependen de los agregados elegidos en la fabricación del material. Generalmente es empleado para la construcción de elementos secundarios en edificios o viviendas que requieren ser ligeros a fin de reducir las cargas muertas; para colar elementos de relleno que no soporten cargas estructurales; para la construcción de vivienda con características de aislamiento térmico.

- **Concreto Estructural:** El uso del concreto ligero busca fundamentalmente reducir las cargas muertas de estructuras, lo que permite además la reducción del tamaño de columnas, zapatas y otros elementos de carga en la cimentación particularmente. Este sería un beneficio financiero directo que puede cuantificarse con bastante aproximación al reducirse el consumo de acero y el peso de la estructura en sí, debido a un ahorro en el diseño de la cimentación y de la estructura de soporte. Entre otros beneficios, se encuentra el ahorro asociado a la disminución en los costos de transporte de materiales y la facilidad de la operación en el sitio de construcción relacionada con el incremento del rendimiento de la mano de obra (menor esfuerzo humano) (Valdez, et al, 2010).
- **Aislante térmico:** Un aislante térmico es un material caracterizado por su alta resistencia térmica; establece una barrera al paso del calor entre dos medios que naturalmente tenderían a igualarse en temperatura. En los hormigones livianos, el coeficiente de conductividad térmica decrece al disminuir la densidad del concreto que siendo poroso encierra cantidades considerables de aire que dificultan el paso del calor a través del material (Valdez, et al, 2010).



- **Aislante acústico:** La absorción de sonido en los concretos ligeros se debe a la existencia de cámaras o espacios de aire en la estructura del material que hacen que éstos ofrezcan resistencia al paso del sonido (Valdez, et al, 2010).
- **Estructura resistente al fuego:** La resistencia al fuego se define como el tiempo durante el cual el muro de concreto es capaz de constituir una pantalla contra las llamas y los humos, sin sobrepasar la temperatura superficial de la cara no expuesta, de 150°C. En el concreto ligero esta característica se ve favorecida debido a que posee un bajo coeficiente de dilatación y una elevada aislación térmica. Hoy en día existen una gran variedad de tipos de recubrimiento de hormigón ligero, los cuales por sus buenas propiedades de aislamiento térmico proporcionan una protección eficiente (Valdez, et al, 2010).
- **Prefabricados:** Los prefabricados de concreto son elementos compuestos realizados en una fábrica o complejo industrial sobre el terreno y, posteriormente, instalados, en su posición final. El uso más común de prefabricados de concreto con agregados de peso ligero es en forma de bloques de mampostería utilizados para la construcción de muros de carga y sin carga o muros divisorios (Valdez, et al, 2010). Los bloques de concreto ligero son principalmente usados como materiales de construcción de paredes. La mayoría, tienen una o más cavidades y sus lados pueden ser planos o con algún diseño (Castro y Vásquez, 2009). La producción de bloques de concreto consta cinco (5) etapas básicas que son la **dosificación** en la que se definen las proporciones de agregados que conformarán la mezcla, el **mezclado** que puede realizarse manual o mecánico, el **moldeado** en el que se da a la pieza la forma deseada o requerida, el **fraguado** que es la reacción química entre el agua y el cemento durante la cual la mezcla se endurece y pierde la plasticidad y finalmente, la etapa del **curado** que consiste en mantener la humedad de los bloques para permitir que continúe la reacción química del cemento y el

agua con el fin de obtener una buena calidad y resistencia especificada (Freyre y Deza, 2001).

## **2.2. PRODUCCIÓN DE PAPEL Y LODO DE PAPEL**

### **2.2.1. DESARROLLO HISTÓRICO**

El papel empezó a fabricarse en China hacia el año 105 antes de Cristo y su uso se extendió por algunos países de Asia entre los años 500 y 900. El empleo del papel fue introducido en Europa por los árabes y la primera fábrica de papel en este continente fue construida en 1151 en España. Con la introducción de la imprenta de tipos móviles y la reducción de los costos de impresión de libros, se estimuló la fabricación del papel y la demanda comenzó a crecer en la segunda mitad del siglo XVIII, razón por la cual comenzaron a buscarse diferentes fuentes de fibra, constituyendo la fibra de madera como la materia prima principal para hacer papel. La primera máquina eficiente para la etapa de moldeado fue creada en 1798 por el francés Nicolas Louis Robert y mejorada por los hermanos Henry y Sealy Fourdrinier. Adicionalmente, se introdujo el proceso de trituración de madera para fabricar pulpa y el primer proceso químico para la producción de pulpa, hechos que favorecieron notablemente la industria papelera. En la actualidad, Estados Unidos y Canadá son los mayores productores mundiales de papel, pulpa y productos papeleros (Vélez, 2012).

### **2.2.2. PROCESO DE PRODUCCIÓN DE PAPEL**

El proceso de producción de papel inicia con la preparación de la materia prima; los materiales más usados son los trapos de algodón o lino y la pulpa de madera. La preparación de ésta última para la fabricación del papel puede efectuarse triturando los bloques de madera con una muela abrasiva giratoria que va

arrancando las fibras o efectuando procesos de tipo químico en los que las astillas de madera se tratan con disolventes que eliminan la materia resinosa, la lignina y dejan fibras puras de celulosa. El proceso al sulfato o “Kraft” es el más difundido para la obtención de pulpa a partir de madera; en éste la madera astillada y tamizada es dispuesta en un tanque digestor en el que tienen lugar una serie de reacciones químicas complejas que hidrolizan, mediante reactivo alcalinos, determinados enlaces de la lignina, sin degradar las fibras celulósicas. Cuando la digestión ha finalizado los productos finales son una pulpa cruda de color café o de licor negro (mezcla de material inorgánico y reactivos sobrantes) que luego es sometida a diferentes operaciones para su depuración y blanqueo, dependiendo de su destino o su uso.

La primera etapa consiste en trocear o desmenuzar la materia prima en agua para formar una suspensión de fibras individuales y formar láminas de fibras entrelazadas extendiendo dicha suspensión sobre una superficie porosa adecuada que pueda filtrar el agua sobrante para obtener una hoja húmeda, delgada, ancha, uniforme y con todos los componentes homogéneamente distribuidos (Valiente, 2013).

Esta operación es llevada a cabo en un molde papelerero; una tela metálica reforzada con mallas cuadradas o rectangulares puesto en un bastidor móvil de madera. El molde y el bastidor se sumergen en la pastas de las fibras de celulosa hasta que la superficie quede cubierta por una delgada película de pasta. Se realiza agitación en todos los sentidos de manera que la mezcla se distribuya uniformemente y que se entrelacen fibras adyacentes. A continuación se deja descansar el molde con la hoja de papel mojado hasta que ésta tiene la cohesión requerida para ser retirada del bastidor y depositada sobre una capa de fieltro; se pone otro fieltro sobre la hoja y así sucesivamente hasta tener una pila de hojas alternadas con fieltros que pasan a la prensa hidráulica (Vélez, 2012).

En la operación de prensado, el objetivo principal es remover al máximo el agua antes del secado. En esta sección la hoja es transportada en contacto con un fieltro (“pañó”), el cual consiste en un tejido con alto poder de absorción que gira alrededor de los rodillos de prensado. Estos rodillos aplican presión sobre el papel para extraer el agua que inmediatamente es absorbida por el paño; una vez que el papel deja el fieltro pasando a la siguiente etapa, el agua absorbida es eliminada en el circuito de regreso del paño. El proceso de prensado se repite varias veces, variando el orden y la posición de las hojas; esto se conoce como intercambio y su repetición mejora la superficie del papel terminado.

La etapa final de la fabricación del papel es el secado en el que se utiliza calor para remover la última porción de agua restante en la hoja; se busca evaporar el agua presente en el papel mediante un proceso de cambio de fase, de líquido a vapor.

Finalmente el papel seco sale del cilindro y forma un rollo de papel de gran magnitud, rollo jumbo, que posteriormente será procesado para producir los diferentes tipos de papel (Valiente, 2013).

La Figura 1 describe gráficamente el proceso descrito.

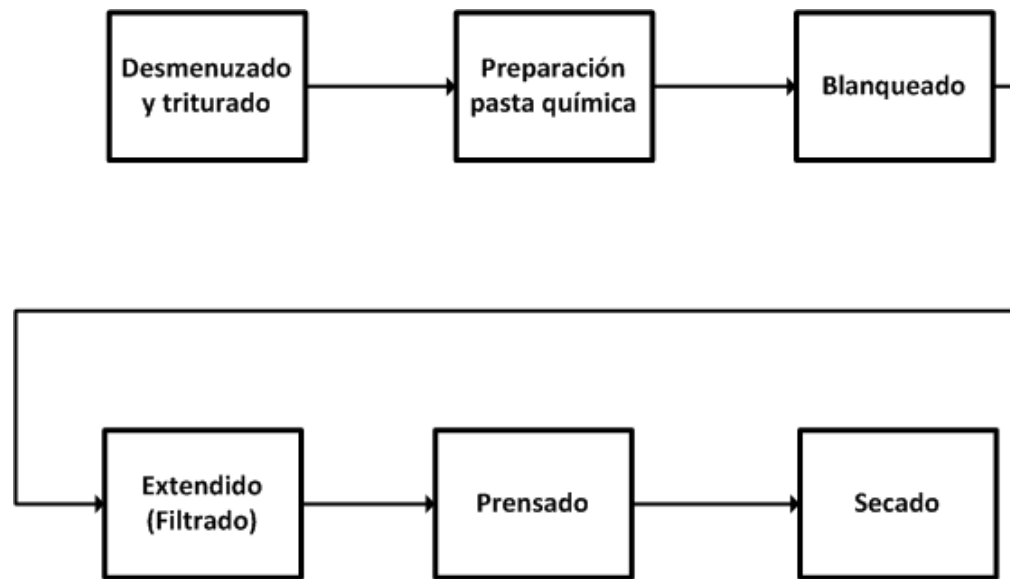


Figura 1. Diagrama Proceso de Producción de Papel

Los lodos de papel son residuos generados por las fábricas papeleras y proceden de la etapa de molino del proceso de producción de papel. La cantidad de lodos generados varía de planta en planta y depende del tipo de acabado utilizado y del producto final fabricado.

La composición del lodo es función de la materia prima, el proceso de fabricación, los productos químicos empleados, los productos finales, las técnicas del tratamiento de aguas residuales, el papel reciclado, el grado de papel para la alimentación de las operaciones de reciclado y el número y tipos de fases de limpieza utilizados. Sin embargo, en términos generales, el lodo generado está compuesto básicamente por materiales celulósicos, arcillas, materiales húmicos, productos químicos de la coagulación y microorganismos (Quinchía, et al, 2007). Los lodos son principalmente las fibras de celulosa generadas al final del proceso de fabricación de la pasta antes de entrar a la máquina de papel y proceden de la planta de tratamiento de aguas residuales compuestas generalmente de un 50% a 75% de orgánicos y de un 30% a 50% de arcilla (caolinita) (Vélez, 2012). La Tabla

1 expone las composiciones químicas de lodos provenientes del destintado de papel

Tabla 1. Composición química del lodo paplero

Composición química (% en masa)		Composición mineralógica y materia orgánica (% en masa)	
Pérdida por calcinación	47.62	Materia Orgánica	29.20
CaO	19.82	Calcita	35.30
SiO <sub>2</sub>	18.01	Caolinita	20.83
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.14	Talco	6.85
MgO	2.58	Cuarzo	1.71
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.55	Componentes minoritarios (clorita, micas...)	1.71
SO <sub>3</sub>	0.33		
Na <sub>2</sub> O	0.25		
TiO <sub>2</sub>	0.26		
K <sub>2</sub> O	0.21		
P <sub>2</sub> O <sup>b</sup>	0.10		

Fuente: (Vegas, et al, 2006)

El espectro de absorción de lodos de papel provenientes de la empresa Familia Sancela S.A. que utiliza para su proceso pulpa importada virgen y pulpa proveniente de papeles reciclados que tienen tinta incorporada y que por lo tanto generan lodos "Deinking Paper Sludge, permite caracterizar el lodo como un material con contenido de grupos carboxilos y cadenas cerradas de carbono sin dobles enlaces, lo que posiblemente está asociado a las moléculas de celulosa presentes en el mismo. Los análisis instrumentales también realizados al mismo material evidencian la heterogeneidad del lodo en cuanto a tamaño, forma y la existencia tanto de fracciones de celulosa como hemicelulosa y de múltiples sustancias y elementos como sílice y calcio, entre otros. Se estableció que la

densidad del lodo es de  $1,6902 \pm 0,0024 \text{ g/cm}^3$  y su área superficial de  $11,84 \text{ m}^2/\text{g}$ . (Quinchía y Valencia, 2013)

### **3. METODOLOGÍA**

La metodología presenta detalladamente el trabajo experimental efectuado en el laboratorio en el que se fundamenta el desarrollo de este proyecto en la búsqueda del cumplimiento de los objetivos propuestos.

#### **3.1. MATERIALES**

##### **3.1.1. Cantidad de Agua en relación con la cantidad de cemento (A/C)**

Cualquiera sea la mezcla de materiales, el refuerzo del concreto dependerá de las condiciones de curado que están determinadas por la cantidad de agua utilizada en relación con la cantidad de cemento.

Para la determinación de la relación agua/cemento, se estableció como punto de partida una mezcla de cemento, arena y lodo de papel con una relación de volumen de 1:2:2 respectivamente. Los materiales en esta mezcla fueron usados en su estado totalmente seco y para los agregados fino y grueso (arena y lodo de papel) fue determinada la propiedad de absorción de acuerdo con los procedimientos especificados en la Norma Técnica Colombiana NTC 176 “Ingeniería Civil y Arquitectura. Método de Ensayo para determinar la densidad y la absorción del agregado grueso” y en la Norma Técnica Colombiana NTC 237 “Ingeniería Civil y Arquitectura. Método de Ensayo para determinar la densidad y la absorción del agregado fino”. A la mezcla base se adicionó la cantidad de agua suficiente para lograr una contextura óptima que garantice la compactación del bloque; así, calculando el total de agua agregada, restando la cantidad de ésta

que fue absorbida por los agregados según los valores obtenidos para el porcentaje de absorción de cada uno y las cantidades de los mismos presenten en la mezcla, y determinando esta cantidad de agua final con respecto a la cantidad de cemento, fue calculada y fijada una relación agua/cemento igual a 0,58.

### **3.1.2. Cemento**

Algunas características del concreto fresco o endurecido tienen una relación directa con el cemento empleado en la mezcla. Propiedades como cohesión, manejabilidad, adquisición de resistencia mecánica, asentamiento, pérdida de revenimiento, tiempo de fraguado, entre otras dependen de la finura de las partículas del sólido.

El cemento empleado en la mezcla es tipo Portland de uso general (Tipo I) producido por la empresa Argos, Colombia con las especificaciones establecidas en la norma técnica Colombiana NTC 121 y NTC 321.

### **3.1.3. Agregados**

La granulometría de una base de agregados se define como la distribución del tamaño de sus partículas, ésta característica, así como el tamaño de los agregados cobran importancia debido al efecto que tienen sobre la dosificación, trabajabilidad, economía, porosidad y contracción del concreto. La granulometría se determina por norma para el agregado grueso y el agregado fino.

Los agregados también tienen un grado de humedad directamente relacionado con la porosidad de las partículas que según la literatura pueden pasar por cuatro estados:

- Totalmente seco: Se logra mediante un secado al horno a 110°C por 24 horas.



- Parcialmente seco: Secado mediante exposición al aire libre.
- Saturado y superficialmente seco (SSS): Estado límite en el que los agregados tienen todos sus poros llenos de agua pero superficialmente se encuentran secos.
- Totalmente húmedo: Las partículas de los agregados están llenas de agua y además existe agua libre superficial

Para ambos agregados fue determinado el porcentaje de humedad de acuerdo con la Norma Técnica Colombiana NTC 1776 “Determinación del contenido de humedad total”.

### 3.1.3.1. Agregado Fino

En la mezcla fue usada arena de concreto, denominada en su clasificación según su procedencia como arena artificial. Para este material se determinó un valor para el porcentaje de absorción igual a 6,5% y un porcentaje de humedad igual a 6,4%. La granulometría del material se presenta en la Figura 2.

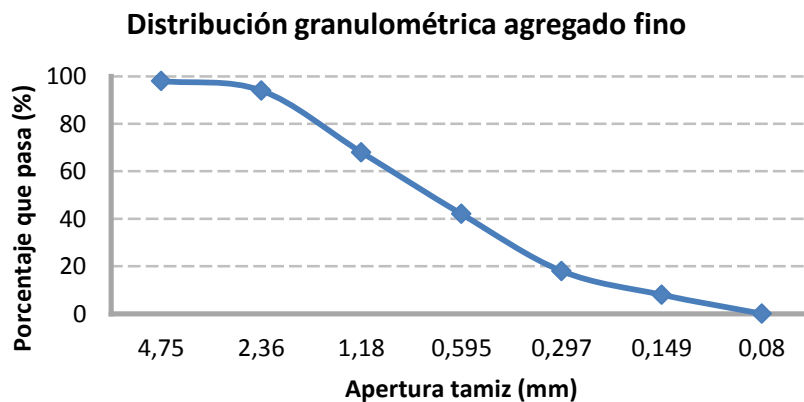


Figura 2. Distribución granulométrica agregado fino

### 3.1.3.2. Agregado grueso

Los lodos papeleros utilizados como agregado grueso fueron aportados por la empresa Familia Sancela S.A. (Medellín, Colombia). Estos lodos se conocen como deinking paper sludge provenientes del Molino de Deink; son sólidos desecados de la clarificación primaria.

Antes de ser usado en la mezcla el lodo paplero fue preparado; en primer lugar, se realizó una separación y selección manual de material para la obtención de partículas de aproximadamente 1-1.5cm de diámetro, como se muestra en la Figura 3:



Figura 3: Separación y selección manual de lodo de papel

Posteriormente, el material separado fue recubierto manualmente con una lechada de cemento y secado a temperatura ambiente durante 28 días (como se muestra en las Figuras 4 y 5) para garantizar el endurecimiento máximo de la cubierta, de tal forma que este material pudiera simular la presencia de agregado de piedra en la mezcla.



Figura 4. Recubrimiento manual con lechada de cemento



Figura 5. Secado del lodo de papel.

Para el material obtenido, usado como agregado grueso en la mezcla, se hallaron las propiedades de absorción y humedad con un valor de 69% para el porcentaje de absorción y de 8,29% para el porcentaje de humedad.

## **3.2. MÉTODOS**

### **3.2.1. ANÁLISIS ESTADÍSTICO**

El diseño de experimentos es esencialmente una estrategia para la planificación de experimentos, de manera que las condiciones relevantes sean alcanzadas en forma eficiente (Napolitano, 2010). Para optimizar las propiedades físicas (densidad) y mecánicas (resistencia a la compresión) de los bloques se empleó la metodología de diseño de mezclas; esta es una clase especial de experimento en la cual la respuesta depende solamente de las proporciones relativas de los factores y que requiere conocer los factores relevantes, los rangos de variación, el número apropiado de niveles, los métodos y unidades de medición adecuadas para cada factor (Vélez, 2012). La importancia de este método es que permite utilizar el mínimo número de experimentos con reducción en el costo y tiempo de ensayos, obtener la información del sistema dentro de los intervalos de cada componente y determinar la composición adecuada de cada uno con respecto a la resistencia a la compresión (Hurtado, et al, 2003).

En el diseño de mezclas se consideraron los siguientes factores: porcentaje de peso de cemento, arena y lodo de papel. Como variable respuesta se empleó la resistencia a la compresión por dos razones básicas: porque es la propiedad de uso más importante del concreto en el sector de la construcción y porque es una variable cuantitativa que se puede determinar con una precisión adecuada.

### 3.2.2. ELABORACIÓN DE BLOQUES

La elaboración de los bloques de concreto siguió un proceso convencional con las etapas de dosificación, mezclado, moldeado, fraguado y curado.

Tanto la dosificación como el mezclado se realizaron manualmente con las cantidades de componentes especificados por el diseño de experimentos. Para cada uno se elaboraron 3 réplicas de manera que se garantice la validez del mismo. El moldeado de la mezcla para la obtención del bloque se llevó a cabo en una prensa manual GracoRam para la elaboración de adobes mostrada en la Figura 6.



Figura 6. Prensa Manual GracoRam

El fraguado, etapa en la cual comienza el endurecimiento del concreto, se realizó por 24 horas para luego iniciar el proceso de curado en el cual los bloques fueron envueltos en un película plástica de manera que se redujera la evaporación del agua y pudiera favorecerse la reacción entre el agua y el cemento para así aumentar la resistencia a la compresión.

### **3.2.3. ANÁLISIS CUANTITATIVO: RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN**

La resistencia a la compresión de los bloques fue medida de acuerdo con lo especificado en la norma NTC 4024 “Prefabricados de concreto, muestro y ensayos de prefabricados no reforzados, vibrocompactados”. El ensayo consiste en ejercer presión sobre la pieza de concreto en una máquina de ensayos de compresión y el cálculo se realiza a partir de la carga de ruptura dividida entre el área de la sección que resiste la carga. La prueba se llevó a cabo en una prensa hidráulica ELE EL 32-350/2 para una edad de los bloques de 28 días ( $R_{28}$ ) debido a que en condiciones normales el bloque alcanza más del 90% de dureza y teniendo en cuenta que la variable respuesta es la resistencia a la compresión, se garantiza que a los 28 días se obtendrá el mayor valor posible para dicha variable.

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se elaboró un diseño de mezclas con los factores (componentes de la mezcla) y sus respectivos niveles. Dichos niveles fueron establecidos con base en la literatura y en las restricciones mismas del modelo experimental para un ajuste por regresión de segundo orden sistematizado con STATGRAPHICS. El diseño arrojó un total de 4 experimentos expuestos. Para una dosificación de 7,5 kg totales de mezcla, la Tabla 2 expone el contenido en porcentaje en peso de cada uno de los componentes:

Tabla 2. Resultado Diseño de Mezclas

	<b>% Peso Arena</b>	<b>% Peso Cemento</b>	<b>% Peso Lodo de Papel</b>
<b>Experimento 1</b>	57	31	12
<b>Experimento 2</b>	55	33	12
<b>Experimento 3</b>	57	18	25
<b>Experimento 4</b>	42	33	25

Para la evaluación de la densidad y la resistencia a la compresión se realizaron 12 bloques (3 réplicas por cada experimento) con dimensiones de 30 cm de largo, 15 cm de ancho y 10 cm de alto. Cada pieza fue vaciada en las proporciones indicadas y para ambos agregados se realizó la corrección de humedad para el recálculo de la cantidad de agua de la mezcla que garantizara una relación agua/cemento igual a 0,58. Se realizó la compactación en la prensa hidráulica y el bloque se dejó a temperatura ambiente por más o menos 24 horas, para luego ser envuelto en un película plástica de papel y pasar a la etapa de curado, también a temperatura ambiente, por un periodo de 28 días. El procedimiento experimental real se muestra en la figuras 7 a 10.



Figura 7. Mezclado



Figura 8. Vaciado de Bloques



Figura 9. Tiempo de Fraguado



Figura 10. Curado de Bloques

Los bloques fueron fallados después de un periodo de curado de 28 días para la medición de la resistencia a la compresión (variable respuesta). La Tabla 3 expone los resultados de dicha propiedad mecánica:



Tabla 3. Resistencia a la Compresión a los 28 días

Experimento 1			
Réplica	Área (mm <sup>2</sup> )	Carga (N)	Resistencia a la Compresión (MPa)
1	37784,38	93000,00	2,46
2	37799,46	120400,00	3,19
3	38570,94	109500,00	2,84
Resistencia Promedio (MPa)			<b>2,83</b>
Experimento 2			
Réplica	Área (mm <sup>2</sup> )	Carga (N)	Resistencia a la Compresión (MPa)
1	38525,39	84600,00	2,20
2	37995,70	96400,00	2,54
3	38540,38	82200,00	2,13
Resistencia Promedio (MPa)			2,29
Experimento 3			
Réplica	Área (mm <sup>2</sup> )	Carga (N)	Resistencia a la Compresión (MPa)
1	39028,74	43200,00	1,11
2	38966,78	36000,00	0,92
3	38721,50	42700,00	1,10
Resistencia Promedio (MPa)			1,04
Experimento 4			
Réplica	Área (mm <sup>2</sup> )	Carga (N)	Resistencia a la Compresión (MPa)
1	37799,31	54000,00	1,43
2	38039,90	48600,00	1,28
3	38130,83	58300,00	1,53
Resistencia Promedio (MPa)			1,41

La Norma Técnica Colombiano NTC 4076 “Ingeniería civil y arquitectura. Unidades (Bloques y Ladrillos) de concreto, para mampostería no estructural interior y chapas de concreto”, especifica que la resistencia a la compresión a los 28 días evaluada sobre el área neta promedio debe ser de mínimo 5 MPa para unidades individuales; como variable respuesta, y de acuerdo con lo anterior, se evidencia que para ninguna de las mezclas se obtuvo el valor de resistencia requerido; sin embargo, la mezcla que entrega el mayor valor para la variable respuesta es la proporcionada en el experimento 1 con una dosificación por porcentaje en peso de

31% de Cemento Portland Tipo I, 57% de Arena de Concreto, 12% de Lodo de Papel y una relación agua/cemento igual a 0,58 con una resistencia promedio de las réplicas correspondientes a dicha mezcla igual a 2,83 MPa. En los experimentos 3 y 4 el porcentaje en peso del componente de lodo fue la variable influyente en los resultados de resistencia a la compresión muy bajos y alejados del mínimo permitido por la norma correspondiente a las especificaciones de este tipo de material.

En la Tabla 4 se muestran las densidades de los bloques para cada uno de los experimentos:

Tabla 4. Resultados de Densidad.

Experimento 1			
Réplica	Volumen (m <sup>3</sup> )	Peso (kg)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
1	0,0039	5,67	1442,90
2	0,0040	6,05	1515,67
3	0,0041	6,42	1577,69
Densidad Promedio (kg/m <sup>3</sup> )			1512,09
Experimento 2			
Réplica	Volumen (m <sup>3</sup> )	Peso (kg)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
1	0,0041	7,12	1741,88
2	0,0040	7,44	1864,87
3	0,0041	7,56	1863,83
Densidad Promedio (kg/m <sup>3</sup> )			1823,53
Experimento 3			
Réplica	Volumen (m <sup>3</sup> )	Peso (kg)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
1	0,0041	5,77	1390,78
2	0,0041	5,13	1259,81
3	0,0041	5,11	1249,70
Densidad Promedio (kg/m <sup>3</sup> )			<b>1300,10</b>
Experimento 4			
Réplica	Volumen (m <sup>3</sup> )	Peso (kg)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
1	0,0039	5,61	1431,20
2	0,0040	5,42	1370,02
3	0,0039	5,73	1477,60
Densidad Promedio (kg/m <sup>3</sup> )			1426,27

Según su peso, se establecen 3 clases de unidades de mampostería no estructural (NTC 4076):

- De peso liviano, con una densidad menor de  $1680 \text{ kg/m}^3$
- De peso medio, con una densidad entre  $1680 \text{ kg/m}^3$  y  $2000 \text{ kg/m}^3$
- De peso normal, con una densidad mayor de  $2000 \text{ kg/m}^3$

Partiendo del objeto de aligerar los bloques de concreto empleando un desecho de la industria del papel se obtienen resultados que exponen una disminución en la densidad para todos los experimentos clasificados según los valores de densidad en unidades de peso liviano (experimentos 1, 3 y 4) y de peso medio (experimento 2). El material con el menor valor para la variable densidad es el resultante del experimento 3, hecho que se justifica en que es la mezcla que posee la mayor proporción del componente de lodo y la menor relación cemento/lodo. No obstante, y en relación con los resultados de resistencia a la compresión, de ninguna de las mezclas puede obtenerse un bloque de concreto que pueda usarse en aplicaciones de mampostería no estructural.

- **Análisis de Relación Densidad – Resistencia a la Compresión:**

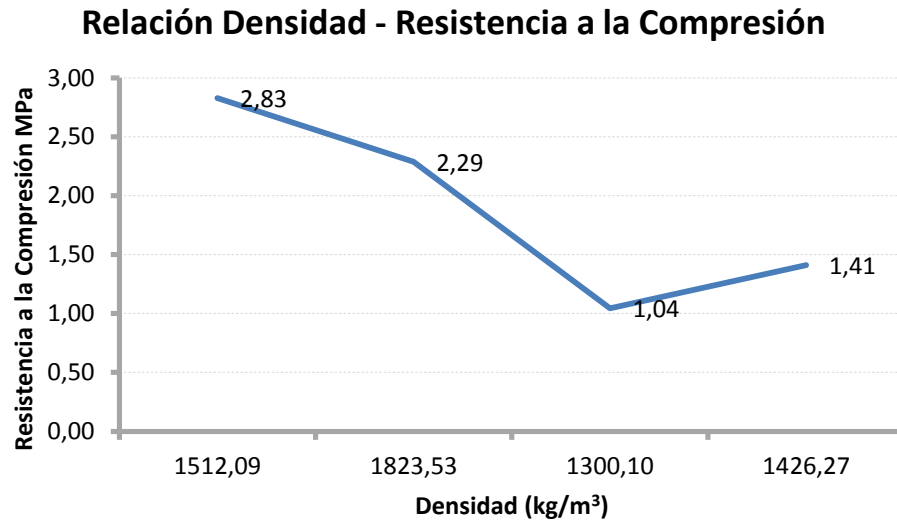


Figura 11. Relación Densidad-Resistencia a la Compresión

La figura 11 expresa el comportamiento de la relación existente entre las variables de resistencia a la compresión a los 28 días y densidad. Dicha interacción directamente proporcional se relaciona con la estructura parcialmente compactada o porosa generada por la adición de agregados livianos al concreto que produce disminución en la resistencia mecánica del material. La resistencia a la compresión aumenta conforme incrementa la cantidad de cemento (más pesado) y proporcionalmente disminuye la cantidad de lodo en la mezcla. Este comportamiento de resistencia mecánica, con respecto a la cantidad del componente de lodo en la mezcla, se evidencia en la Figura 12 que muestra valores de resistencia mecánicas mayores para las mezclas con menores proporciones de lodos y que a su vez varía, para la misma cantidad de lodo en la mezcla de acuerdo con la variación en el componente de cemento.

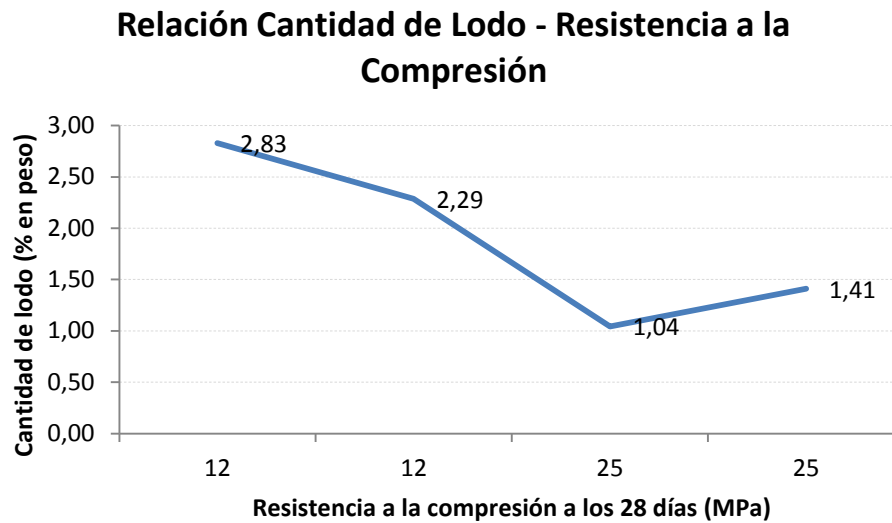


Figura 12. Relación Cantidad de Lodo – Resistencia a la Compresión a 28 días

Se evaluaron las variaciones de algunas propiedades físicas (Densidad) y mecánicas (Resistencia a la compresión a 28 días) de bloques de concreto elaborados con la sustitución del agregado grueso por residuos de la industria del papel con respecto a las mismas propiedades de bloques de concreto convencionales. Para tal fin se realizaron 4 bloques con las proporciones de componentes correspondientes a los datos entregados por el diseño de mezclas para cada experimento en los que se reemplazó el lodo de papel por grava de río con tamaño de partícula de 3/8. Los componentes fueron usados en sus condiciones normales de humedad y la cantidad de agua presente en cada mezcla fue determinada durante el proceso mismo de mezclado cuando se observaban las características que garantizaran la compactación del material.

Los resultados de resistencia a la compresión y densidad para cada tratamiento son expuestos en la Tabla 5:

Tabla 5. Resistencia a la compresión y densidad de bloques convencionales

Convencional 1				
Área (mm <sup>2</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Carga (N)	Resistencia a la Compresión (MPa)
37438,20	0,00381	2129,25	1003000,00	26,79
Convencional 2				
Área (mm <sup>2</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Carga (N)	Resistencia a la Compresión (MPa)
38282,93	0,00377	2062,92	940200,00	24,56
Convencional 3				
Área (mm <sup>2</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Carga (N)	Resistencia a la Compresión (MPa)
37437,99	0,0037	1988,83	354600,00	9,47
Convencional 4				
Área (mm <sup>2</sup> )	Volumen (m <sup>3</sup> )	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Carga (N)	Resistencia a la Compresión (MPa)
37468,19	0,0038	1973,95	528500,00	14,11

Comprobando lo descrito por la teoría, existe una relación directamente proporcional entre la densidad y resistencia a la compresión a los 28 días y los valores de estas variables son mayores para los tratamientos con más proporción de cemento en la mezcla.

Los porcentajes de variación entre los bloques de concreto ligero y los de concreto convencional para las propiedades evaluadas son indicados en la Tabla 6.

Tabla 6. Porcentaje de variación de propiedades evaluadas.

	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3	Experimento 4
% Variación Densidad	28,98%	11,60%	34,63%	27,75%
%Variación Resistencia a la Compresión	89,44%	90,68%	88,97%	89,99%

En cuanto a la densidad, el mayor porcentaje de variación se presenta para el experimento 3 lo que indica que existen diferencias significativas para esta propiedad cuando se sustituye el agregado de piedra por lodo de papel en la elaboración de bloques de concreto y fundamentado en el objetivo de aligeramiento del material, este valor muestra que las composiciones de mezcla

del tratamiento 3 son las que mejor favorecen la propiedad relacionada con el peso y en consecuencia, representa las ventajas definidas para el concreto ligero.

Las variaciones relacionadas con la resistencia a la compresión a los 28 días son bastante significativas y esto es debido a la naturaleza y el uso mismo de los materiales resultantes en ambos casos (concreto con lodo de papel y concreto convencional); los que se han hecho sustituyendo el agregado grueso por lodo de papel, por la naturaleza del material empleado y en relación con su densidad, presentan valores mucho menores para esta propiedad mecánica que además, por las condiciones expuestas en la NTC 4076, no alcanzan siquiera el valor mínimo de resistencia para unidades de mampostería No estructural (5 MPa) que ya presenta diferencias considerables con el valor requerido para esta propiedad en los casos de uso de mampostería estructural.

## 5. DISEÑO CONCEPTUAL DEL PROCESO

Aunque ninguna de las mezclas evaluadas presenta la resistencia a la compresión mínima requerida para usar el material en mampostería no estructural, el diseño conceptual del proceso se realiza para el experimento que arrojó el mayor valor para ésta, que se definió como la variable respuesta.

### 5.1. ESPECIFICACIONES DEL PROCESO

**Especificaciones de las materias primas:** Las materias primas para la elaboración de bloques son Cemento Portland Tipo I, Arena de Concreto, Lodo de Papel preparado como se describió en la metodología y agua.

**Características de ubicación de la planta (Medellín, Antioquia, Colombia):**

Condiciones climáticas: El lugar donde se ubicará la planta cuenta con un periodo seco dentro de la estación de lluvia, que es desde junio hasta septiembre y los meses con mayor lluvia son mayo y octubre.

El clima es templado.

**Capacidades:** La planta se instalará para la producción de 1000 Bloques/Día trabajando 24 horas al día.

**Servicios industriales disponibles:**

Energía eléctrica: Se obtiene la energía eléctrica de EPM para el funcionamiento de los equipos.

Agua potable: Como materia prima del proceso y para el consumo del personal de la planta, proporcionada por EPM.



### Normas para codificar:

Equipos: Los equipos se pueden codificar mediante la norma ISO 10628. La norma ISA tiene unos estándares y símbolos que son importantes para los P&IDs (Diagramas de Instrumentación y Tuberías) y para los documentos que describen el control del sistema.

## 5.2. DIAGRAMA DE ENTRADAS Y SALIDAS

Una aproximación inicial al proceso se puede hacer mediante la elaboración u observación del diagrama de entradas y salidas, que consiste básicamente en un cuadro central que representa el proceso a llevar a cabo, al lado izquierdo del cual se ubican las materias primas y a la derecha los productos, sin incluir balances de masa y energía ni especificar los servicios industriales. Es el diagrama más sencillo para la representación de los procesos (Turton et al, 2003). En la Figura 13 se presenta este diagrama para la elaboración de bloques de concreto con la sustitución del agregado grueso por desechos de la industria de papel.

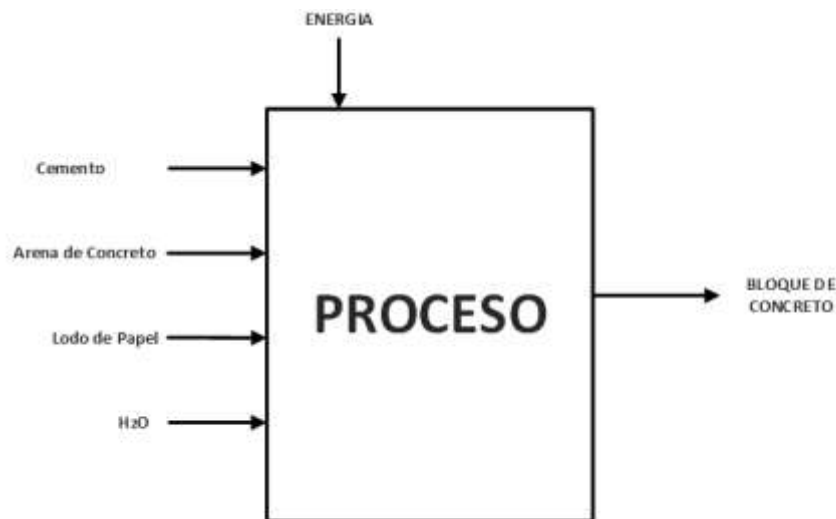


Figura 13. Diagrama de Entradas y Salidas para la elaboración de bloques de concreto con la sustitución del agregado grueso por desechos de la industria de papel.

### 5.3. DIAGRAMA DE BLOQUES (BFD)

El diagrama de bloques, consiste en una serie de bloques conectados mediante las corrientes de entradas y salidas de cada bloque en un orden específico y que identifica o indica el sentido y flujo del proceso, es decir, la sucesión de etapas que se siguen en el desarrollo del proceso. No tiene muchos detalles con respecto a la complejidad del subproceso representado por cada bloque, debido a que en cada uno pueden intervenir varios equipos, sin embargo, este diagrama es un paso inicial antes de llegar al mayor grado de detalle que se tiene en el diagrama de flujo del proceso (PFD). Los diagramas de bloques proporcionan información más detallada con relación a lo que se tiene en uno de entradas y salidas, y puede brindar la información para conocer y explicar el proceso de manera simple sin entrar en gran grado de detalle, sirviendo como un instructivo (Turton et al, 2003). El diagrama de bloques para el proceso de elaboración de bloques de concreto con la sustitución del agregado grueso por desechos de la industria de papel se muestra en la Figura 14.

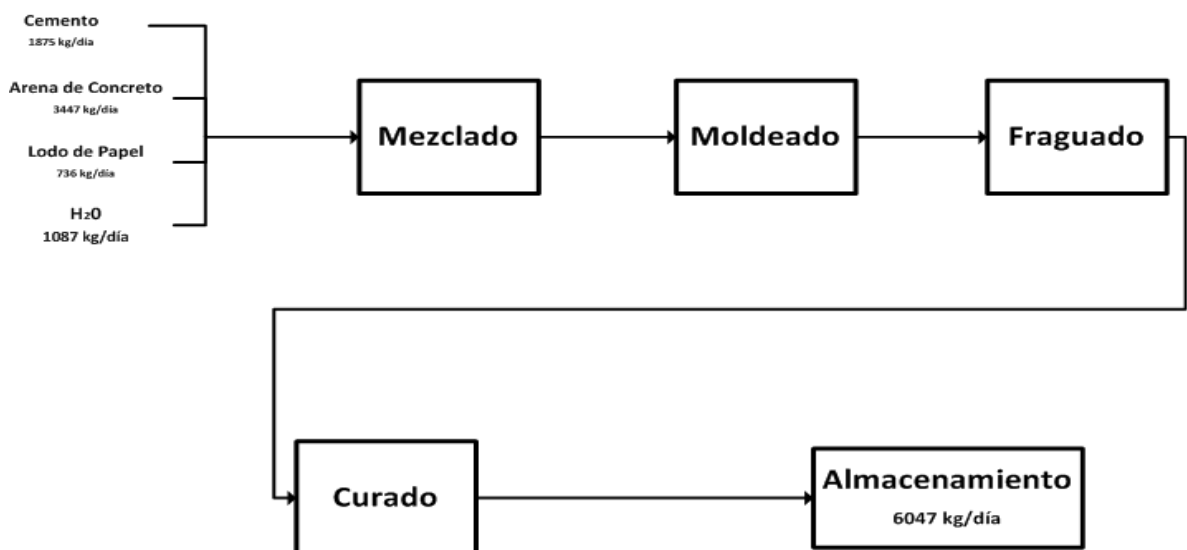


Figura 14. BFD proceso de elaboración de bloques de concreto con la sustitución del agregado grueso por desechos de la industria de papel

#### **5.4. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO**

El proceso de la elaboración de bloques de concreto inicia con la dosificación automática de las cantidades de cada componente de la mezcla (cemento, arena de concreto, lodo de papel y agua); 1875 kg de cemento, 3447 kg de arena de concreto, 736 kg de lodo de papel y 1087 kg de agua en condiciones totalmente secas a una temperatura de 25 °C son llevados a una mezcladora de concreto con una agitación constante de 100 rpm durante 5 minutos aproximadamente.

La mezcla resultante de concreto en estado fresco es introducida en una vibrocompactadora (C-101) que se encarga de comprimir el material en los moldes definidos para la fabricación de bloques de acuerdo con las especificaciones de diseño requeridas para las piezas de mampostería. El producto de esta etapa (bloque en estado fresco) es dispuesto en unas placas metálicas que son transportadas hasta los andamios metálicos (S-101) en los que se lleva a cabo el fraguado y el curado del material durante 28 días con condiciones de temperatura ambiente. Durante el curado sucede la reacción de hidratación del cemento en la que, de acuerdo con las condiciones ambientales, puede evaporarse aproximadamente el 40% de la cantidad total de agua que no reacciona con el componente de cemento.

Los bloques son finalmente estibados y empacados para ser almacenados y posteriormente entregados al cliente final.

## **5.5. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO (PFD)**

El diagrama de flujo del proceso proporciona un conocimiento global del sistema de tratamiento, con todos los equipos que intervienen en él. Es un complemento gráfico a lo que se expresa en palabras y sirve como una guía rápida de aprendizaje. Se dibujan todos los equipos principales dentro del proceso, así como la identificación de las corrientes y servicios que se requieren dentro del proceso (Turton et al, 2003). El PFD del proceso de elaboración de bloques de concreto con la sustitución del agregado grueso por desechos de la industria de papel se muestra en la Figura 15.

## PFD-PROCESO DE FABRICACIÓN DE BLOQUES DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DEL AGREGADO GRUESO POR DESECHOS DE LA INDUSTRIA DEL PAPEL

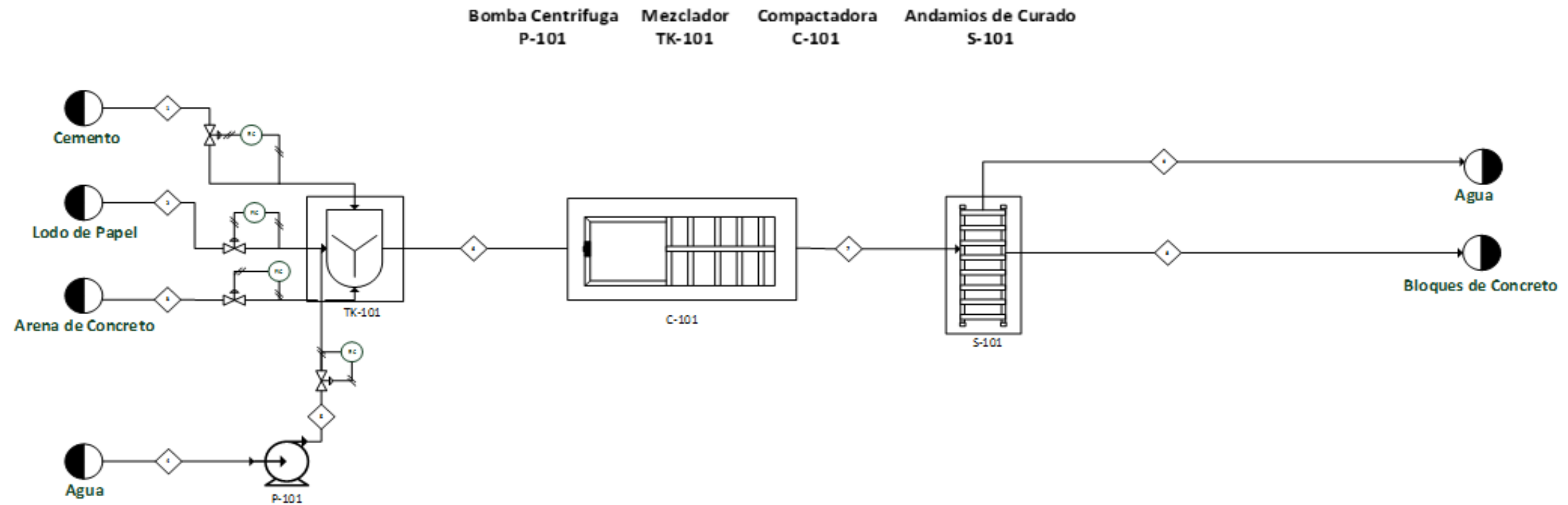


Tabla de Corrientes									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>T (°C)</b>	25	25	25	25	25	25	25	25	25
<b>P (atm)</b>	1	1	1	1	2	1	1	1	1
<b>Flujo Másico (kg/día)</b>	1875	736	3447	1087	1716	7145	7145	6710	434,8
<b>Flujo másico por componentes (Kg/día)</b>									
<b>Cemento</b>	1875	-	-	-	-	1875	-	-	-
<b>Lodo de Papel</b>	-	736	-	-	-	736	-	-	-
<b>Arena de Concreto</b>	-	-	3447	-	-	3447	-	-	-
<b>Agua</b>	-	-	-	1087	1087	1087	-	-	434,8
<b>Bloque</b>	-	-	-	-	-	-	7145	6710	-

DIAGRAMA DE BLOQUES PROCESO DE FABRICACIÓN DE BLOQUES DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN DEL AGREGADO GRUESO POR DESECHOS DE LA INDUSTRIA DEL PAPEL	
	<b>Realizado por</b> Daniela Álvarez Mejía
	<b>Revisado por</b> Marco Valencia
	<b>Aprobado por</b> Marco Valencia

Figura 15. PFD proceso de elaboración de bloques de concreto con la sustitución del agregado grueso por desechos de la industria de papel

La Tabla presenta el detalle los flujos correspondientes a la imagen presentada en el PFD del proceso.

Tabla 7. Tabla de corrientes para diagrama de flujo de proceso (PFD)

<b>Tabla de Corrientes</b>									
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>
<b>T (°C)</b>	25	25	25	25	25	25	25	25	25
<b>P (atm)</b>	1	1	1	1	2	1	1	1	1
<b>Flujo Másico (kg/día)</b>	1875	736	3447	1087	1716,4	7145	7145	6710,2	434,8
<b>Flujo másico por componentes (Kg/día)</b>									
<b>Cemento</b>	1875	-	-	-	-	1875	-	-	-
<b>Lodo de Papel</b>	-	736	-	-	-	736	-	-	-
<b>Arena de Concreto</b>	-	-	3447	-	-	3447	-	-	-
<b>Agua</b>	-	-	-	1087	1087	1087	-	-	434,8
<b>Bloque</b>	-	-	-	-	-	-	7145	6710,2	-

## 5.6. ESPECIFICACIONES DE EQUIPOS

De acuerdo con el proceso de fabricación de bloques de concreto se establecieron los parámetros de diseño para cada uno de los equipos necesarios para el diseño conceptual de la planta. Cada uno de ellos se presenta a continuación:

Tabla 8. Hoja de Especificación Bomba-Agua de Mezcla.

<b>BOMBA</b>			
<b>Identificación:</b>	<b>Tipo:</b> Centrifuga <b>Tipo No:</b> P-101 <b>No Requeridos:</b> 1	<b>Fecha:</b> 10-12-2013	
<b>Función:</b>	Impulsar el agua hacia el mezclador TK-101, dónde se pondrá en contacto con los demás componentes de la mezcla		
<b>Operación:</b>	Batch		
<b>Tipo:</b>	Bomba Centrifuga tipo A/B		
<b>Material Manipulado:</b>	Agua		
<b>Diseño:</b>	<b>F(Kg/min):</b> 343,28 <b>H(m):</b> 10,17 <b>Pin (bar):</b> 1 <b>Pout(bar):</b> 2 <b>ΔP(bar):</b> 1	<b>ΔP(Pa):</b> 100000 <b>ρ(Kg/m3):</b> 1000 <b>Q(m3/min):</b> 0,34328 <b>ε:</b> 0,7 <b>Potencia (KW):</b> 0,8189	
<b>Utilities:</b> N/A			
<b>Controles:</b> Control de flujo por válvula reguladora			
<b>Aislamiento:</b> N/A			
<b>Comentarios y dibujos:</b>	Material Acero Carbón		

Tabla 9. Hoja de Especificación Mezcladora de Concreto

<b>Mezcladora</b>				
<b>Identificación:</b>	<b>Tipo:</b> Tanque Agitador <b>Tipo No:</b> V-101 <b>No Requeridos:</b> 1	<b>Fecha:</b> 10-12-2013		
<b>Función:</b>	Mezclar uniformemente los componentes de la mezcla para la obtención de una mezcla de concreto en estado fresco			
<b>Operación:</b>	Batch			
<b>Tipo:</b>	Tanque de agitación			
<b>Material Manipulado:</b>	Cemento-Arena de Concreto-Lodo de Papel-Agua			
<b>Diseño:</b>	<b>H(m)</b>	3	<b>Flujo(m3/min)</b>	1,0022
	<b>D(m)</b>	1,5	<b>tb(min)</b>	5
	<b>a(m)</b>	1	<b>P(Hp)</b>	1
	<b>V(m3)</b>	4,5	<b>N(rpm)</b>	100
			<b>Nre(Re):</b>	0,06
<b>Utilities:</b> N/A <b>Controles:</b> N/A <b>Aislamiento:</b> N/A <b>Comentarios y dibujos:</b> Material : Acero Carbón- Tanque Tipo Horizontal				



Tabla 10. Hoja de Especificaciones Compactadora de Bloques.

<b>COMPACTADORA DE BLOQUES</b>		
<b>Identificación:</b>	<b>Tipo: Compactadora</b> <b>Tipo No: S-101</b> <b>No Requeridos: 1</b>	<b>Fecha:10-12-2013</b>
<b>Función:</b>	Comprimir y moldear la mezcla de concreto para la elaboración de los bloques.	
<b>Operación:</b>	Batch	
<b>Tipo:</b>	Compactadora	
<b>Material Manipulado:</b>	Mezcla Fresca de Concreto	
<b>Diseño:</b>	<b>Potencia (KW)</b>	5,2
	<b>H (m)</b>	1,4
	<b>Longitud(m)</b>	1,8
	<b>a(m)</b>	1,1
	<b>Producción/día</b>	10000
<b>Utilities:</b> N/A		
<b>Controles:</b> N/A		
<b>Aislamiento:</b> N/A		
<b>Comentarios y dibujos:</b>		
Material: Acero estructural		

## 5.7. ANÁLISIS ECONÓMICO

Este análisis económico considera el diseño conceptual de un proceso de mediana escala para una producción de 1000 bloques de concreto al día.

En el proceso se usarán los equipos diseñados que serán operados por 6 personas. Adicionalmente se contará con 3 ingenieros y 4 profesionales encargados de las labores administrativas de la planta. La relación de los salarios requeridos para el montaje a mediana escala del proceso son mostrados en la Tabla 11 y los cálculos están basados en el salario mínimo legal vigente (SMLV) aplicable para Colombia en el año 2014.

Tabla 11. Relación de Salarios.

MANO DE OBRA	PERSONAL	\$/PERSONAL/MES	\$/MES	\$/ANO
Semi/calificada	6	\$ 3.699.000	\$ 42.444.000	\$ 3.699.000
Calificada	3	\$ 9.000.000	\$ 108.000.000	\$ 9.000.000
Administrativa	4	\$ 7.200.000	\$ 86.400.000	\$ 7.200.000
		<b>\$ 19.737.000</b>	<b>\$ 236.844.000</b>	<b>\$ 19.737.000</b>

La valoración de los equipos diseñados y necesarios para el proceso estuvo apoyada en el software de simulación de costos CAPCOST (Analysis, Sythesis, and Design of Chemical Processes) y en las referencias dadas por la literatura. Dicha relación es mostrada en la Tabla 12:

Tabla 12. Valoración de Equipos.

INVERSION EN EQUIPOS	PRECIO UNITARIO	CANTIDAD REQUERIDA	INVERSIÓN
Bomba	\$ 6.600.000	1	\$ 6.600.000
Mezcladora de Concreto	\$ 52.000.000	1	\$ 52.000.000
Compactadora de Bloques	\$ 8.000.000	1	\$ 8.000.000
Andamios	\$ 500.000	1000	\$ 500.000.000
		<b>TOTAL</b>	<b>\$ 566.600.000</b>

El costo de materias primas fue calculado de acuerdo con la producción anual estimada para la simulación del proceso a mediana escala. Los precios de los materiales fueron referenciados de Homecenter Medellín (Colombia) con una vigencia de datos aplicable al 2014:

Tabla 13. Relación Materias Primas para la producción de 1000 bloques/día.

<b>COSTO DE OPERACIÓN</b>	<b>COSTO UNITARIO/Kg</b>	<b>CONSUMO/AÑO</b>	<b>COSTOS TOTALES</b>
Cemento	\$ 480	713661,3	\$ 342.557.424
Arena de Concreto	\$ 263	1189455,3	\$ 312.232.016
Lodo de Papel	\$ -	259518,6	\$ -
<b>TOTAL</b>			<b>\$ 654.789.440</b>

Con el análisis de costos y teniendo en cuenta una producción de 1000 bloques diarios, trabajando 52 semanas al año, se calculó el total de servicios de energía y agua requeridos por el proceso. Los costos fueron tomados con referencia en los precios unitarios de las unidades de energía y agua vigentes para el año 2014 en EPM Medellín.

Tabla 14. Consumo de servicios para el proceso de producción.

<b>SERVICIOS</b>	<b>PRECIO UNITARIO</b>	<b>CONSUMO/AÑO</b>	<b>VALOR CONSUMO</b>
Energía (KW)	\$ 370,81	3280	\$ 1.216.253,52
Agua (m3)	\$ 1.096,81	509,652	\$ 558.991,4

Una vez consolidados los gastos, se tuvo en cuenta la venta del producto unitario y basados en un tratamiento diario de 1000 Bloques durante 52 semanas, se calculó la cantidad de producto obtenido anualmente y de acuerdo a su valor en el mercado, se tiene la relación de costos de venta expuesta en la Tabla 15:

Tabla 15. Relación de costos de venta.

	<b>Bloque Concreto</b>
<b>Precio Venta (\$/Bloque)</b>	\$ 1.350
<b>Bloques/año</b>	\$ 400.950.000
<b>Total</b>	\$ 400.950.000

Incluyendo los costos de logística relacionados con la recolección del lodo de papel en la empresa Familia S.A. Medellín, Colombia, se tiene la siguiente relación:

Tabla 16. Relación de costos de logística de recolección de lodo de papel.

<b>Recolección Lodo de Papel</b>	<b>No Recolecciones/año</b>
<b>No Recolecciones/año</b>	260
<b>No Empresas</b>	1
<b>Total Transporte/año</b>	260
<b>\$/Transporte</b>	\$ 11.700.000
<b>Costo Disposición</b>	
<b>\$/kg (Lodo)</b>	\$ 3.400
<b>kg/Recolección</b>	1000
<b>\$/Total recolecciones</b>	\$ 884.000.000

Consolidando lo anterior y teniendo en cuenta un porcentaje de inflación del 4% anual, durante los primeros cinco años de constitución de la empresa se tiene el análisis financiero descrito en la Tabla 17.

Tabla 17. Análisis financiero para el proceso de producción de bloques de concreto con lodo de papel.

AÑO	0	1	2	3	4	5
<b>Factor Inflación</b>	0%	104%	108%	112%	116%	120%
<b>Ingresos de Operación</b>						
<b>Ventas</b>		\$ 400.950.000	\$ 433.026.000	\$ 484.989.120	\$ 562.587.379	\$ 675.104.855
<b>Otros</b>		\$ 884.000.000	\$ 954.720.000	\$ 1.069.286.400	\$ 1.240.372.224	\$ 1.488.446.669
<b>Inversiones</b>	\$ 300.000.000					
<b>Activos fijos</b>						
<b>Equipos</b>	\$ 566.600.000					
<b>Edificio</b>						
<b>Capital de trabajo</b>	\$ 50.000.000	\$ 52.000.000	\$ 56.160.000	\$ 62.899.200	\$ 72.963.072	\$ -
<b>Activos diferibles</b>	\$ 30.000.000					
<b>Composición legal</b>	\$ 4.000.000					
<b>Adecuación infraestructura</b>	\$ 20.000.000					
<b>Costos de Operación Directos</b>						
<b>MP</b>		\$ 654.789.440	\$ 707.172.595	\$ 792.033.307	\$ 918.758.636	\$ 1.102.510.363
<b>MO</b>		\$ 236.844.000	\$ 255.791.520	\$ 286.486.502	\$ 332.324.343	\$ 398.789.211
<b>Energía</b>		\$ 1.216.253,52	\$ 1.313.554	\$ 1.471.180	\$ 1.706.569	\$ 2.047.883
<b>Agua</b>		\$ 558.991,4	\$ 603.711	\$ 676.156	\$ 784.341	\$ 941.209
<b>Depreciación de equipos</b>		\$ 56.660.000	\$ 88.336.000	\$ 88.336.000	\$ 88.336.000	\$ 88.336.000
<b>Valor en equipos</b>		\$ 50.000.000	\$ 54.000.000	\$ 60.480.000	\$ 70.156.800	\$ 84.188.160
<b>Utilidad antes de Impuestos</b>	\$ -300.000.000	\$ 693.541.315	\$ 425.024.620	\$ 476.027.574	\$ 552.191.986	\$ 575.074.697
<b>Impuestos 35%</b>		\$ 242.739.460	\$ 148.758.617	\$ 166.609.651	\$ 193.267.195	\$ 201.276.144
<b>Depreciación</b>		\$ 88.336.000	\$ 88.336.000	\$ 88.336.000	\$ 88.336.000	\$ 88.336.000
<b>Amortización Diferidos</b>		\$ 6.000.000	\$ 6.000.000	\$ 6.000.000	\$ 6.000.000	\$ -
<b>DELTA Capital de Trabajo</b>	\$ 50.000.000	\$ 2.000.000	\$ 4.160.000	\$ 6.739.200	\$ 10.063.872	\$ -72.963.072
<b>Otros ingresos/egresos</b>						
<b>FLUJO DE EFECTIVO</b>	\$ -350.000.000	\$ 250.739.460	\$ 158.918.617	\$ 179.348.851	\$ 209.331.067	\$ 128.313.072

## 6. CONCLUSIONES

- La evaluación de las propiedades de densidad y resistencia a la compresión a los 28 días para bloques de concreto en los que se sustituye el agregado grueso por desechos de la industria del papel en 4 tratamientos con proporciones de mezcla diferentes para cada uno, muestra una relación directamente proporcional entre ambas propiedades que indica que la resistencia mecánica aumenta, conforme aumenta la densidad del material, directamente asociada a la cantidad del componente de lodo presente en la mezcla.
- Para el diseño experimental se eligió un diseño de mezclas, por medio del cual, con la utilización de una regresión de segundo grado, se establecieron 4 tratamientos con las respectivas composiciones de cada uno de los componentes de mezcla para el estudio de la resistencia a la compresión a los 28 días. Para ninguno de los tratamientos estudiados se obtuvieron valores adecuados de resistencia mecánica de acuerdo con lo establecido en la Norma Técnica Colombiana NTC 4076; el mayor de resistencia a la compresión fue de 2,83 para las composiciones en % en peso de los materiales: 57% cemento, 31% arena de concreto y 12% lodo de papel con una relación agua/cemento igual a 0,58.
- Comparada con la densidad de un bloque de concreto tradicional con las mismas proporciones de cada componente en la mezcla, la densidad de los bloques de concreto elaborados con lodo de papel presentan, para todos los tratamientos, una reducción considerable que indica que el lodo de papel es un residuo que podría usarse como material aligerante para el concreto.

- Con los resultados obtenidos se concluye que en condiciones básicas y para los tratamientos evaluados, la sustitución completa del agregado grueso por lodo de papel no entrega los resultados de resistencia a la compresión mínimos requeridos para el uso de este material en piezas de mampostería no estructural. No obstante, con base en el comportamiento observado en el trabajo experimental podría sugerirse que con el uso de algún aditivo que favorezca la cohesión entre los materiales o con la disminución del componente de lodo dentro de la mezcla, los valores de resistencia a la compresión a los 28 días pueden aumentar hasta alcanzar el valor mínimo requerido para el uso del material en la construcción.
- Las variaciones de la resistencia a la compresión de bloques de concreto tradicionales con respecto a la misma propiedad para bloques de concreto con lodo de papel, presentan diferencias muy significativas para los dos escenarios comparados; sin embargo, este hecho cobra sentido en relación con el uso de las unidades de mampostería obtenidas, estructurales para el caso de los bloques convencionales, y no estructurales cuando se trata de los bloques aligerados con desechos de la industria papelera, que según las normas asociadas difieren por su naturaleza en el valor mínimo establecido para la resistencia a la compresión a los 28 días.
- El diseño conceptual se realizó para un proceso a mediana escala para la producción de 1000 bloques diarios, y teniendo en cuenta la compra de los bloques para el año 2014, se calculó la ganancia neta con un período de cinco años de funcionamiento. Con un capital inicial de \$350.000.000 y realizando los flujos de efectivo correspondientes, a una tasa de inflación del 4% para cada año calendario, se obtuvo en la simulación una ganancia neta de \$128.313.072.

## **BIBLIOGRAFÍA**

CASTRO HERNÁNDEZ, P.A. y GASPAR, VÁSQUEZ, J.L., Manual de fabricación de tabicón sólido de concreto, Trabajo de Grado de Pregrado, Instituto Politécnico Nacional, Ingeniería Industrial, México, 2009.

CASTRO NIETO, José A., Evaluación de la velocidad de pulso ultrasónico y resistencia mecánica de concretos aligerados con MEPS, Trabajo de Grado de Pregrado, Universidad Veracruzana, México, 2012.

FREYRE ARRIETA, Javier., DEZA PEÑALERA, Enrique., Fabricación de bloques de concreto con una mesa vibradora, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, 2001.

GALLÓN RAMÍREZ, A.M., LONDOÑO VARGAS, L.M., Alternativas de utilización de los lodos provenientes de la industria papelera en aplicaciones de elementos constructivos, Trabajo de Grado de Pregrado, Escuela de Ingenierías, Universidad EAFIT, Colombia, 2000.

HURTADO, G., MINGORANCE, M.D., CONTRERAS, M.D., Estimación de la solubilidad de la cafeína mediante diseños de mezclas, Revista Tecnología Farmacéutica, Vol. 117, Universidad de Antioquia, Colombia, 2003.

LUZARDO, M., Javier D., Análisis del concreto celular y sus aplicaciones en la fabricación de paneles livianos, Trabajo de Grado de Pregrado, Ingeniería Civil, Universidad Rafael Urdaneta, Venezuela, 2004.

NAPOLITANO, Horacio, Diseño de Experimentos, No. 354, Industria & Química, Educación en Ciencias Químicas: VI Jornadas de Enseñanza de la Química, Argentina, 2010.

NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 4026: Ingeniería civil y arquitectura, unidades (bloques y ladrillos) de concreto, para mampostería estructural.



NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 4076: Ingeniería civil y arquitectura, unidades (bloques y ladrillos) de concreto, para mampostería no estructura interior y chapas de concreto

NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 4024: Prefabricados de concreto, muestreo y ensayo de prefabricados de concreto no reforzados, vibrocompactados.

NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 176: Ingeniería Civil y Arquitectura. Método de Ensayo para determinar la densidad y la absorción del agregado grueso.

NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 237: Ingeniería Civil y Arquitectura. Método de Ensayo para determinar la densidad y la absorción del agregado fino.

NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 1776: Ingeniería Civil y Arquitectura. Método de Ensayo para determinar por secado el contenido total de humedad de los agregados.

NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 121: Ingeniería Civil y Arquitectura. Cemento Portland. Especificaciones físicas y mecánicas.

NORMA TÉCNICA COLOMBIANA NTC 321: Ingeniería Civil y Arquitectura. Cemento Portland. Especificaciones químicas.

PEREZ, Mireya, Un repaso al concreto celular, Revista Construcción y Tecnología, México, 2006.

QUINCHIA FIGUEROA, Adriana M., RESTREPO, Camilo y BETANCOURT, Gonzalo, Análisis prospectivo de aprovechamiento y disposición de lodos provenientes de industrias papeleras, Revista EIA, Escuela de Ingeniería de Antioquia, Colombia, 2005.

QUINCHIA FIGUEROA, Adriana M., VALENCIA GARCÍA, Marco F. y GIRALDO, Jorge M., Uso de lodos provenientes de la industria papelera en la elaboración de

paneles prefabricados para la construcción, Revista EIA, Vol. 8, Escuela de Ingeniería de Antioquia, Colombia, 2007.

QUINCHIA FIGUEROA, Adriana M. y VALENCIA GARCÍA, Marco F., Desarrollo de un nuevo material aislante a partir de lodos de la industria papelera, Revista EIA, Escuela de Ingeniería de Antioquia, Colombia, 2013.

SHORT, Andrew y KINNBURGH, William, Concreto Ligero. Cálculo, fabricación, diseño y aplicaciones, México, 1967.

VALDEZ GUZMÁN, Luis F., SUÁREZ ALCÍVAR, Gabriel E. y PROAÑO CADENA, Gastón, Hormigones livianos, Artículo de Trabajo de Grado de Pregrado, Facultad de Ingenierías en ciencias de la tierra, Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), Ecuador, 2010.

VALIENTE MÉNDEZ, Camila, Modelamiento del proceso de secado del papel tissue caso real planta Talagante, CMPC, Trabajo de Grado de Pregrado, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Chile, 2013.

VEGAS, I., FRÍAS, M. y URRETA, J., Obtención de una adición puzolánica a partir de la calcinación de lodos de destintado de papel: estudio de prestaciones en matrices de cemento, Materiales de Construcción, Vol. 56, España, 2006.

VÉLEZ MORENO, LIGIA M., Desarrollo de una metodología para el diseño de mezclas de concreto celular con lodos de papel, Trabajo de Grado de Maestría, Escuela de Ingenierías, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia, 2012.