

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

**ESTUDIO DE MATERIALES COMPUESTOS OBTENIDOS
A PARTIR DE LODOS CELULOSICOS DE LA INDUSTRIA
PAPELERA, CEMENTO Y ARCILLA**

Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecánico, que presenta el bachiller:

Jesús López Mayo

**ASESOR: Ing. Julio Arnaldo Acosta Sullcahuamán
Dr. Francisco Rumiche Zapata**

Lima, Junio de 2014

RESUMEN

La eliminación de los desechos de la industria papelerera es un problema de creciente importancia en el mundo debido a que aumenta con la demanda de papel y productos similares. Entre estos desechos se tienen a los lodos celulósicos, cuyo transporte hacia los rellenos sanitarios genera un gasto considerable a las empresas papeleras y un impacto negativo en el medio ambiente por la emisión de gases de efecto invernadero durante su descomposición. No obstante en los últimos quince años se han llevado a cabo investigaciones sobre los posibles usos de los lodos de papel, llegando hoy en día a tener aplicaciones en la agricultura, en la industria cerámica y fuentes energéticas, entre otros.

El objetivo del presente trabajo es el estudio de las propiedades de mezclas de lodos de papel, cemento y arcilla del tipo bentonita sódica, en la perspectiva de obtener un material compuesto de propiedades adecuadas para la fabricación de materiales de construcción de bajo costo en el Perú.

La metodología para el este estudio incluye la elaboración de muestras con distintas composiciones de mezcla de lodos de papel, pasta de cemento y pasta de bentonita sódica, de acuerdo al diseño experimental. Dichos constituyentes se mezclan para posteriormente comprimirlos en un molde a una presión determinada y eliminar el exceso de agua, así como conseguir una mejor compactación y acabado de la muestra. Las muestras resultantes fueron sometidas a ensayos de flexión, compresión, densidad y absorción de agua, para conocer las propiedades respectivas del material compuesto y establecer la posibilidad de su uso en la fabricación de paneles, calaminas y ladrillos teniendo como referencia las normas ASTM (American Society for Testing Materials).

Como resultado, se determinó que el material compuesto con la mejor combinación de propiedades mecánicas para la fabricación de paneles y calaminas fue el obtenido a partir de 45% de cemento, 40% de lodos de papel y 15% de bentonita sódica, superando los valores de resistencia a la flexión, momento de rotura y manipulabilidad requeridos por la norma ASTM C1225.

Así mismo el material compuesto de 50% de cemento, 30% de lodos de papel y un 20% de bentonita sódica supera la resistencia a la compresión mínima establecida por la NTP.399.611 y NTP 399.613, normas técnicas peruanas de pavimentos y ladrillos respectivamente.

APROBACIÓN DE TEMARIO DE TESIS







DEDICATORIA

A Dios por haberme dado la vida y una gran familia.

A Ana mi madre, mi abuela Regina, mis tías Rosa y María y tíos quienes me han apoyado siempre, por su amor, por inculcarme valores y virtudes de vida, por ser ejemplos continuos de mi formación y superación.

A mi hermana Regina y primos Evelyn y David.

A toda mi familia por su amor y apoyo incondicional en todo momento.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Ingeniero Julio Arnaldo Acosta Sulcahuaman a quien considero un maestro y amigo, por su apoyo y asesoría en la realización de este trabajo.

A mi amigo y compañero de trabajo Alirio quien me apoyo para hacer realidad esta Tesis. Asimismo quisiera agradecer al personal del Laboratorio de Materiales y Manufactura de la PUCP quienes me brindaron su apoyo en la fabricación y ensayo de probetas.

A todos mis amigos y compañeros que colaboraron con su apoyo moral para terminar este trabajo.

ÍNDICE

RESUMEN	i
APROBACIÓN DE TEMARIO DE TESIS.....	ii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS.....	v
ÍNDICE DE TABLAS.....	viii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	
1.1 MATERIALES COMPUESTOS	3
1.1.1 Definición.....	3
1.1.2 Ventajas y desventajas de los materiales compuestos.....	4
1.1.3 Composición y clasificación	5
1.2 PROCESO DE PRODUCCIÓN DE PAPELES DE HIGIENE	5
1.3 RESIDUOS DE LA INDUSTRIA DEL PAPEL.....	10
1.3.1 Lodos de papel.....	10
1.3.2 Composición química y propiedades.....	12
1.4 CEMENTO PORTLAND.....	13
1.4.1 Obtención del cemento portland	13
1.4.2 Composición del cemento.....	13
1.4.3 Propiedades y características.....	14
1.5 ARCILLA	15
1.5.1 Estructura y clasificación de las arcillas	15
1.5.2 Propiedades físicas y químicas de las arcillas	17
1.5.3 Bentonita.....	20
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	
2.1 PREPARACIÓN DE PROBETAS.....	25
2.1.1 Materiales	25
2.1.2 Proceso de fabricación de probetas	29

2.2 DISEÑO EXPERIMENTAL	33
2.3 MÉTODOS DE ENSAYO	39
2.3.1 Ensayo de flexión	39
2.3.2 Ensayo de compresión	43
2.3.3 Ensayo de densidad	47
2.3.4 Ensayo de absorción de agua	49
 CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
3.1 ENSAYOS DE FLEXIÓN	51
3.1.1 El efecto del contenido de los lodos de papel	51
3.1.2 El efecto de la adición de la bentonita sódica	55
3.1.3 Resumen	63
3.2 ENSAYO DE COMPRESIÓN	64
3.2.1 El efecto del contenido de los lodos de papel y la bentonita sódica	66
3.2.2 Resumen	67
3.3 ENSAYO DE DENSIDAD	67
3.3.1 El efecto del contenido de lodos de papel	68
3.3.2 El efecto del contenido de bentonita sódica	69
3.3.3 Resumen	70
3.4 ENSAYO DE ABSORCIÓN DE AGUA	71
3.4.1 El efecto del contenido de lodos de papel	73
3.4.2 El efecto de la adición de bentonita	73
3.4.3 Resumen	74
CONCLUSIONES	75
RECOMENDACIONES	77
BIBLIOGRAFÍA	78
ANEXOS	81

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1.1 Residuos generados en la fabricación de pasta de papel, papel y cartón [ASPAPPEL: 2007].</i>	10
<i>Tabla 1.2 Composición química de los lodos de papel [García: 2007].</i>	12
<i>Tabla 1.3 Composición de los lodos de papel secos [García: 2007].</i>	12
<i>Tabla 1.4 Composición química del cemento portland [ASTM C150: 2012].</i>	13
<i>Tabla 1.5 Superficies específicas de algunas arcillas [Romero: 2005].</i>	18
<i>Tabla 1.6 Capacidad de intercambio catiónico de algunas arcillas [Gonzales: 2000].</i>	18
<i>Tabla 1.7 Índices de plasticidad para las arcillas [Mielenz: 1952].</i>	20
<i>Tabla 2.1 Resultados de los ensayos de reactividad, inflamabilidad, corrosividad y pH en suelos.</i>	26
<i>Tabla 2.2 Resultados de los ensayos de toxicidad inorgánica-lodos de papel.</i>	26
<i>Tabla 2.3 Requerimientos físicos estándar del cemento portland tipo I según norma ASTM C150-12.</i>	27
<i>Tabla 2.4 Composición química de la bentonita sódica.</i>	29
<i>Tabla 2.5 Propiedades físicas de la bentonita sódica.</i>	29
<i>Tabla 2.6 Otras propiedades de la bentonita sódica.</i>	29
<i>Tabla 2.7 Composición en porcentaje en peso de lodos de papel y cemento.</i>	34
<i>Tabla 2.8 Composición y codificación de probetas de lodos de papel y cemento para el ensayo de flexión según norma ASTM C1185.</i>	35
<i>Tabla 2.9 Composición y codificación de probetas para el ensayo de flexión al 40% de cemento según norma ASTM C1185.</i>	37
<i>Tabla 2.10 Composición y codificación de probetas para el ensayo de flexión al 45% de cemento según norma ASTM C1185.</i>	38

<i>Tabla 2.11 Composición y codificación de probetas para el ensayo de flexión al 50% de cemento según norma ASTM C1185.....</i>	39
<i>Tabla 2.12 Factores de corrección para la resistencia a la compresión según norma ASTM C39-08.....</i>	46
<i>Tabla 3.1 Resultados del ensayo de flexión según norma ASTM C1185-08 para diferentes porcentajes de cemento.....</i>	52
<i>Tabla 3.2 Resultados promedios del ensayo de flexión.....</i>	52
<i>Tabla 3.3 Resultados del ensayo de flexión según norma ASTM C1185-08 para 40% de cemento.....</i>	56
<i>Tabla 3.4 Resultados promedios del ensayo de flexión al 40% de cemento.....</i>	56
<i>Tabla 3.5 Resultados del ensayo de flexión según norma ASTM C1185-08 para 45% de cemento.....</i>	57
<i>Tabla 3.6 Resultados promedios del ensayo de flexión al 45% de cemento.....</i>	57
<i>Tabla 3.7 Resultados del ensayo de flexión según norma ASTM C1185-08 para 50% de cemento.....</i>	58
<i>Tabla 3.8 Resultados promedios del ensayo de flexión al 50% de cemento.....</i>	59
<i>Tabla 3.9 Resultados del ensayo de compresión según norma ASTM C39-12 para 40% de cemento.....</i>	64
<i>Tabla 3.10 Resultados del ensayo de compresión según norma ASTM C39-12 para 45% de cemento.....</i>	65
<i>Tabla 3.11 Resultados del ensayo de compresión según norma ASTM C39-12 para 50% de cemento.....</i>	65
<i>Tabla 3.12 Resultados del ensayo de densidad según norma ASTM C1185-08 para probetas de lodos de papel y cemento.....</i>	67
<i>Tabla 3.13 Resultados del ensayo de densidad según norma ASTM C1185-08 para probetas con 45% de cemento constante.....</i>	68

Tabla 3.14 Valores promedio de las densidades de las probetas de lodos de papel y cemento..... 69

Tabla 3.15 Valores promedio de densidad de las probetas de lodos de papel, cemento y bentonita sódica 70

Tabla 3.16 Resultados del ensayo de absorción de agua según norma ASTM C 1185-08 para diferentes probetas lodos de papel y cemento..... 71

Tabla 3.17 Resultados del ensayo de absorción de agua según norma ASTM C 1185-08 para 45% de cemento 72



INTRODUCCIÓN

La eliminación de los desechos de la industria papelera es un problema de creciente importancia en el mundo debido a que cada vez más la producción de papel aumenta como respuesta a la mayor demanda de papel. Uno de estos desechos son los lodos celulósicos, los cuales no tenían un uso significativo en algún otro proceso industrial. Sin embargo en los últimos 15 años se han llevado a cabo investigaciones sobre los posibles usos de los lodos de papel en otros campos, llegando hoy en día a tener aplicaciones en la industria de la construcción, en la agricultura como fertilizante, en la industria cerámica como aditivo inorgánico, uso como fuente energética y en la producción de combustibles derivados.

El objetivo del presente trabajo es el estudio de las propiedades de mezclas de cemento, lodos de papel y la arcilla bentonita sódica para poder obtener un material compuesto de bajo costo y emplearlas en la fabricación de materiales de construcción.

Se pretende evaluar la acción de las fibras de celulosa presente en los lodos sobre el material compuesto a elaborar, así como determinar la mezcla óptima para la cual se obtendrían las mejores propiedades. Además se evaluará la acción de la arcilla del tipo bentonita sódica en el comportamiento del material.

La metodología para el este estudio incluirá la elaboración de muestras con distintas composiciones de mezcla de lodos de papel, pasta de cemento y pasta de bentonita sódica, de acuerdo a un diseño experimental previamente elaborado. Dichos constituyentes se mezclarán para posteriormente comprimirlos en un molde a una presión determinada y eliminar el exceso de agua, así como conseguir una

mejor compactación y acabado de la muestra. Las muestras resultantes serán sometidas a ensayos de flexión, compresión, densidad y absorción de agua, para conocer las propiedades respectivas del material compuesto y establecer la posibilidad de su uso en la fabricación de paneles, calaminas y ladrillos teniendo como referencia las normas ASTM (American Society for Testing Materials).

Este trabajo posee la siguiente estructura:

Capítulo 1. En el primer capítulo se hace un marco teórico sobre los materiales compuestos y propiedades de los materiales involucrados. Lo que se busca es tener una noción sobre el estado del arte del tema a investigar y de precisar conocimientos que den sustento a la investigación.

Capítulo 2. En el segundo capítulo se expondrá el método de investigación, en nuestro caso es un método experimental donde se expondrá los métodos de ensayos, las herramientas experimentales y equipos utilizados en esta investigación. Describiéndose en primer lugar la preparación de las probetas, luego el diseño experimental, seguidamente los objetivos de cada ensayo y la metodología (normas) de cada ensayo: flexión, compresión, densidad y absorción de agua.

Capítulo 3. En el tercer capítulo se muestran los resultados experimentales obtenidos en los ensayos y posteriormente se realiza un análisis y discusión para los resultados de cada ensayo.

Este trabajo se da por terminado, con la exposición de las principales conclusiones a las que se ha llegado y la presentación de la bibliografía consultada.

Al final el trabajo presentara las respectivas conclusiones sobre lo que se ha alcanzado con el estudio realizado y finalmente se mostrara la bibliografía usada para el estudio.

CAPITULO 1: FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1 MATERIALES COMPUESTOS

Ante la creciente necesidad de nuevos materiales con cierta combinación de propiedades que difícilmente se pueden encontrar en los cerámicos, plásticos o los metales aparecen los materiales compuestos. El desarrollo de los materiales compuestos ha tenido un gran avance tecnológico en los últimos 30 años permitiendo obtener materiales con tanta o mayor resistencia que algunos metales, materiales capaces de resistir altas temperaturas y que pueden seguir conservando sus propiedades, materiales con menor densidad que ha permitido disminuir el peso de muchas estructuras. La importancia en el tiempo que han ido adquiriendo los materiales compuestos se muestra en la *figura 1.1*.

Los materiales compuestos se pueden encontrar en forma natural y artificial. En la forma natural tenemos la madera, caparazón de moluscos, tela de araña; y en la forma artificial tenemos las aleaciones metálicas, polímeros, carburos cementados, entre otros.

1.1.1 Definición

Los materiales compuestos son combinaciones macroscópicas de dos o más materiales con propiedades diferentes con el propósito de obtener una propiedad intermedia, o bien una combinación de propiedades. Por ejemplo, la combinación de un material duro (WC) con uno suave (cobalto) permite obtener un material con alta resistencia al desgaste por la dureza del WC, pero con la tenacidad del cobalto [**Gonzales: 1999**].

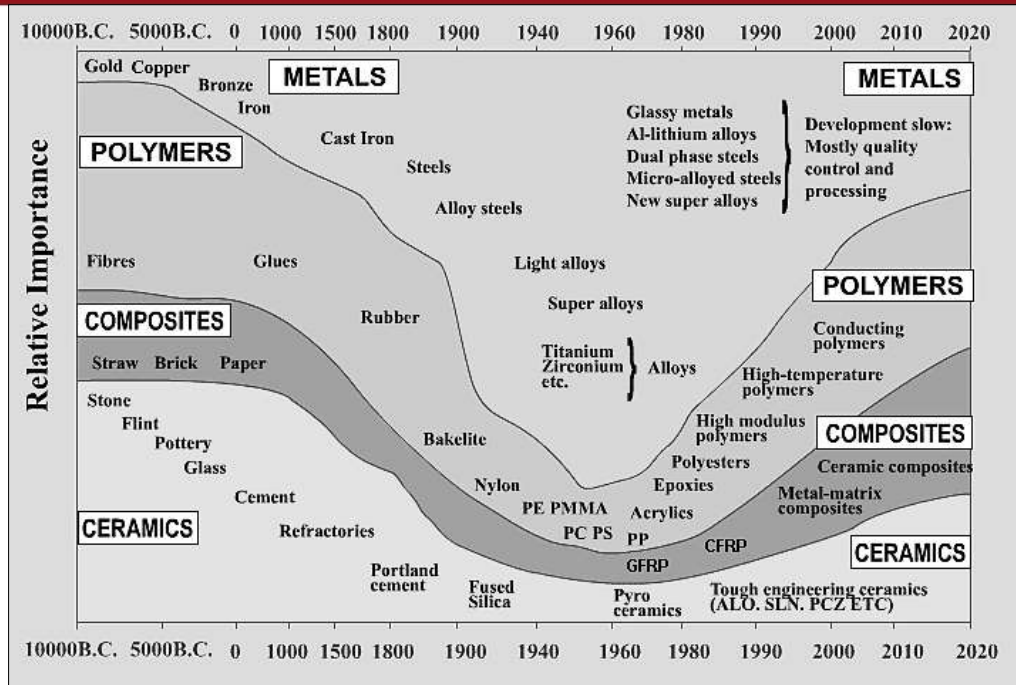


Figura 1.1 Grafico de importancia vs tiempo [Gibson. R.F:1994]

1.1.2 Ventajas y desventajas de los materiales compuestos

La importancia tecnológica y comercial de los materiales compuestos se debe a que sus propiedades no solamente son diferentes de sus componentes sino que frecuentemente son superiores. Entre sus posibilidades encontramos:

- Pueden lograrse diseños fuertes, rígidos, y de peso ligero.
- Es posible lograr combinaciones de propiedades que no se pueden lograr con los metales, los cerámicos, o los polímeros por si solos.
- Solamente con ciertos materiales compuestos mejor apariencia y control de la superficie.

Sin embargo los materiales compuestos también presentan desventajas y limitaciones como: las propiedades de muchos compuestos importantes son anisotrópicas, es decir que cambian en función de la dirección en que se miden; muchos compuestos basados en polímeros están expuestos al ataque de agentes químicos o solventes de la misma forma que los polímeros son susceptibles al ataques, los materiales compuestos son generalmente costosos, aunque su costo puede reducirse incrementando el volumen y algunos métodos de manufactura para su conformado son lentos y costosos [Groover: 1997].

1.1.3 Composición y clasificación

La mayor parte de los materiales compuestos están formados por dos fases; una matriz, que da cuerpo y volumen a la pieza, protege, separa y transmite las cargas a la otra fase, denominada fase dispersa (material de refuerzo), que por lo general es más resistente que la matriz; esta se agrega a la matriz para conferir al compuesto alguna propiedad que la matriz no posee.

Los materiales compuestos según la clasificación en ingeniería se pueden representar según la *figura 1.2*:

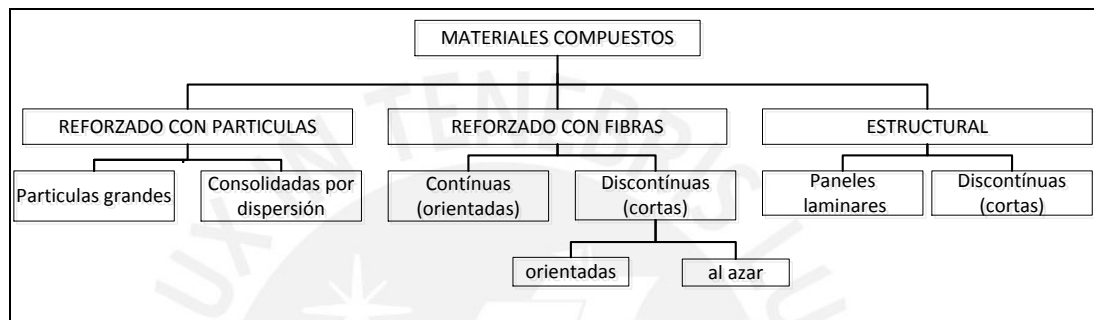


Figura 1.2 Clasificación de los materiales compuestos [Acosta:2010]

En el material compuesto a estudiar se busca que las fibras celulósicas y compuestos inorgánicos de los lodos celulósicos sirvan como refuerzo a la matriz del cemento y arcilla y así obtener un material compuesto con buenas propiedades mecánicas.

1.2 PROCESO DE PRODUCCIÓN DE PAPELES DE HIGIENE

El proceso de producción de papel a describir es el de la empresa Kimberly Clark, la cual produce varios tipos de papel higiénico teniendo como parámetros de calidad el brillo del papel y el gramaje, estos parámetros a la vez son determinados por el tipo de materia prima utilizada que son el papel reciclado y la fibra virgen.

La fabricación de papel a partir de fibra virgen y la fabricación de papel reciclado son en realidad fases sucesivas y complementarias de un continuo: el ciclo de vida de la fibra de celulosa. Las fibras se extraen de la madera en el proceso de fabricación de la celulosa, se emplean una primera vez en la fabricación del papel y ese papel, una vez utilizado, se recupera y se envía de nuevo a las fábricas papeleras, donde se recicla. Las fibras de celulosa se van deteriorando con los sucesivos usos, por lo que resulta imprescindible inyectar fibra virgen en el ciclo.

El importante volumen de residuos sólidos no peligrosos que se genera en los procesos de fabricación de celulosa y papel está en su mayor parte asociado a los procesos de reciclado del papel [ASPAPPEL: 2007].

Los papeles de higiene se generan a partir de bobinas de papel, las características de las bobinas están dadas por la materia prima utilizada en su elaboración (tipo de papel reciclado y tipo de fibra).

1.2.1 Etapa de formación de bobinas de papel.

La etapa de formación de bobinas incluye dentro de sí la producción de la pasta de papel y la formación de papel; la pasta de papel está formada principalmente por celulosa, la cual está compuesta de fibras vegetales obtenidas del papel reciclado o fibra virgen. El tipo de papel reciclado (periódicos, hojas impresas, cartón, revistas, papel en blanco, etc.) o fibra virgen determinan las características del papel producido y es a partir de esta pasta de papel que se puede elaborar el papel propiamente dicho (bobinas). Cuando se usa papel reciclado para la elaboración de la pasta de papel, este debe pasar por el proceso de reciclado donde se prepara la fibra para la elaboración de la pasta de papel.

- **Proceso de reciclado.**

Se realiza a través de procesos físicos y químicos donde se eliminan los aditivos e impurezas del papel reciclado (tintas, plásticos, carga mineral, grapas, madera) para quedarse con la fibra que servirá para hacer la bobina de papel (*figura 1.3*), el reciclado consta de los siguientes sub-procesos:

- a) **Pre-formación:** Desintegración-Pulpeo; donde se busca desintegrar la materia prima y dispersar las fibras, en este proceso se vierte el papel junto con agua en un desfibrador (pulper) donde se separan las fibras unas de otras.
- b) **Desintegración y molienda:** Depuración gruesa; se eliminan contaminantes de la pasta, generalmente plásticos, grapas, vidrios o elementos mayores a 1.8 a 2.2 mm de diámetro.
- c) **Flotación:** Proceso en el que se remueve partículas pequeñas, entre 20 y 150 micras, de la pasta; en este proceso se emplea aire para separar las partículas de tinta de la fibra, fijarlas a las burbujas y retirarlas por flotación.
- d) **Depuración fina:** Se remueven contaminantes de la pasta, mayormente pequeñas partículas de tinta y elementos no deseados de tamaño mayores a 0.15 mm de diámetro.

- e) **Dispersión:** En este proceso se somete la pasta de alta consistencia, a alta fricción entre partículas, para reducir el tamaño de los contaminantes remanentes debajo del nivel de detección, sin embargo el brillo de la pulpa se ve reducido.
- f) **Blanqueo:** Tiene como fin aumentar el brillo de la fibra, decolorar los contaminantes presentes y remover la lignina de la fibra. En este caso se aplican dos tipos de blanqueo: blanqueo oxidativo y reductivo. El grado de blancura dependerá del tipo de producto que se quiera hacer.
- g) **Refinación:** La pasta se refina para desfibrar y cortar las fibras a fin de adaptarse al tipo de papel deseado, de este proceso depende la resistencia de la hoja, densidad, porosidad y formación de la misma.

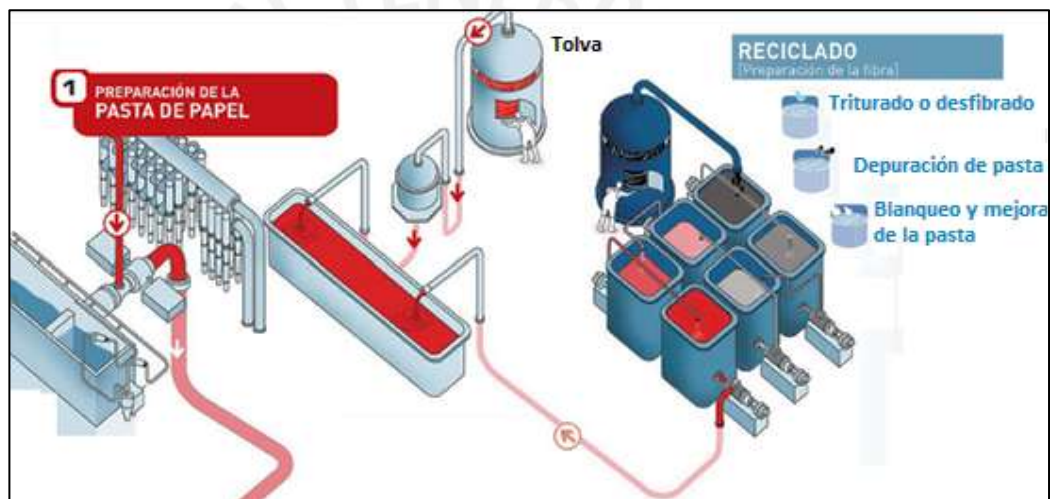


Figura 1.3 Flujo general del proceso de destintado [Kimberly: 2013]

- **Proceso de formación de papel.**

Comienza a partir de la pasta de papel obtenida en el refinado, consiste en forma general retirar el agua que acompaña a la pasta. Se suceden las fases de sedimentación de fibras y formación de una banda húmeda de papel, a través de rodillos y telas, con eliminación de agua mediante gravedad, vacío y presión, para finalmente proceder a un secado térmico con aire caliente entre 400- 450⁰C. Si se quiere dar mejores características y hacerlo idóneo para determinados usos pueden darse al papel distintos tratamientos superficiales como encolado, estucados, etc. En la última fase de acabado se presenta el papel en forma de bobinas La formación de papel consta de los siguientes sub-procesos:

- a) **Formación:** Busca una formación homogénea (distribución de las fibras) en los planos X, Y y Z para obtener un peso base, calibre, volumen a lo ancho de la hoja, esto se logra a través de la uniformidad en el contacto de la hoja con el secador, que se traduce en transferencia de calor uniforme y perfil de humedad homogéneo, como se aprecia en la *figura 1.4* un chorro de fibra celulósica es inyectado (flecha roja) a través de una bomba entre dos rodillos que tiene las misma velocidad a la que sale el chorro.

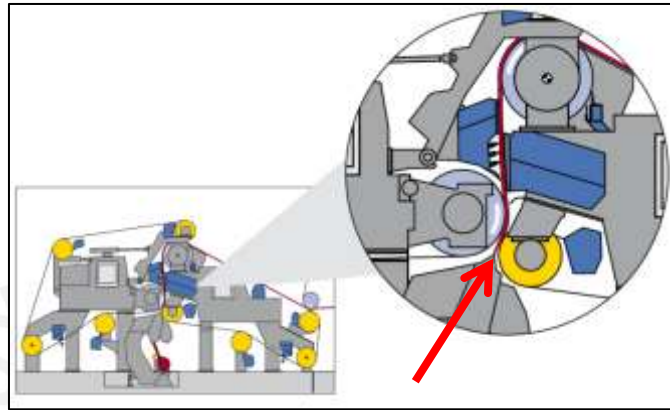


Figura 1.4 Formación de la hoja de papel [SCA: 2010].

- b) **Secado:** Para fijar el grado final de humedad del papel se elimina más cantidad de agua por evaporación. La sección de secado constan de una serie de cilindros calentados mediante vapor sobre los que pasa la hoja de papel. Los cilindros se disponen de modo que contactan primero con un lado del papel y luego con el otro para garantizar su homogénea deshidratación [SCA: 2010].
- c) **Crepeado y bobinado:** Después del secado el papel es sometido a un proceso de microplegado o arrugado para darle la característica de absorción. El papel que va a someterse a un proceso adicional para obtener un producto final, se enrolla en un eje de acero y se forma un “rollo gigante”, también denominado tambor. Al final el grado de sequedad es del 90-95%, dependiendo del tipo de producto elaborado [SCA: 2010].
- d) **Evaluación de bobinas:** Se evalúa la calidad del papel en bobinas que luego serán transformadas en el área de conversión. Algunas propiedades a evaluar son: resistencia en seco y en húmedo en las direcciones MD y CD (contra maquina).

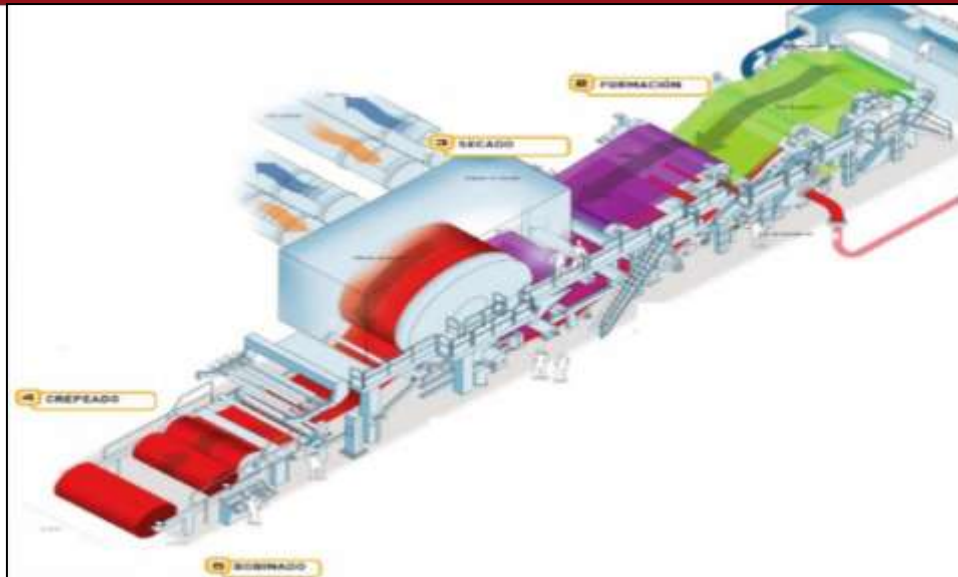


Figura 1.5 Flujo general del proceso de formación de papel [Kimberly: 2013]

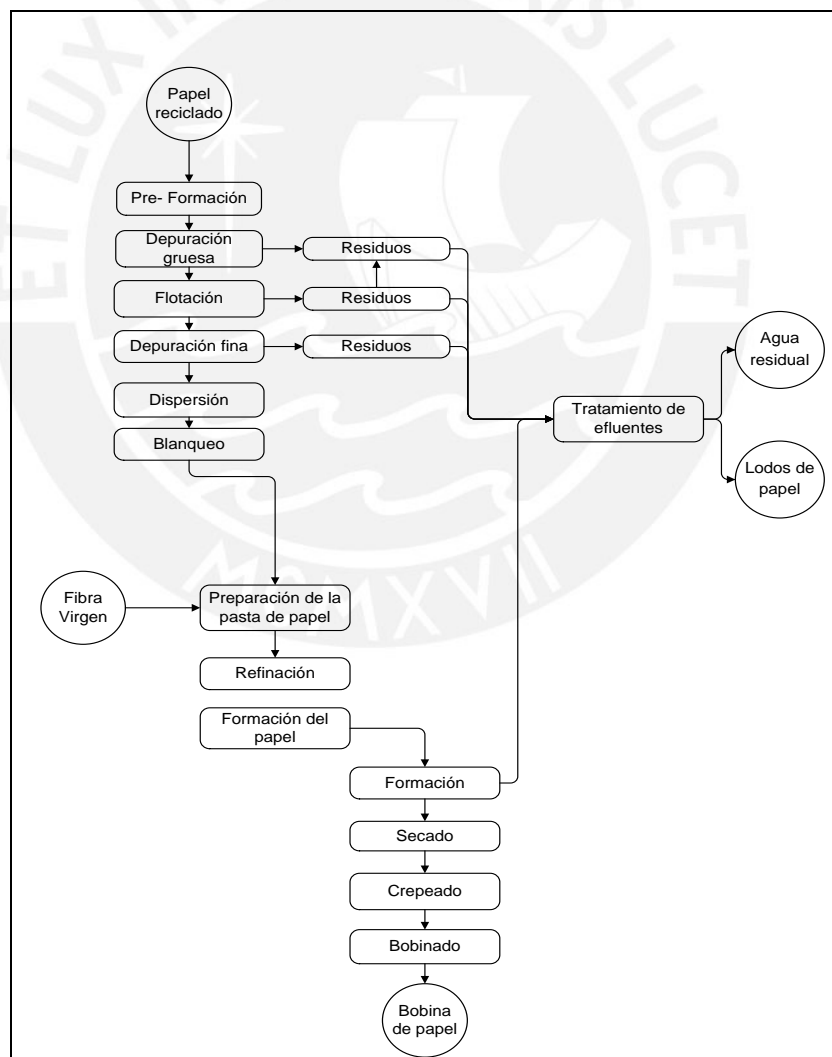


Figura 1.6 Proceso de fabricación de la pasta de papel a partir de papel recuperado [Kimberly: 2013]

1.3 RESIDUOS DE LA INDUSTRIA DEL PAPEL.

En las papeleras se generan residuos sólidos de diversas tipologías (*tabla 1.1*), en función de la materia prima utilizada, los procesos específicos de cada fábrica y el producto final a comercializar.

En el epígrafe "0303 Residuos de la producción y transformación de pasta de papel, papel y cartón" del Listado Europeo de Residuos (LER) (Orden MAM/304/2002), se recogen los residuos sólidos que fundamentalmente genera la industria papelera en España. Los residuos generados en la fabricación de pasta de papel, papel y cartón se presentan en el siguiente cuadro:

Código LER	Descripción del residuo
30301	Residuos de corteza y madera.
30302	Lodos de lejías verdes [procedentes de la recuperación de lejías de cocción].
30305	Lodos de destinado procedentes del reciclado del papel.
30307	Desechos, separados mecánicamente, de pasta elaborada a partir de residuos de papel y cartón.
30308	Residuos procedentes de la clasificación de papel y cartón destinados al reciclado.
30309	Residuos de lodos calizos.
30310	Desechos de fibras y lodos de fibras, de materiales de carga y de estucado, obtenidos por separación mecánica.
30311	Lodos del tratamiento in situ de efluentes distintos de los especificados en el código 030310.
30399	Residuos no especificados en otra categoría.

Tabla 1.1 Residuos generados en la fabricación de pasta de papel, papel y cartón [ASPAPEL: 2007]

1.3.1 Lodos de papel

También se le denomina lodos celulósicos, es generado en el tratamiento químico de las aguas residuales de las industrias de papel, y se purga antes de entrar al proceso de formación de papel (*figura 1.7*). La composición química y cantidad, así como las geotécnicas propiedades (mineralogía, granulometría, plasticidad, resistencia, etc.) de los lodos de papel dependerá del tipo de papel fabricado, la técnica de limpieza de aguas residuales y los tipos de materias primas.

Los lodos de papel se obtienen de la planta de tratamientos de efluentes, estos se producen como resultado de la eliminación de partículas sólidas del efluente para la

reutilización del agua en la fabricación del papel. El tratamiento de efluentes consta de los siguientes procesos:



Figura 1.7 Aspecto de los lodos de papel [Kimberly: 2013]

1. Homogenización.

La homogenización comienza en una tina de almacenamiento donde se depositan los efluentes provenientes de los procesos de destintado y formación del papel. Lo que se busca es dar un tamaño uniforme a los sólidos a través de una agitación uniforme.

2. Separación sólido líquido.

En este proceso se separan los sólidos del líquido a través de un químico que viene a ser un polímero catiónico, este químico al poseer una carga positiva atrae a los sólidos cuya carga es negativa, esto produce que los sólidos se vayan aglomerando formando los lodos mientras el efluente es bombeado hacia el proceso de deshidratación (*figura 1.8*).



Figura 1.8 Aglomeración de sólidos [Kimberly: 2013]

3. Deshidratación.

El proceso de deshidratación consiste en escurrir el agua de los lodos para obtener la mayor cantidad de agua para su posterior reutilización, en este proceso los sólidos pasan a través de unas fajas donde se les extrae el agua, finalmente el agua escurrida es dirigida hacia un tanque de almacenamiento donde será tratada mediante un proceso de clarificación para poder usada nuevamente en los procesos de fabricación del papel. Los lodos son separados de las fajas a través de unas cuchillas y posteriormente son conducidas por una faja transportadora hacia un camión que transporta los residuos hacia el relleno sanitario.



Figura 1.9 Deshidratación de los lodos a través de fajas [Kimberly: 2013]

1.3.2 Composición química y propiedades

Los lodos de papel generados por la industria papelera esta generalmente compuesta de fibras orgánicas (celulosa, hemicelulosas y/o lignina), materia inorgánica (tintas y químicos) y materiales de recubrimiento como caolinita ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$), caliza ($CaCO_3$) y talco ($Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$).

Los resultados mostrados pertenecen a los lodos de la compañía Holmet, una empresa europea que usa una alta proporción de papel y cartón reciclados.

Tabla 1.2 Composición química de los lodos de papel [García: 2007]

Oxido (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	K ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	Na ₂ O	LOI
Lodos de papel	18.01	10.14	0.55	19.82	2.58	0.26	0.21	0.1	0.33	0.25	47.62

Tabla 1.3 Composición de los lodos de papel secos [García: 2007]

%	Materia Orgánica	Filosilicatos	Caolinita	Cuarzo	Talco	Calcita
Lodos secos	29	11	21	2	2	35

1.4 CEMENTO PORTLAND.

Es un cemento hidráulico, cemento que fragua y endurece por interacción química con el agua, producido por la pulverización de Clinker, el cual consiste esencialmente de silicatos de calcio hidráulicos conteniendo de manera usual uno o más formas de sulfato de calcio adicionado en el proceso de molienda.

1.4.1 Obtención del cemento portland

Para la elaboración se emplean materias primas capaces de aportar principalmente carbonato de calcio y sílice, así como óxido de hierro y alúmina para lo cual se seleccionan materiales calizos y arcillosos de composición adecuada. La materia prima procesada se introduce en hornos rotatorios donde se calcinan a temperaturas de orden de 1450 °C, hasta que alcanza un estado de fusión incipiente. Al material resultante de la calcinación se le denomina Clinker Portland.

Cuando se encuentra frío el Clinker se muele conjuntamente con una proporción de yeso, que tiene la función de regular el tiempo de fraguado y así se obtiene un polvo fino de color gris que se conoce como cemento portland simple [Arteaga:2009].

1.4.2 Composición del cemento

Según la norma ASTM C150-12 la composición química estándar es la siguiente (tabla 1.4):

Tabla 1.4 Composición química del cemento portland [ASTM C150: 2012]

Compuesto	Formula de Óxido	Notación abreviada	% en peso
Silicato tricálcico (Alita)	3CaO SiO ₂	C ₃ S	50-70
Silicato dicálcico (Belita)	2CaO SiO ₂	C ₂ S	15-30
Aluminato tricálcico	3CaO Al ₂ O ₃	C ₃ A	5-10
Aluminoferrito tetracálcico	4 CaO Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃	C ₄ AF	5-15
Sulfato dihidratado de calcio (Yeso)	CaSO ₄ 2H ₂ O	CS H ₂	3.5-5

El silicato tricálcico o alita es la fase principal del Clinker portland pues reacciona rápidamente con agua y es la fase más importante en cuanto al desarrollo de propiedades mecánicas alcanzadas durante los 28 primeros días de fraguado. [Arteaga: 2009].

1.4.3 Propiedades y características

Las propiedades más importantes del concreto en estado no endurecido incluyen la trabajabilidad, consistencia, fluidez, cohesividad, contenido de aire, segregación, exudación, tiempo de fraguado, calor de hidratación, y peso unitario [Rivva: 2000].

En el estado endurecido las propiedades del cemento incluyen la resistencia mecánica, durabilidad, cambios de volumen, impermeabilidad, resistencia al desgaste, resistencia a la cavitación, propiedades térmicas y acústicas, y apariencia [Rivva: 2000].

El agua que se añade a la mezcla es, por razones de maniobrabilidad, siempre mayor que la que se requiere para la hidratación del cemento; siendo esta última conocida como agua de consistencia normal y estando su valor en el orden del 28% en peso del cemento.

Debido a esto las pastas que tienen una alta relación agua-cemento contienen más agua que no interviene en el proceso de hidratación, o agua libre. Dado que el agua libre ocupa espacios que después se transforman en poros capilares, la pasta de las mezclas de alta relación agua-cemento es más porosa que la de las mezclas ricas o de las mezclas con baja relación agua cemento [Rivva, 2000].

Usualmente la relación agua/cemento en peso (A/C) es del orden de 0,45 a 0,6 con lo cual se logra también trabajabilidad en la mezcla.

Cuando el cemento se mezcla con el agua, las reacciones químicas que se producen originan cambios en la estructura de la pasta, manteniendo su plasticidad durante un cierto tiempo, desde pocos minutos hasta varias horas, para luego ocurrir varios fenómenos sucesivos:

- ✓ Un aumento relativamente brusco de la viscosidad acompañado de una elevación de la temperatura de la pasta (fraguado inicial).
- ✓ Después de algunas horas, la pasta se vuelve indeformable y se transforma en un bloque rígido (fraguado final)
- ✓ La resistencia aumenta con regularidad a medida que transcurre el tiempo (endurecimiento).

Producido el proceso de fraguado e iniciado el de endurecimiento es necesario tener en consideración tres aspectos fundamentales:

- ✓ Es la constitución de la pasta y, en primer lugar, su porosidad, la que determina la resistencia del concreto.
- ✓ Al tratar el proceso de endurecimiento es necesario distinguir si lo que debe considerarse principalmente es la resistencia que se obtiene después del desarrollo del proceso de hidratación (resistencia final) o sí, por el contrario, lo más importante es el problema de la velocidad de endurecimiento.
- ✓ La resistencia final de la pasta de cemento depende casi exclusivamente de la cantidad de agua empleada en el mezclado. Por el contrario, el ritmo o desarrollo del endurecimiento, es decir el tiempo necesario para que el concreto alcance la resistencia final, depende por una parte de la composición química y de la finura del cemento y, por otra parte, de las condiciones de humedad y de temperatura que se tiene durante el proceso de endurecimiento.

La conservación de perfectas condiciones de humedad en el ambiente que rodea a la pasta de cemento es de primordial, ya que el fenómeno de desecación del concreto representa el final del proceso de endurecimiento hidráulico [Rivva, 2000].

1.5 ARCILLA

El término arcilla denota un material natural compuesto principalmente de minerales de grano fino ($< 5\mu\text{m}$), el cual desarrolla plasticidad cuando está mezclado con determinada cantidad de agua y se endurece con al secarse o al ser cocinado. Constituidos principalmente de sílice, alúmina y agua con cantidades variables de magnesio, hierro, calcio, sodio, potasio, titanio, manganeso, vanadio, zinc, etc.

Las arcillas minerales son una de las más importantes constituyentes de los materiales de la tierra y muchas de las propiedades de los materiales de la tierra están influenciadas por la identidad, cantidad, tamaño de partícula, y composición química de las arcillas. Tres grandes grupos de arcillas minerales son reconocidas, llamadas: kaolinita, montmorillonita y illita [Mielenz: 1952].

1.5.1 Estructura y clasificación de las arcillas

La estructura atómica de las arcillas consiste en dos unidades básicas, lámina octaédrica (figura 1.10) y lámina tetraédrica (figura 1.11). La lámina octaédrica está compuesta de grupo agrupado de oxígenos e hidroxilos, en el cual los átomos de aluminio, hierro y magnesio están distribuidos en una coordinación octaédrica. Cuando el aluminio está presente como un catión de valencia tres en la lámina octaédrica, el mineral será denominado dioctaédrica y cuando el magnesio esta

como un catión de valencia dos, el mineral será denominado trioctaédrica. [Murray: 2007]

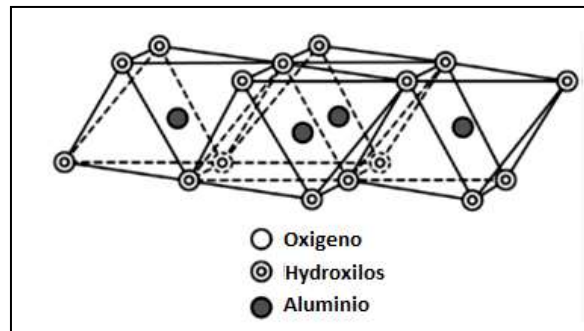


Figura 1.10 Estructura octaédrica. [Murray: 2007]

La segunda unidad estructural es la lámina tetraédrica de sílice, donde el átomo de sílice está equidistante de cuatro oxígenos o hidroxilos dispuesta en la forma de un tetraedro con el átomo de sílice en el centro.

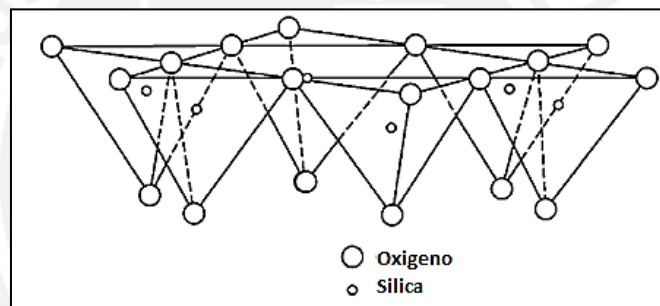


Figura 1.11 Estructura tetraédrica. [Murray: 2007]

La estructura y composición de la mayoría de las arcillas industriales son muy diferentes a pesar de que se componen de láminas octaédricas y tetraédricas en su estructura básica. El arreglo de las láminas octaédricas y tetraédricas cuenta para la mayoría de las diferencias físicas y químicas [Murray: 2007].

Es suficiente decir que las arcillas minerales pueden ser subdivididas en tres principales categorías, micáceo o arcillas laminares (1), arcillas fibrosas (2), y las arcillas amorfas (3), las clases de arcilla pueden ser organizadas de la siguiente manera [Richard C.]:

1. Arcillas laminares

Grupo Caolinita

Dioctaédrica

Caolinita

Halosita, $2\text{H}_2\text{O}$

Trioctaédrica

Antigorita

Crisotilo

Halosita Hidratada, $4\text{H}_2\text{O}$

Nacrita

Dickita

Cronstedite

Chamosita

Amesita

Grupo Montmorillonita**Dioctaédrica**

Montmorillonita

Beidelita

Nontronita

Trioctaédrica

Saponita

Hectorita

Vermiculita (jefferisite)

Grupo Micahidratados**Dioctaédrica**

Ilita

Pinite

Glaucionita

Celadonita

Brammalite

Trioctaédrica

Hidrobiotita

Mg-illidromica

Grupo Capas mixtas

Anauxita

Bravaisite

Vermiculita-clorito

Caolinita-nontronita

Montmorillonita, Ilita

2. Arcillas fibrosas**Grupo Sepiolita**

Sepiolita

Garnierita

Pilolite

Grupo Palygorskite**3. Arcillas Amorfas**

Alófanas

1.5.2 Propiedades físicas y químicas de las arcillas

Las arcillas minerales tienen la propiedad de captar cationes y aniones y estos iones son intercambiables con otros cationes, usualmente en ambiente acuoso. Los iones intercambiables más comunes son los siguientes: Ca^{+2} , Mg^{+2} , H^+ , y Na^+ , la propiedad del intercambio iónico encuentra muchas aplicaciones en la industria.

La capacidad de intercambio catiónico, propiedad de hinchamiento, plasticidad, permeabilidad, refractariedad y vitrificación de una arcilla son principalmente dependientes de los constituyentes de las arcillas. [**Ramachandran: 1962**].

Las importantes características físicas y químicas que se relacionan con las aplicaciones de la arcilla son las siguientes:

- **Superficie específica:** Llamada también área superficial, se define como el área de la superficie externa más el área de la superficie interna de las partículas constituyentes por unidad de masa expresada en m^2/g [**Romero: 2005**]. Algunos ejemplos de superficies específicas de algunas arcillas (*tabla 1.5*):

Tabla 1.5 Superficies específicas de algunas arcillas [Romero: 2005].

Arcilla	Superficie específica (m^2/g)
Caolinita de elevada cristalinidad	hasta 15
Caolinita de baja cristalinidad	hasta 50
Hallosita	hasta 60
Illita	hasta 50
Montmorillonita	80-300
Sepiolita	100-240
Paligorskita	100-200

- **Capacidad de intercambio catiónico:** La capacidad de intercambio catiónico (CEC) se puede definir como la cantidad total de cationes intercambiables que un material o un suelo puede adsorber a un determinado pH (*tabla 1.6*), esto es debido a que la mayoría de los minerales de la arcilla están cargados negativamente [**Gonzales: 2000**].

Tabla 1.6 Capacidad de intercambio catiónico de algunas arcillas [Gonzales: 2000].

	Capacidad($me/100 g$)
Caolinita	5-3
Hallosita	10-40
Illita	10-50
Clorita	10-50
Vermiculita	100-200
Montmorillonita	80-200
Sepiolita-paligorskita	20-35

- **Capacidad de absorción:** La capacidad de absorción está directamente relacionada con las características texturales (superficie específica y porosidad) y se puede hablar de dos tipos de procesos que difícilmente se dan de forma aislada: absorción (cuando se trata fundamentalmente de procesos físicos como la retención por capilaridad) y adsorción (cuando existe una interacción de tipo químico entre el adsorbente, en este caso la arcilla, y el líquido o gas adsorbido, denominado adsorbato).

La capacidad de adsorción se expresa en porcentaje de adsorbato con respecto a la masa y depende, para una misma arcilla, de la sustancia de que se trate. La absorción de agua de arcillas absorbentes es mayor del 100% con respecto al peso.

- **Hidratación e hinchamiento:** Aunque hidratación y deshidratación ocurren con independencia del tipo de catión de cambio presente, el grado de hidratación si está ligado a la naturaleza del catión interlaminar y a la carga de la lámina. La absorción de agua en el espacio interlaminar tiene como consecuencia la separación de las láminas dando lugar al hinchamiento, este proceso depende del balance entre la atracción electrostática catión-lamina y la energía de hidratación del catión.

Cuando el catión interlaminar es el sodio, las esmécticas tienen una gran capacidad de hinchamiento, pudiendo llegar a producirse la completa disociación de cristales individuales de esméctica, teniendo como resultado un alto grado de dispersión y un máximo desarrollo de propiedades coloidales **[Romero:2005]**.

- **Tixotropía:** Se define como la pérdida de resistencia de un coloide, al amasarlo y su posterior recuperación con el tiempo. Las arcillas tixotrópicas cuando son amasadas se convierten en un verdadero líquido, pero cuando se las dejan en reposo recuperan la cohesión, así como el comportamiento deberá poseer un contenido en agua próximo a su límite líquido. Por el contrario, en torno a su límite plástico no existe posibilidad de comportamiento tixotrópico **[Romero: 2005]**.
- **Plasticidad:** Esta propiedad se debe a que el agua forma una envuelta sobre las partículas laminares produciendo un efecto lubricante que facilita el deslizamiento de unas partículas sobre otras cuando se ejerce un esfuerzo sobre ellas, la plasticidad puede determinarse a través de los índices de

Atterberg (límite líquido, límite plástico y límite de retracción). Estos límites marcan una separación arbitraria entre los cuatro estados o modos de comportamiento de un suelo sólido, semisólido, plástico y semilíquido o viscoso [Romero: 2005]. El límite plástico es el contenido de humedad mínimo en la que el suelo se puede rodar en roscas de un octavo de pulgada de diámetro sin romperse en pedazos. El límite líquido es la mínima cantidad de humedad en la cual la tierra empezara a fluir cuando es sacudido suavemente [Mielenz: 1952]. En la *tabla 1.7* se muestran los índices de plasticidad para las arcillas.

Tabla 1.7 Índices de plasticidad para las arcillas [Mielenz: 1952].

Plasticidad	Índice de plasticidad
No plástico	0
Leve	1 a 5
Bajo	5 a 10
Medio	10 a 20
Alta	20 a 40
Muy alta	40 a mas

1.5.3 Bentonita

Generalmente el término bentonita es usado para designar una forma natural de roca, de grano muy fino compuesto en mayor parte de material arcilloso montmorillonita, la bentonita adicionalmente a la montmorillonita contiene una pequeña proporción de otros minerales, usualmente cuarzo, feldespato, cristales volcánicos, materia orgánica, yeso o pirita.

El nombre bentonita fue aplicado en los comienzos de 1848 por Knight a una material arcilloso altamente plástico encontrado cerca a Fort Benton, Wyoming, el origen de la bentonita esta atribuida a la alteración de las cenizas volcánicas, o cristales [Clem: 1961].

Según INGEMMET los depósitos de bentonita en el Perú se encuentran distribuidos a lo largo de la franja interandina de la costa, los principales depósitos se encuentran en Tumbes, Piura e Ica. En Tumbes y en Piura abundan las bentonitas sódicas y en Ica las cálcicas.

- **Estructura y propiedades de la bentonita.**

Químicamente, montmorillonita es descrita como un silicato de aluminio hidratado conteniendo pequeñas cantidades de metales alcalinos y alcalino-térreos.

Estructuralmente montmorillonita está hecha de dos elementos básicos: una lámina octaédrica de aluminio y una lámina tetraédrica de sílice. Una celda singular de montmorillonita consiste de dos láminas tetraédricas de sílice, entre las cuales se encuentra una lámina octaédrica de aluminio (Fig. 1.12).

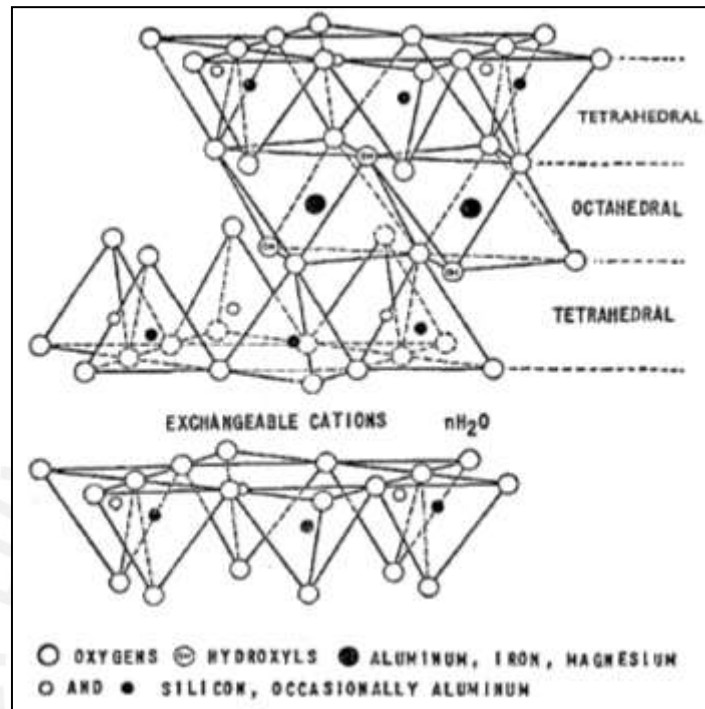


Figura 1.12 Estructura de la montmorillonita [Clem: 1961]

La red de montmorillonita es negativa, debido principalmente a las sustituciones isomorfas de iones dentro de la estructura. Este carácter negativo está balanceado por los cationes que se mantienen en la superficie de las láminas, los cationes más comunes encontrados en la naturaleza son sodio y calcio [Clem: 1961].

La montmorillonita tiene una capacidad de intercambio catiónico alrededor de 70 a 110 meq/100 g de arcilla, esta absorbe agua cuando está disponible, la absorción de agua se produce en mayor medida en la superficie basal de la arcilla y de esta manera las láminas adyacentes, lo que resulta en un aumento global de volumen de la arcilla [Clem: 1961].

Evidencia del mecanismo de inflamación que es vista a través del incremento de dimensión en el eje "c" de la arcilla (figura 1.13).

La montmorillonita sódica (bentonita sódica) tiene una distancia entre capas de 12,5 Å y la montmorillonita cálcica (bentonita cálcica) de 14.2-14.5 Å. Las propiedades importantes de las montmorillonitas sódicas relacionadas con su uso son la

viscosidad, capacidad de hinchamiento, tixotropía, impermeabilidad y dispersabilidad. Para la montmorillonita cálcica sus propiedades importantes relacionadas con su uso son alta capacidad de absorción, fuerza de adhesión y capacidad de blanqueo.

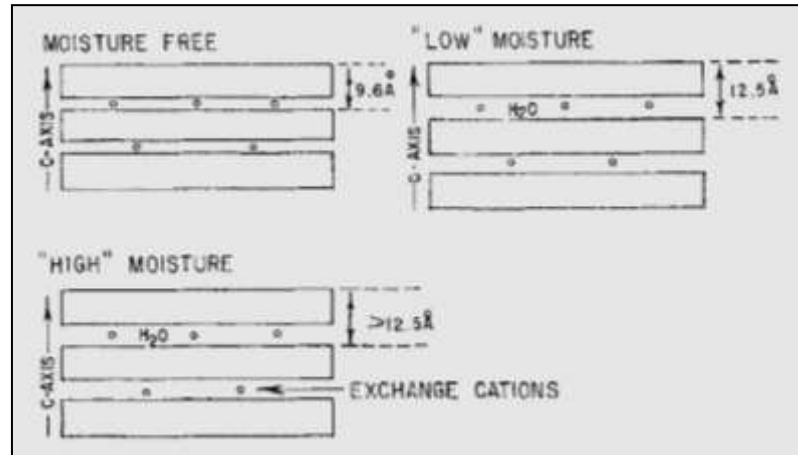


Figura 1.13 Diagrama esquemático que muestra la hinchazón de montmorillonita con el aumento del contenido de humedad [Clem: 1961]

- **Aplicaciones industriales de la bentonita**

El gran uso de la bentonita en la industria resulta por su capacidad de hinchamiento en agua para formar suspensiones viscosas. Dependiendo de las proporciones relativas de arcilla y agua, estas mezclas son usadas como material de unión, plastificante y agentes de suspensión. [Clem: 1961].

Las montmorillonitas sódicas y cálcicas tienen significativamente propiedades diferentes lo que explica algunas de sus aplicaciones únicas. Las bentonitas sódicas tienen un mayor grado de hinchazón que las bentonitas cálcicas. A continuación se muestra algunas aplicaciones de las bentonitas sódicas y cálcicas:

- ✓ **Fluidos de perforación:** Bentonita sódica es el mayor constituyente de los lodos de perforación e agua dulce. La función del lodo de perforación es remover los sólidos del fondo del pozo de perforación y transportarlos hasta la superficie, lubricar y enfriar la broca de perforación, y construir una pared impermeable en la pared de perforación para evitar la penetración de agua desde el fluido de perforación en las formaciones y fluidos formados en el lodo de perforación. Otra importante propiedad es la tixotropía, que cuando la perforación cese, el lodo debe formar rápidamente un gel para prevenir que los sólidos se depositen en el fondo del pozo de perforación y puedan atascar la

broca de perforación, además cuando la perforación se inicie nuevamente el lodo de perforación debe convertirse en un fluido. La bentonita sódica tiene la propiedad tixotrópica y también forma una capa impermeable a lo largo de la superficie del pozo de perforación [Murray: 2007].

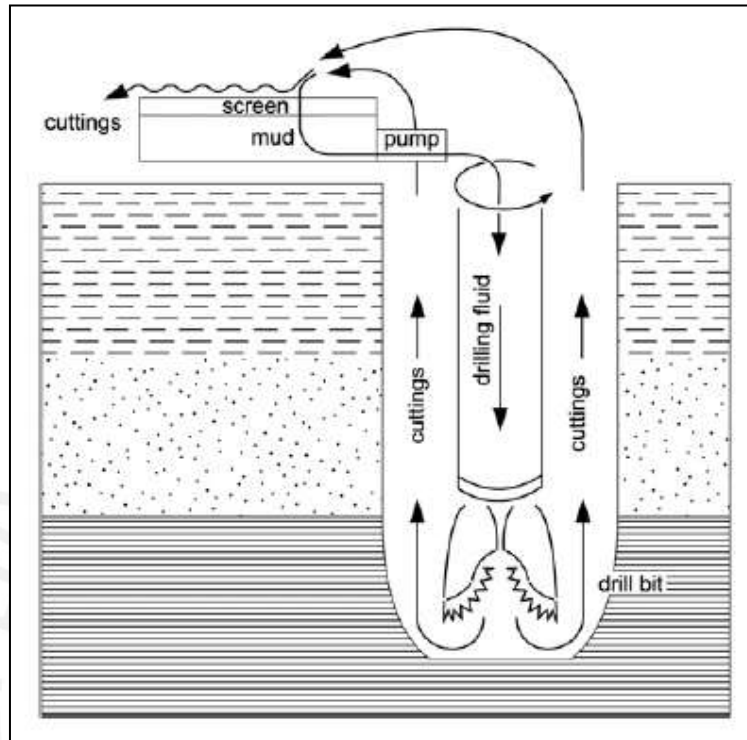


Figura 1.14 Esquema que muestra el flujo del lodo de perforación en un pozo petrolero [Murray: 2007]

- ✓ **Adhesivos en fundición:** Arenas de moldeo compuestas de sílice y bentonita son ampliamente usadas en la formación de metales durante el proceso de fundición. En este caso la bentonita sódica y cálcica son usadas como adhesivos para arenas de fundición, la mezcla de ambas bentonitas proporciona las propiedades óptimas que son necesitadas, tales como la resistencia a la compresión en verde, resistencia a la compresión en seco, resistencia al calor, fluidez y permeabilidad.
- ✓ **Aglutinantes para alimentos de animales:** Ambos tipos de bentonita son usadas para aglutinar la comida de los animales en pastillas. La finamente bentonita pulverizada es muy plástica y enlaza la comida y otros necesarios suplementos medicinales como antibióticos, vitaminas y minerales, en los pellets que son fáciles de guardar y manejar. La bentonita sódica y cálcica actúan como absorbentes de bacterias y ciertas enzimas, quienes al ser removidas del animal, contribuye a un rápido crecimiento y mejor salud.

- ✓ **Barreras de arcilla:** Bentonita sódica es usada extensivamente por su impedancia al agua debido a su alta capacidad de hinchamiento. La alta inflamación de la bentonita llena los poros y evita en el material que es incorporado al agua u otros líquidos moverse a través de la barrera. Los usos más comunes de la bentonita sódica son en estructuras de tierra, como las presas, para sellar los canales de riego, para evitar filtraciones de agua de estanques y para evitar que el agua entre en los sótanos de las casas. La bentonita sódica también se utiliza en los rellenos sanitarios y vertederos de desechos tóxicos como revestimientos para evitar la entrada de agua y filtraciones de los líquidos [**Keith: 1994**].

- ✓ **Cemento:** La adición de 1 a 2% de bentonita sódica en el cemento portland en el concreto y lechadas de cemento mejora la trabajabilidad, disminuye la segregación y aumenta la impermeabilidad [**Murray: 2007**].
Además se ve afectado otros factores como el tiempo de fraguado del cemento que dependerá de la relación bentonita cemento, donde el mantenimiento de una agitación retrasa considerablemente el fraguado. Con el lodo en reposo, el fraguado se inicia de media a diez horas después de la adición del cemento; así como también la densidad seca del material que puede oscilar de 0,3 a 0,6, lo cual implica un sólido muy ligero y poroso y por último la impermeabilidad que oscila alrededor de 10^{-6} cm/seg; que normalmente es un valor sobrado para obtener la impermeabilidad deseada [**Perate: 1976**].

- ✓ **Zapatas semiduras:** Consiste en excavar un pozo o zapata profunda sin entibación, sustentando las paredes con lodo bentonita-cemento de 20 a 60Kg/cm² de resistencia. El procedimiento es muy adecuado para el caso frecuente que exista un terreno superficial muy flojo y aparezca el estrato resistente a pocos metros de profundidad, pero ya bajo el nivel freático, bastando la resistencia del hormigón plástico, que solo debe trabajar a 5 o 10 Kg/cm² [**Perate: 1976**].

CAPITULO 2: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.

2.1 PREPARACIÓN DE PROBETAS

En esta sección se explicaran las actividades y procedimientos correspondientes a la parte experimental del estudio: proceso de fabricación de probetas hechas de material compuesto de lodos de papel, cemento y bentonita, diseño experimental y la realización de los ensayos de según las normas ASTM.

2.1.1 Materiales

a) Lodos de Papel

El lodo de papel usado en el estudio será cuando la empresa Kimberly Clark esté produciendo papel higiénico suave económico, esta elección se estableció debido a que es el papel higiénico que la empresa más produce y es el papel que más residuos produce por lo que su uso sería más provechoso (*figura 2.1*).



Figura 2. 1 Lodos de papel

Las *tablas 2.1 y 2.2* presentan los resultados de los análisis de peligrosidad realizados a los lodos de papel en el laboratorio ambiental de SGS del Perú S.A.C, incluyéndose en la última columna de la derecha los valores límites permisibles para dichas características de peligrosidad de acuerdo a lo normado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US-EPA) en el título 40, Protección del Ambiente del código de Regulaciones Federales- parte 261; así como la norma de Brasil ANBT NBR 10004-Anexo F y el Decreto Supremo N° 057-2004 PCM-Anexo 4

Tabla 2.1 Resultados de los ensayos de reactividad, inflamabilidad, corrosividad y pH en suelos

Parámetro	Unidad	Estaciones de Muestreo		Limite permisible referencial
		Lodos deshidratados de planta de tratamiento de aguas residuales industriales		
Reactividad	HCN	mg/kg	< 0.125	250 ¹
	H2S	mg/kg	0.62	500
Inflamabilidad		°C	< 2.2	60
Corrosividad		mm/año	< 6.35	6.35
pH en suelos		u pH	7.22	-----

Tabla 2.2 Resultados de los ensayos de toxicidad inorgánica-lodos de papel

Parámetro	Unidad	Estaciones de Muestreo		Limite permisible referencial	Limite permisible referencial	Limite permisible referencial
		Lodos deshidratados de planta de tratamiento de aguas residuales industriales				
Procedimiento Característico de Lixiviación	Arsénico	mg/L	< 0.005	5	1	NO PELIGROSO (No se encuentra trazas de metales pesados)
	Bario	mg/L	< 0.003	100	70	
	Cadmio	mg/L	< 0.001	1	0.5	
	Cromo	mg/L	0.004	5	5	
	Plata	mg/L	< 0.001	5	5	
	Plomo	mg/L	< 0.004	5	1	
	Mercurio	mg/L	< 0.001	0.2	0.1	

Los lodos de papel se caracterizan porque tienen como componentes las tintas de los papeles reciclados, carga mineral debido a los químicos usados en el tratamiento de aguas residuales y fibra celulosa que no ha sido aprovechada en la formación del papel como consecuencia de la eficiencia de los procesos.

b) Cemento.

El cemento a usar es el Portland tipo I de la marca SOL (figura 2.2) y sus especificaciones técnicas corresponden a la norma ASTM C150 Y NTP 334.009 (Norma Técnica Peruana).

A continuación se muestra en la *tabla 2.3* los requerimientos del cemento portland tipo I según la norma ASTM C150.

Tabla 2.3 Requerimientos físicos estándar del cemento portland tipo I según norma ASTM C150-12

Tipo de cemento	Método de ensayo aplicable	Tipo I
Contenido de aire en el mortero, % volumen	C185	
máx.		12
min		---
Finura, superficie específica m²/Kg	C204	
min		260
máx.		---
Expansión autoclave, máx. %	C151	0.8
Resistencia, valores no menores a los mostrados para las edades mostradas a continuación		
Resistencia a la compresión (MPa)	C109/C109M	
1 día		---
3 días		12
7 días		19
28 días		28
Tiempo de fraguado; Vica test	C191	
Tiempo de fraguado, min, no menores a		45
Tiempo de fraguado, min, no mayores a		375

El cemento portland tipo I se conoce como el cemento normal de uso común, está destinado para uso general que no requiera propiedades especiales especificadas para cualquier otro tipo. Por su buen desarrollo de resistencias a la compresión a temprana edad, es usado en concreto de muchas aplicaciones como fabricación de bloques, tubos para acueductos y alcantarillado, terrazos, adoquines, además de

un amplio uso en la albañilería. Sin embargo son compuestos muy reactivos, pues al reaccionar con sustancias como sulfatos llegan a desintegrarse totalmente



Figura 2. 2 Cemento Portland Tipo I marca Sol

c) Bentonita sódica.

La bentonita sódica es un sellante natural y su uso ha crecido de manera importante en depósitos de residuos tanto tóxicos, como radiactivos. Al poseer como características gran capacidad de hinchamiento, alta impermeabilidad, baja compresibilidad son las bentonitas sódicas las más usadas. Como material impermeabilizante y contenedor se usan en los siguientes campos:

- Contenedores de aguas frescas. Estanques y lagos ornamentales, canales.
- Contenedores de aguas residuales: Efluentes industriales (balsas).
- Suelos contaminados: Cubiertas, barreras verticales.
- Sellado de pozos de aguas subterráneas contaminadas.
- Depósitos de residuos radioactivos

La bentonita sódica a usar se muestra en la *figura 2.3*



Figura 2. 3 Bentonita sódica de la marca COMACSA

La composición de la bentonita sódica para el estudio se muestra en la *tabla 2.4* y sus propiedades se muestran en los las *tablas 2.5* y *2.6*.

Tabla 2.4 Composición química de la bentonita sódica

Compuesto	Porcentaje
Oxido de Silicio(SiO ₂)	70.92
Oxido Férrico(Fe ₂ O ₃)	2.72
Oxido de Magnesio (MgO)	2.47
Oxido de Calcio (CaO)	1.78
Oxido de Sodio (Na ₂ O)	1.97
Oxido de Potasio (K ₂ O)	0.37
Sulfatos	0.39

Propiedades físicas:

Tabla 2.5 Propiedades físicas de la bentonita sódica

	Método	Típico	Rango	Unidades
Residuo en Tamiz N ^o 325 (45µm)	LAB-IN-012	3.03	0.00 a 6.00	%
Residuo en Tamiz N ^o 200 (75µm)	LAB-IN-011	2.24	0.00 a 8.00	%
Absorción de agua	LAB-IN-030	1:07	1:7 a 1:8	%

Otras propiedades:

Tabla 2.6 Otras propiedades de la bentonita sódica

	Método	Típico	Rango	Unidades
Densidad aparente	LAB-IN-020	685	0.00 a 6.00	g/l
Gravedad específica	LAB-IN-019	2.435	--	--
pH (suspensión acuosa al 10%)	LAB-IN-025	8.6	8.30 a 9.00	--
Humedad	LAB-IN-026	8.4	6.00 a 12.00	%

2.1.2 Proceso de fabricación de probetas

Para el estudio se realizó dos tipos de probetas: probetas de flexión que tiene la forma de un prisma cuadrangular y probetas de compresión que tienen forma cilíndrica, ambas tienen el mismo proceso de preparación de la mezcla de los materiales (*figura 2.6*), la diferencia es en el tipo de molde y los parámetros del prensado. Para la fabricación de probetas se seguirá el siguiente procedimiento:

a) Preparación de los lodos:

Debido a que los lodos de papel salidos de la empresa se encuentran aglomerados, a causa de los químicos y al escurrimiento que sufren durante el tratamiento de aguas residuales, no permiten obtener una buena mezcla con el cemento por lo que es necesario disgregar el lodo de papel, para esto usaremos un molino de platos graduándolo en su apertura máxima para evitar cortar las fibras de papel (*figura 2.4*); posteriormente a los lodos de papel se le adiciona agua en una proporción de 100g de agua por cada 350 g de lodo de papel, esta proporción se logró obtener experimentalmente ya que el agua adicional ayuda a obtener una mezcla más homogénea de lodos de papel y cemento además de que facilita la mezcla manual(*figura 2.6-A*).



Figura 2. 4 Molino de platos manual marca CORONA.

b) Preparación del cemento:

Se cierne el cemento para evitar la presencia de grumos y pequeñas piedras durante la mezcla, se mezcla el cemento con agua en una proporción agua cemento de 0,6 (*figura 2.6-B*).

c) Preparación de la bentonita:

La bentonita se mezcla con agua en una proporción de 0.25 para una adecuada hidratación de la bentonita sódica además de que desarrolla un estado plástico que permite mezclarse con el cemento de manera más uniforme (*figura 2.6-C*).

d) Mezcla de los materiales:

- **Mezcla lodos de papel y cemento:** Se mezcla manualmente los lodos de papel y el cemento preparado hasta lograr una mezcla homogénea (*figura 2.6-E*).

- **Mezcla lodos de papel, cemento y arcilla:** Se mezcla primero el cemento y la bentonita (*figura 2.6-D*), posteriormente se adiciona a los lodos de papel y se mezclan hasta obtener una masa uniforme (*figura 2.6-E*).

e) Fabricación de la probeta:

Para el estudio del material compuesto se realizaran dos tipos de probetas, por lo que tendremos dos tipos de molde una será para el ensayo de flexión y la segunda para el ensayo de compresión.

- **Probetas de ensayo de flexión:** La mezcla obtenida previamente será vaciada en el molde de aluminio que tiene como fondo una malla metálica, la cantidad de mezcla colocada en el molde será de 1 Kg, con ayuda de un bablejo se extenderá la mezcla por todos los rincones del molde, finalmente se colocara una lámina de polietileno que facilita el desmoldado (*figura 2.6-F*).
- **Probeta de ensayo de compresión:** La mezcla será colocada en el molde cilíndrico en dos capas, al colocar la primera capa se apisonara unas 20 veces con ayuda de un mazo de madera para evitar la presencia de vacíos, seguidamente se echara la segunda capa y se apisonara nuevamente otras 20 veces, finalmente se colocara una malla metálica para evitar que la mezcla se salga por los lados del cabezal durante el prensado.

f) Prensado:

Probetas de ensayo de flexión: Después de colocar la lámina de polietileno se colocara la tapa de metal y posteriormente se procederá a prensar el molde aplicando una presión de 13,6 MPa por cinco minutos.



Figura 2. 5 Prensa hidráulica manual Paul Weber¹

¹ Calibración del manómetro con balanza peso muerto del laboratorio de energía, según LFP-038-2012 y LFP-040-2012

Probetas de ensayo a compresión: Después de colocar la malla metálica se prensara el molde aplicando una presión de 1,9 MPa por 5 minutos. Para prensar los moldes de flexión y compresión usaremos la prensa hidráulica manual “Paul Weber” de 32 toneladas de capacidad del laboratorio N°4 de la PUCP (*figura 2.5*)



A.- Preparación de los lodos



B.- Preparación del cemento



C.- Preparación de la bentonita



D.- Mezcla cemento y bentonita



E.- Mezcla de los materiales



F.- Vaciado al molde

Figura 2. 6 Proceso de fabricación de las probetas de lodos de papel, cemento y bentonita sódica.

g) Desmoldado y fraguado:

- Probetas para ensayo de flexión: Se retira los tornillos del marco exterior del molde con ayuda de una llave Allen (*figura 2.7-G1*), seguidamente se desmolda la probeta sobre una lámina de polietileno (stretch film) los

suficientemente grande para envolverla completamente (*figura 2.7-G1-1*), esto sirve para que se realice un adecuado fraguado del cemento, la lámina envuelve a la probeta durante 7 días, luego se retira para que la probeta concluya el proceso de endurecimiento (*figura 2.7*).

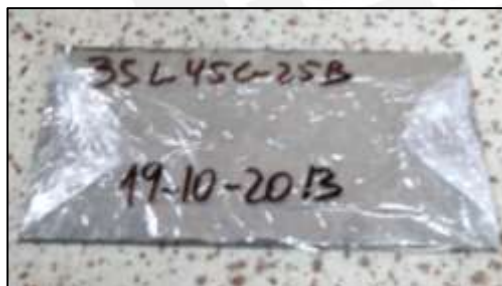
- Probetas para ensayo de compresión: Se desmolda la probeta haciendo uso de un cilindro de plástico que tiene un diámetro cercano al de la probeta y se da un pequeño golpe con una barra de acero para que la probeta logre salir del molde (*figura 2.7-G2*), finalmente la probeta es guardada en un recipiente durante dos días para evitar una rápida pérdida de humedad y asegura un adecuado fraguado de la probeta (*figura 2.7-G2-1*), después de los dos días la probeta es retirada del recipiente y puesta a secar al aire libre.



G1 Desmoldado de probetas de flexión



G2 Desmoldado de probetas de compresión



G1-1 Fraguado de probetas de flexión



G2-1 Fraguado de probetas de compresión

Figura 2. 7 Desmoldado y fraguado de las probetas de flexión y compresión

2.2 DISEÑO EXPERIMENTAL

Para el estudio del material compuesto se empezara por estudiar la mezcla de lodos de papel y cemento, para elegir los rangos de composiciones entre los lodos de papel y cemento nos basaremos en un estudio previo realizado por el Dr. Ing. Julio Acosta Sullcahuaman titulado “Estudio de Materiales Compuestos de Cemento, Papel Reciclado y Quitosano para la Fabricación de Calaminas y Paneles

Tabla 2.8 Composición y codificación de probetas de lodos de papel y cemento para el ensayo de flexión según norma ASTM C1185

Serie	Código Probeta	Lodos de papel (%)	Cemento (%)	**Espesor promedio (mm)
1	1-F-40L	40	60	8.2
	2-F-40L	40	60	8.5
	3-F-40L	40	60	8.2
	4-F-40L	40	60	8.3
	5-F-40L	40	60	8.6
2	1-F-45L	45	55	7.7
	2-F-45L	45	55	8.0
	3-F-45L	45	55	7.6
	4-F-45L	45	55	8.3
	5-F-45L	45	55	8.3
3	1-F-50L	50	50	8.0
	2-F-50L	50	50	8.3
	3-F-50L	50	50	8.0
	4-F-50L	50	50	8.1
	5-F-50L	50	50	8.2
4	1-F-55L	55	45	7.8
	2-F-55L	55	45	8.1
	3-F-55L	55	45	7.8
	4-F-55L	55	45	8.1
	5-F-55L	55	45	7.8
5	1-F-60L	60	40	8.0
	2-F-60L	60	40	8.9
	3-F-60L	60	40	7.7
	4-F-60L	60	40	7.8
	5-F-60L	60	40	8.0

** Espesor medido después de 21 días de la elaboración de la probeta

Tras evaluar los resultados del ensayo de flexión de las probetas de lodos de papel y cemento se obtuvo las tres composiciones a partir de las cuales añadiremos la bentonita sódica, estas composiciones son las siguientes de acuerdo a la codificación establecida: F-50L, F-55L y F-60, la bentonita sódica se añadirá en las siguientes proporciones: 5%, 10%, 15%, 20% y 25%, también se considera que en las tres composiciones obtenidas el porcentaje de cemento en las nuevas mezclas con la bentonita sódica serán constantes, es decir se trabajara con las proporciones de 40, 45 y 50% de cemento constantes mientras que las proporciones de lodos de papel y bentonita serán las que vayan variando, para mayor comprensión observar el diagrama ternario de lodos de papel, cemento y bentonita sódica (*figura 2.9*).

El diagrama ternario tiene los 3 materiales con los que vamos a trabajar, lodos de papel (L), cemento portland tipo I (C) y la bentonita sódica (B).

Los puntos rojos dentro del rectángulo azul de la *figura 1.9* indican las mezclas de lodos de papel y cemento, los números en azul y verde indican la composición de cemento en peso del material compuesto. De aquí los puntos elegidos para agregarles la bentonita sódica son los números en color azul.

Los puntos azules son las mezclas de lodos de papel, cemento y bentonita, presentan un porcentaje en peso de bentonita sódica, el porcentaje de bentonita sódica de cada punto azul se lee horizontalmente (números de color marrón) mientras que el porcentaje de cemento se lee en las líneas inclinadas hacia la derecha y el porcentaje de lodos de papel en las líneas inclinadas hacia la izquierda.

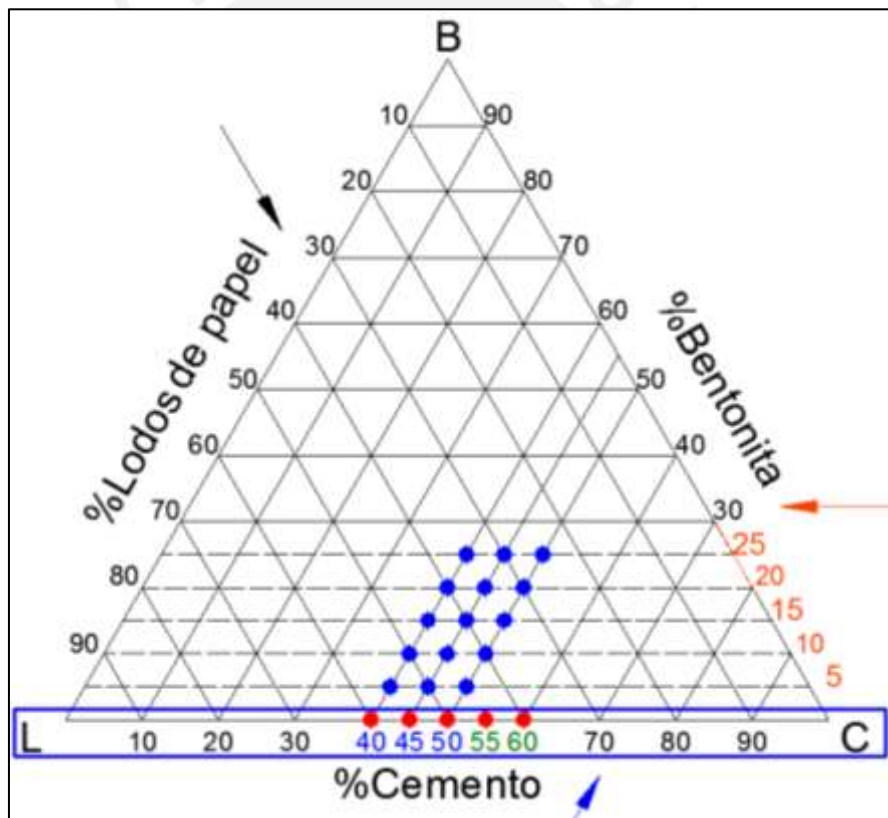
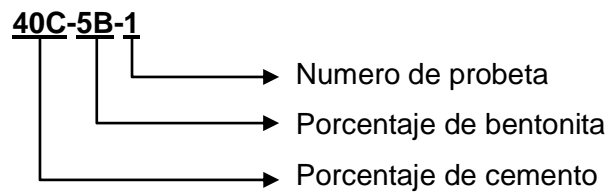


Figura 2. 9 Diagrama ternario de lodos de papel, cemento y bentonita sódica

De las composiciones de lodos de papel, cemento y bentonita se elaborara 5 probetas por cada una y se le realizaran los ensayos de flexión, compresión, densidad y absorción de agua, es por esta razón que para simplificarlos el reconocimiento de cada composición y probeta usaremos la misma codificación para todos las probetas a realizarse.

La codificación usada para identificar a cada probeta se muestra a continuación:



Las *tablas 2.9, 2.10 y 2.11* muestran la codificación y composición de cada probeta, cada tabla presenta 5 series de 5 probetas cada una por cada porcentaje de cemento constante, dándonos como resultado un total de 75 probetas de lodos de papel, cemento y bentonita.

Tabla 2.9 Composición y codificación de probetas para el ensayo de flexión al 40% de cemento según norma ASTM C1185

Serie	Probeta	Lodo (%)	Cemento (%)	Bentonita (%)
1	40C-5B-1	55	40	5
	40C-5B-2	55	40	5
	40C-5B-3	55	40	5
	40C-5B-4	55	40	5
	40C-5B-5	55	40	5
2	40C-10B-1	50	40	10
	40C-10B-2	50	40	10
	40C-10B-3	50	40	10
	40C-10B-4	50	40	10
	40C-10B-5	50	40	10
3	40C-15B-1	45	40	15
	40C-15B-2	45	40	15
	40C-15B-3	45	40	15
	40C-15B-4	45	40	15
	40C-15B-5	45	40	15
4	40C-20B-1	40	40	20
	40C-20B-2	40	40	20
	40C-20B-3	40	40	20
	40C-20B-4	40	40	20
	40C-20B-5	40	40	20
5	40C-25B-1	35	40	25
	40C-25B-2	35	40	25
	40C-25B-3	35	40	25
	40C-25B-4	35	40	25
	40C-25B-5	35	40	25

Cabe mencionar que las probetas para ensayo de flexión tendrán un peso de 1000 gramos y las probetas de ensayo de compresión tendrán un peso de 400 gramos,

para el caso de las probetas de compresión se realizaran 3 probetas por cada composición.

Tabla 2.10 Composición y codificación de probetas para el ensayo de flexión al 45% de cemento según norma ASTM C1185

Serie	Probeta	Lodo (%)	Cemento (%)	Bentonita (%)
1	45C-5B-1	50	45	5
	45C-5B-2	50	45	5
	45C-5B-3	50	45	5
	45C-5B-4	50	45	5
	45C-5B-5	50	45	5
2	45C-10B-1	45	45	10
	45C-10B-2	45	45	10
	45C-10B-3	45	45	10
	45C-10B-4	45	45	10
	45C-10B-5	45	45	10
3	45C-15B-1	40	45	15
	45C-15B-2	40	45	15
	45C-15B-3	40	45	15
	45C-15B-4	40	45	15
	45C-15B-5	40	45	15
4	45C-20B-1	35	45	20
	45C-20B-2	35	45	20
	45C-20B-3	35	45	20
	45C-20B-4	35	45	20
	45C-20B-5	35	45	20
5	45C-25B-1	30	45	25
	45C-25B-2	30	45	25
	45C-25B-3	30	45	25
	45C-25B-4	30	45	25
	45C-25B-5	30	45	25

Así también el ensayo de densidad y absorción de agua se realizara a las mezclas de lodos de papel y cemento y en cuanto a las mezclas de lodos de papel, cemento y bentonita sódica se realizara a las mezclas que tengan solo uno de los porcentajes de cemento constante (40%, 45% y 50% de cemento) y además dentro de ellas se debe encontrar la de mayor resistencia a la flexión.

Tabla 2.11 Composición y codificación de probetas para el ensayo de flexión al 50% de cemento según norma ASTM C1185

Serie	Probeta	Lodo (%)	Cemento (%)	Bentonita (%)
1	50C-5B-1	45	50	5
	50C-5B-2	45	50	5
	50C-5B-3	45	50	5
	50C-5B-4	45	50	5
	50C-5B-5	45	50	5
2	50C-10B-1	40	50	10
	50C-10B-2	40	50	10
	50C-10B-3	40	50	10
	50C-10B-4	40	50	10
	50C-10B-5	40	50	10
3	50C-15B-1	35	50	15
	50C-15B-2	35	50	15
	50C-15B-3	35	50	15
	50C-15B-4	35	50	15
	50C-15B-5	35	50	15
4	50C-20B-1	30	50	20
	50C-20B-2	30	50	20
	50C-20B-3	30	50	20
	50C-20B-4	30	50	20
	50C-20B-5	30	50	20
5	50C-25B-1	25	50	25
	50C-25B-2	25	50	25
	50C-25B-3	25	50	25
	50C-25B-4	25	50	25
	50C-25B-5	25	50	25

2.3 MÉTODOS DE ENSAYO

Los ensayos a realizarse serán: ensayos de flexión, compresión, densidad, absorción de agua. Con estos ensayos se busca conocer las propiedades del material compuesto y el efecto de cada componente en el para así poder determinar cuáles podrían ser sus aplicaciones.

2.3.1 Ensayo de flexión.

- **Objetivo**

Medir la resistencia del material al soportar esfuerzos combinados de tracción y compresión, de este ensayo se podrá obtener el momento flector de rotura junto con la manipulabilidad del material a ensayar.

- **Normas**

ASTM C1185-08 Standard Test Methods for Sampling and Testing Non-Asbestos Fiber Cement Flat Sheet, Roofing and Siding Shingles, and Clapboards

- **Dimensiones de las probetas**

La norma ASTM C1185-08 establece las siguientes dimensiones para las probetas que van a ser ensayadas a flexión:

- Longitud: 305 ± 1.6 mm
- Ancho: 152 ± 1.6 mm (*figura 2.10*)

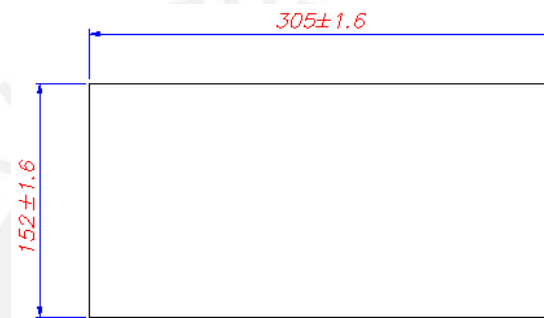


Figura 2. 10 Dimensiones de la probeta para el ensayo de flexión según norma ASTM C 1185-08

- **Materiales y Equipos**

Máquina de ensayo universal Zwick-Roell SP-600 del laboratorio de materiales de la sección de ingeniería mecánica

- **Metodología de Ensayo**

Empezar colocando la parte inferior de la probeta en soportes que no puedan provocar limitaciones longitudinales (bordes de rodamientos, rodillos, balancines) que tengan como mínimo un radio entre 3.2 mm y 12.7 mm y aplicar la carga a través de un rodillo de similar borde al de los apoyos.



Figura 2. 11 Probeta de ensayo de flexión preparada

Cabe resaltar que la carga será aplicada en el medio de la probeta, para esto previamente al ensayo se deberá trazar una línea en la zona media de la probeta para ayudar a fijar (*figura 2.11*).

Los parámetros de ensayo dados por la norma como la distancia entre soportes donde se colocara la probeta y la manera en cómo se aplicara la carga en ella se aprecia en la *figura 2.12*.

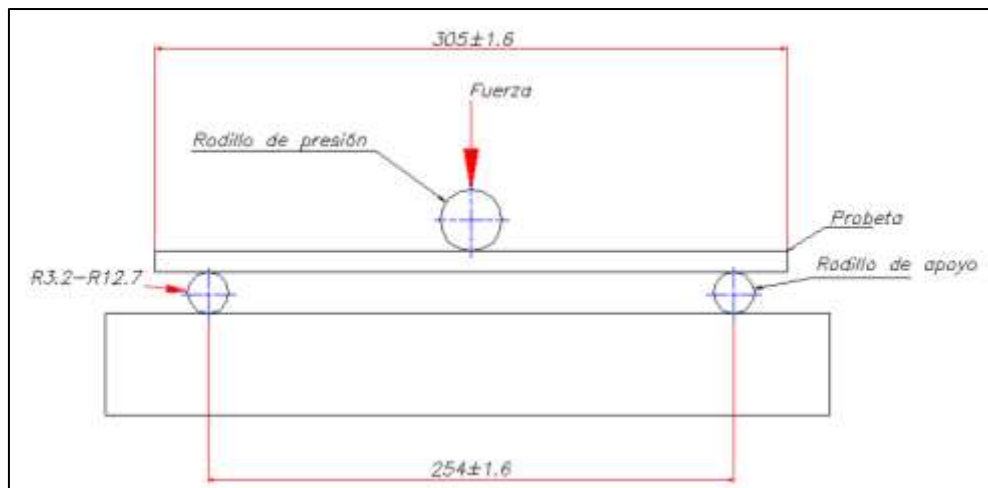


Figura 2. 12 Parámetros de ensayo según norma ASTM C1185-089

En la *figura 2.13* se puede observar la realización de un ensayo en la máquina de ensayo universal Zwick-Roell SP-600² del Laboratorio de Materiales de la sección de Ingeniería Mecánica.



Figura 2. 13 Máquina de ensayo universal Zwick-Roell SP-600

² Calibración de la prensa con celdas de carga según LFP-386-2013

El ensayo consiste en incrementar la carga aplicada en la probeta con una velocidad de deflexión uniforme, como tal resultara en una falla de la muestra entre 5 y 30 segundos, para nuestros ensayos se usara una velocidad de 10 mm/min. El error en la lectura de la carga no podrá exceder 1% de la máxima carga.

La *figura 2.14* muestra una probeta ensayada a flexión y se puede apreciar que la rotura de la misma ocurre cercanamente a la línea trazada en el medio de la probeta.

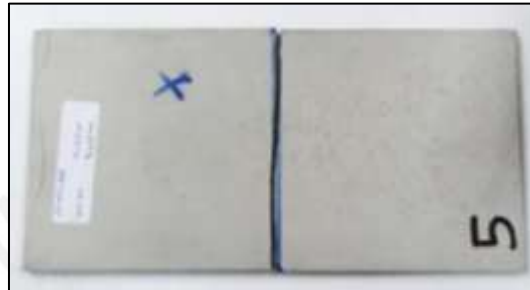


Figura 2. 14 Probeta de flexión ensayada

También se mide el espesor de la muestra en cuatro puntos a lo largo de la línea de rotura para obtener un resultado promedio y usar este en el cálculo de la resistencia a la flexión, y por último se mide el ancho de la probeta.

- **Cálculo de la resistencia a la flexión**

Calcular la resistencia a la flexión para cada espécimen con la siguiente ecuación:

$$R = \frac{3PL}{2bd^2}$$

Dónde:

R=resistencia a la flexión, MPa,

P= carga máxima, N,

L=longitud entre rodillos de apoyo, mm

b=ancho del espécimen, mm

d=espesor promedio, mm.

- **Cálculo del índice de manipulabilidad**

Los valores del índice de manipulabilidad son relativos y son usados para determinar la prestación del material a ser manipulado sin romperse. Un incremento

en el índice de manipulabilidad indica mayor facilidad de manejo, para el cálculo del índice de manipulabilidad se usa la siguiente formula:

$$U = \frac{0.5 P\Delta}{t}$$

Dónde:

U= índice de manipulabilidad (mm-N/mm)

P= carga de rotura (N)

Δ = ultima deflexión (mm)

t= espesor de la probeta (mm)

- **Calculo del momento de rotura**

Para el cálculo del momento de rotura se empleara la siguiente ecuación:

$$M = \frac{PL}{4b}$$

Dónde:

M= momento de rotura (N-m/m)

P= carga máxima (N)

L= longitud entre rodillos de soporte (m)

b= ancho de la probeta (m)

2.3.2 Ensayo de compresión

- **Objetivo**

Medir la resistencia del material al soportar esfuerzos de compresión.

- **Normas**

ASTM C470-06-Standard Specification for Molds for Forming Concrete Test Cylinders Vertically

ASTM C39-12- Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens

- **Dimensiones de las probetas**

La norma ASTM C470-06 establece las siguientes dimensiones para las probetas que van a ser ensayadas a compresión:

- Longitud: 66 ± 2 mm
- Diámetro: 50 ± 2 mm (*figura 2.15*)

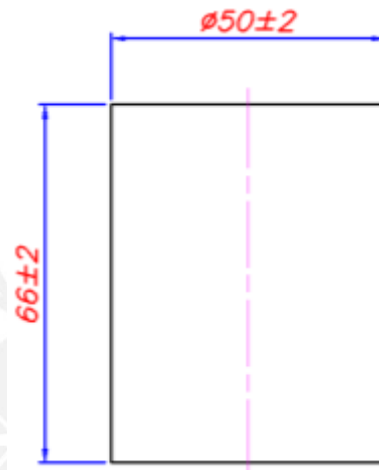


Figura 2. 15 Dimensiones de las probetas para ensayo de compresión según norma ASTM C39

- **Materiales y equipos**

Máquina de ensayo universal Zwick-Roell SP-600 del laboratorio de materiales de la sección de ingeniería mecánica *figura 2.16*.

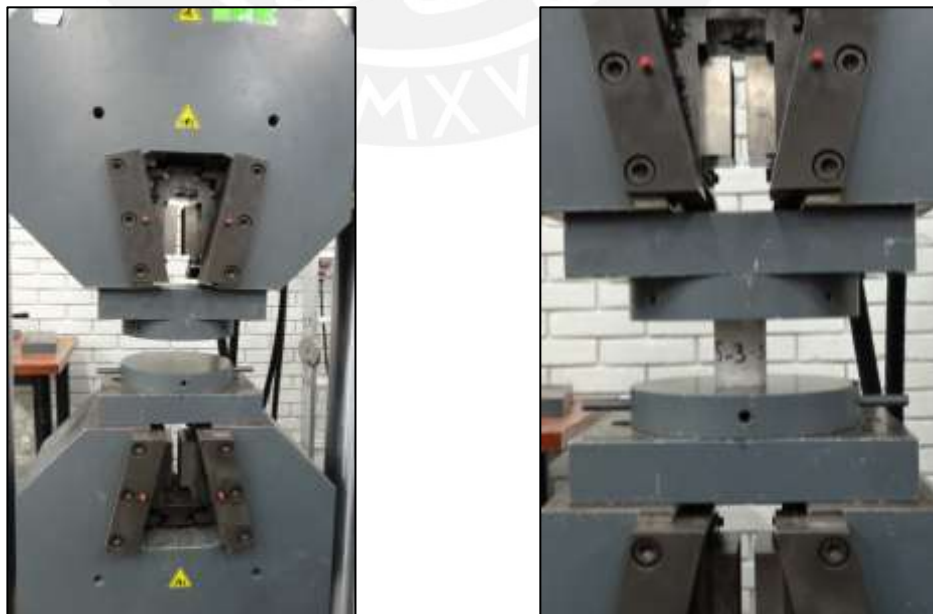


Figura 2. 16 Máquina de ensayo universal Zwick-Roell SP-600 preparada para ensayo de compresión

- Metodología de Ensayo

ASTM C39-12

El diámetro usado para calcular el área de la sección transversal de la muestra de ensayo se determinara con una precisión de 0,25 mm [0,01 pulgadas] de un promedio de dos diámetros medidos en ángulos rectos entre sí, se mide aproximadamente a la mitad de la altura de la muestra. Además se debe aplanar las superficies por donde la probeta va a ser sometida a compresión (*figura 2.17*).



Figura 2. 17 Probetas de compresión medidas y aplanadas

Colocación de la muestra: Colocar el bloque de apoyo (inferior) plano, con su cara endurecida hacia arriba, en la mesa o placa de la máquina de ensayo directamente bajo el bloque de asiento esférico. Limpiar las superficies de apoyo de los bloques de apoyo superior e inferior y de la probeta y colocar la probeta de prueba sobre el bloque de apoyo inferior. Cuidadosamente alinear el eje de la muestra con el centro de empuje del bloque de asiento esférico.

Verificación cero y bloque de asiento: Antes de ensayar la probeta, verificar que el indicador de carga este puesta en cero. En casos donde el indicador no está apropiadamente puesto en cero, ajustar el indicador. Después de colocar la probeta en la máquina de ensayo y antes de aplicar la carga, inclina la parte movable del bloque de asiento esférico levemente con la mano hasta que la cara de los apoyos luzca paralelo a la parte superior de la probeta.

Velocidad de carga: Aplicar la carga continuamente y sin sobresaltos. La carga puede ser aplicada en una velocidad correspondiente a una velocidad de esfuerzo en la probeta de 0.25 ± 0.05 MPa/s. No hacer ajustes en la velocidad de movimiento cuando la última carga está siendo alcanzada y la velocidad de esfuerzo decrece debido a la formación de grietas en la probeta.

Aplicar la carga de compresión hasta que el indicador de carga muestre que la carga está decreciendo sostenidamente y la probeta muestre un patrón de fractura bien definido (tipos del 1 al 6) según *figura 2.18*.

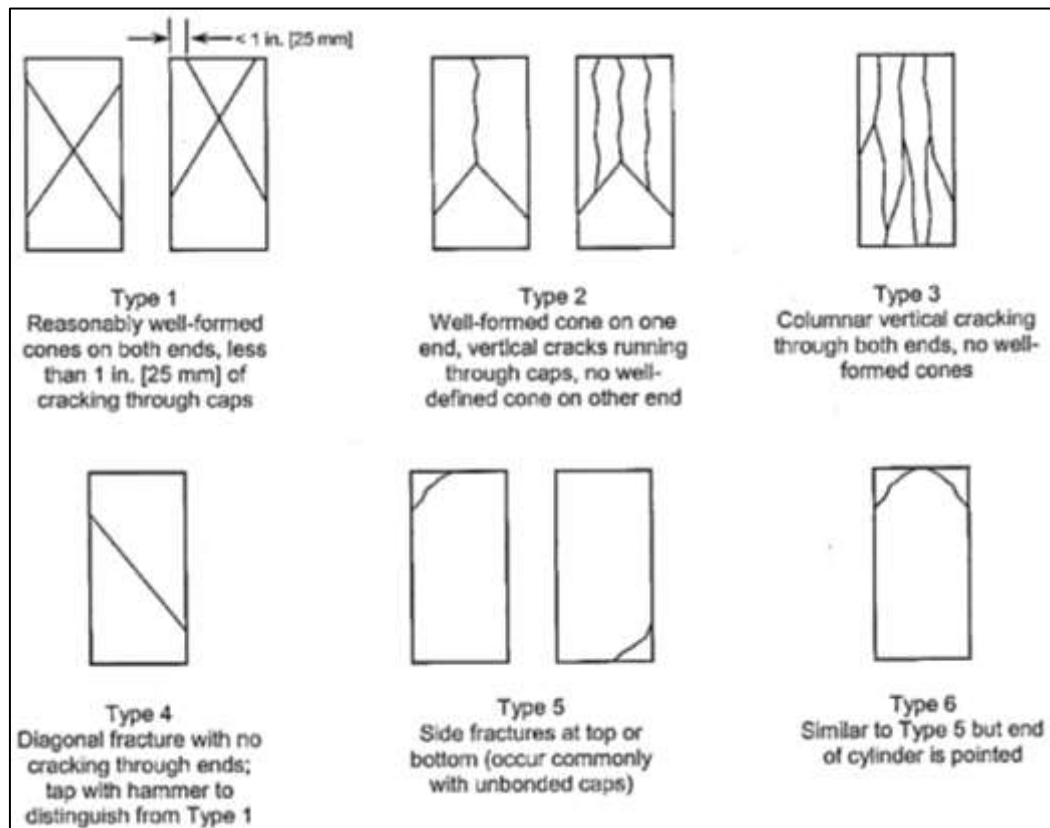


Figura 2. 18 Esquemas de los patrones típicos de fractura según norma ASTM C39-08

- **Cálculo de la resistencia a la compresión**

Para calcular el esfuerzo de compresión de la probeta dividir la máxima carga alcanzada por la probeta durante el ensayo por el área de sección transversal promedio determinada anteriormente y expresar el resultado al 0.1MPa más cercano.

Si la razón entre la longitud y el diámetro de la probeta es 1.75 o menor, corregir el resultado obtenido en el cálculo anterior multiplicando por el apropiado factor mostrado en la siguiente *tabla 2.5*:

Tabla 2.12 Factores de corrección para la resistencia a la compresión según norma ASTM C39-08

L/D	1.75	1.5	1.25	1
Factor	0.98	0.96	0.93	0.87

Usar interpolación para determinar el factor de corrección para valores de L/D que se encuentren en los valores dados en la *tabla 2.15*. En nuestras probetas de compresión será necesario usar esta tabla ya que la razón entre la longitud y el diámetro de las probetas de compresión es menor a 1.75.

2.3.3 Ensayo de densidad

- **Objetivo**

Hallar la relación entre la masa y el volumen del material compuesto a diferentes proporciones para poder conocer el efecto de los lodos de papel y la bentonita.

- **Normas**

ASTM C1185-08 Standard Test Methods for Sampling and Testing Non-Asbestos Fiber Cement Flat Sheet, Roofing and Siding Shingles, and Clapboards.

- **Dimensiones de las probetas**

La norma ASTM C1185-08 establece las siguientes dimensiones para las probetas que se les van a realizar el ensayo de densidad:

Longitud: 50 mm.

Ancho: 50 mm. (*figura 2.19*)



Figura 2. 19 Probetas para ensayo de densidad según norma ASTM C1185-08

- **Materiales y equipos**

Vaso de precipitado de 200 ml

Balanza analítica METLER TOLEDO modelo New Classic ML de 0.0001 gramos de precisión (*figura 2.20*).

Desecador Schott Duran modelo con tapa de tabuladora 24/29 (*figura 2.21*).

Muflla eléctrica



Figura 2. 20 Balanza analítica METLER TOLEDO



Figura 2. 21 Desecador Schott Duran

- **Metodología de Ensayo**

Primero tenemos que determinar la masa en seco de las probetas, para esto las secamos en la muflla eléctrica a $90\pm 2^{\circ}\text{C}$ hasta que la diferencia entre dos medidas consecutivas, en intervalos no menores a dos horas, sea menor a 0.1% de la masa (figura 2.22).



Figura 2. 22 Probetas para ensayos de densidad secadas según norma ASTM C1185-08

Para hallar el volumen de la probeta haremos uso de la formula usada en el método de desplazamiento del agua según la norma ASTM C20, donde el volumen de la probeta (V) es obtenido en centímetros cúbicos de la diferencia entre el peso saturado (S) y el peso suspendido (W), ambos en gramos como aparece a continuación en la siguiente expresión:

$$V = W_s - S$$

Dónde:

V = volumen de la probeta (cm³)

W_s = peso saturado (g)

S = peso suspendido

Esta fórmula asume que 1cm³ de agua pesa 1 gramo y de esta manera se puede hallar el volumen de la probeta.

- **Calculo de la densidad**

El cálculo de la densidad se realiza con la siguiente formula y las unidades de expresión es de kilogramos por metro cubico (kg/m³):

$$Densidad = \frac{W}{V} \times 1\,000\,000$$

Dónde:

W= masa seca de la probeta

V= volumen de la probeta (mm³)

2.3.4 Ensayo de absorción de agua

- **Objetivo**

El ensayo está hecho para determinar la tendencia de un producto para absorber agua y algunas veces para determinar la uniformidad del producto.

- **Normas**

ASTM C1185-08 Standard Test Methods for Sampling and Testing Non-Asbestos Fiber Cement Flat Sheet, Roofing and Siding Shingles, and Clapboards.

- **Dimensiones de la probeta**

La norma ASTM C1185-08 establece las siguientes dimensiones para las probetas que se les van a realizar el ensayo de absorción de agua:

Longitud: 50 mm

Ancho: 50 mm

- **Materiales y Equipos**

Balanza digital “Metler Toledo” de 0.0001g de precisión

Caja Megaforte #50 Rey Plast

Mufla eléctrica

- **Metodología de Ensayo**

Secar las probetas en un mufla eléctrica a una temperatura de $90\pm 2^{\circ}\text{C}$ y enfriarlas en un desecador a temperatura ambiente. Pesar las probetas enfriadas separadamente con un dispositivo que cuente con una precisión de 0,5% la masa de una probeta. Registrar el peso de cada probeta seca.

Sumergir la probeta por 48 ± 8 horas en agua limpia a una temperatura de $23\pm 4^{\circ}\text{C}$, remover cada probeta del agua, secar con un paño húmedo y pesar cada probeta separadamente en una escala de precisión de 0.5% la masa de la probeta (figura 2.23).



Figura 2.23 Probetas para ensayo de densidad según norma ASTM C1185-08

- **Cálculo y reporte**

Calcular el valor de la absorción de agua para cada probeta con la siguiente expresión:

$$\text{Absorción de agua, masa\%} = \left[\frac{W_s - W_d}{W_d} \right] \times 100$$

Dónde:

W_s = masa de la provea saturada (g)

W_d = masa de la probeta seca (g)

Calcular la absorción de agua como el valor promedio de todas las probetas.

CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se muestra los resultados que se obtuvieron durante la investigación, los resultados y el análisis de los diferentes ensayos realizados según la norma ASTM: ensayo de flexión, ensayo de compresión, ensayo de densidad y ensayo de absorción de agua.

3.1 ENSAYOS DE FLEXIÓN

Los resultados de los ensayos de flexión realizados según la norma ASTM C1185-08 a las probetas de lodos de papel y cemento han sido agrupados en la *tablas 3.1* y *3.2* y los resultados de las probetas de lodos de papel, cemento y bentonita son agrupados en las *tablas 3.3* hasta *3.8* de acuerdo a la proporción de cemento constante de 40, 45 y 50% respectivamente.

3.1.1 El efecto del contenido de los lodos de papel

Para analizar los resultados del ensayo de flexión según norma C1185 (*tabla 3.1*), se presenta la variación de la resistencia a la flexión (R_B) con el porcentaje en peso de lodos de papel presente en el material (*figura 3.1*) así como también en las *figuras 3.2* y *3.3* se muestra el momento de rotura (M_R) y la manipulabilidad (U) respectivamente.

En la *tabla 3.5* se muestra los valores promedio de la resistencia a la flexión, momento de rotura y la manipulabilidad mostrados en la *tabla 3.1*.

Tabla 3.1 Resultados del ensayo de flexión según norma ASTM C1185-08 para diferentes porcentajes de cemento

Serie	Probeta	F _{máx} (N)	R _B (MPa)	R _{Bprom} (MPa)	M (N-m/m)	M _{prom} (N-m/m)	U (mm-N/mm)	U prom. (mm-N/mm)
1	1-F-40L	199	7.48	8.79	82.75	102.99	11.88	23.73
	2-F-40L	276	9.53		114.70		23.29	
	3-F-40L	243	8.96		101.05		24.16	
	4-F-40L	205	7.38		85.25		17.35	
	5-F-40L	273	9.20		113.45		34.02	
2	1-F-45L	241	10.23	9.14	100.42	96.02	33.04	26.14
	2-F-45L	221	8.61		91.84		25.22	
	3-F-45L	211	9.23		87.69		25.91	
	4-F-45L	261	9.57		108.54		27.27	
	5-F-45L	311	11.22		128.82		37.47	
3	1-F-50L	239	9.31	9.37	99.32	102.11	28.11	29.26
	2-F-50L	241	8.67		100.15		29.51	
	3-F-50L	233	9.04		97.02		26.21	
	4-F-50L	198	7.48		82.28		18.77	
	5-F-50L	264	9.76		110.00		33.20	
4	1-F-55L	239	11.39	9.55	114.80	100.16	33.42	34.30
	2-F-55L	239	9.12		99.06		33.01	
	3-F-55L	226	9.33		94.04		30.85	
	4-F-55L	267	10.08		110.89		39.11	
	5-F-55L	232	9.66		96.67		35.13	
5	1-F-60L	210	8.18	8.08	87.27	93.70	33.54	40.49
	2-F-60L	211	6.73		87.92		26.92	
	3-F-60L	254	10.86		105.90		48.92	
	4-F-60L	273	11.20		113.60		47.44	
	5-F-60L	211	8.24		87.92		26.63	

Tabla 3.2 Resultados promedios del ensayo de flexión

Probetas	R _{Bprom} (MPa)	M.prom (Nm/m)	U prom(mm,N/mm)
F-40L	8.79	102.99	23.73
F-45L	9.14	96.02	26.14
F-50L	9.37	102.11	29.26
F-55L	9.55	100.16	34.30
F-60L	8.08	93.70	40.49

La *figura 3.1* y la *tabla 3.1* muestran que la resistencia a la flexión (R_B) aumenta conforme se incrementa el contenido de lodos de papel desde 8,79 MPa para 40% de lodos de papel hasta 9,55 MPa para 55% de lodos de papel. Mientras que en la *figura 3.3* el momento de rotura

La *figura 3.1* muestra los valores de resistencia a la flexión más altos entre 50% y 55% de lodos de papel en peso en la mezcla, 9,4 y 9,5 MPa respectivamente, es de esperar que entre estos porcentajes de refuerzo se encuentre el óptimo según muestra la línea de tendencia (se empleó una regresión polinomial de orden 2 por ser la que mejor se adapta a los datos presentados en la *figura 3.1*).

La dispersión presente en los resultados obtenidos, probablemente se deba a la naturaleza misma del material compuesto reforzado con los lodos de papel, el cual depende del grado de adherencia entre las fibras celulósicas de los lodos de papel y cemento que se ve afectada por la presencia de otros residuos presentes en los lodos de papel como pequeños pedazos de madera y plásticos, la homogeneidad que se ha logrado al mezclar los diferentes materiales, el tiempo y las condiciones de curado, la aplicación de la presión a la hora de moldear las probetas. Todos estos valores repercuten en los valores obtenidos de las probetas analizadas y se pueden apreciar en el valor de la dispersión mostrada en la *figura 3.1*.

De acuerdo a la *figura 3.1* se puede apreciar que la resistencia a la flexión va aumentando en mayor grado desde el punto de 40% de lodos de papel hasta los 50% de lodos de papel y a partir de este punto el aumento hasta 55% de lodos de papel es en menor grado. Además los valores más altos se obtuvieron en los puntos de 55% de lodos de papel, alcanzando la probeta *1-F-55L* el valor máximo de 11,4 MPa de resistencia a la flexión. Sin embargo las probetas *5-F-45L* y *4-F-60L*, con 55% y 40% de lodos de papel respectivamente presentan valores de 11,2 MPa (*tabla 3.1*), valores cercanos al promedio alcanzado por las probetas con 55% de lodos de papel y superiores al promedio alcanzado por las probetas de 55% y 40% de lodos de papel.

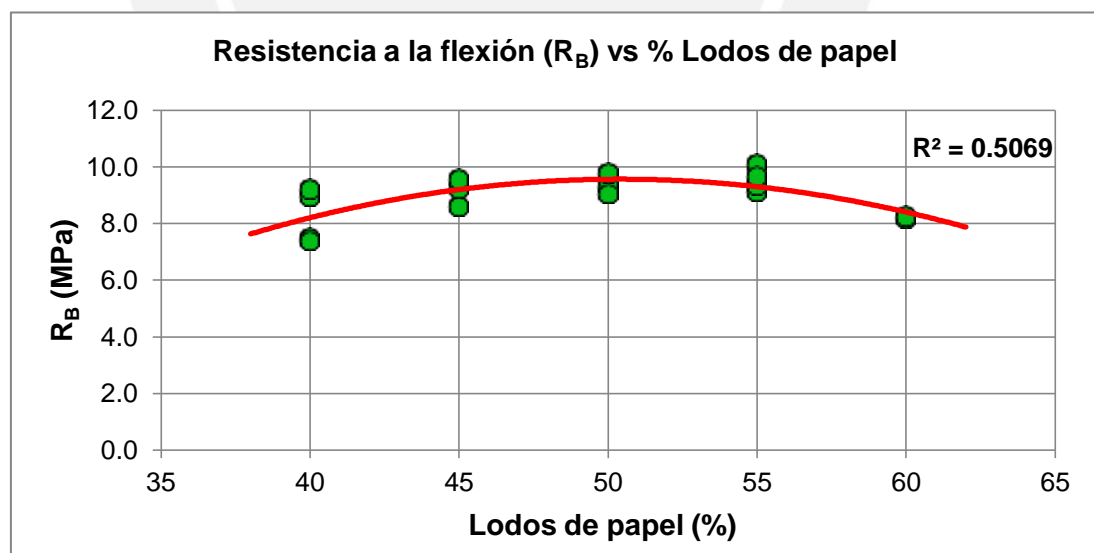


Figura 3.1 Resistencia a la flexión (R_B) vs % Lodos de papel

Este resultado es coherente con el comportamiento de los compuestos de matriz frágil, en tanto que en estos la matriz alcanza su carga de ruptura a niveles relativamente inferiores a los del compuesto y provoca grietas a través del cuerpo del material. Una vez que la matriz está completamente saturada por grietas

microscópicas, la carga ejercida al material compuesto vuelve a incrementarse. A partir de este punto, solo las fibras soportan la carga y la falla ocurre cuando se alcanza la carga máxima que soportan las fibras de los lodos de papel [Bryan, 1999].

El aumento de la resistencia al aumentar el porcentaje de la cantidad de lodos de papel presentes en el material compuesto demuestra que las fibras celulósicas están soportando las cargas transmitidas por la matriz de cemento, lo que indica la existencia de la adherencia entre la matriz de cemento y las fibras celulósicas de los lodos de papel, no obstante dicha adhesión debe ser evaluada por otros métodos tales como la microscopia electrónica de barrido.

Respecto al momento de rotura, los valores no muestran una tendencia respecto al contenido de lodos de papel (*figura 3.2*), alcanzando el valor máximo de 103,0 Nm/m en promedio a 40% de lodos de papel. El valor promedio de momento de rotura alcanzado por la composición de 55% de lodos de papel, que representa el valor de más alta resistencia a la flexión, es 100,2 Nm/m, valor superior en 300% al establecido por la norma ASTM C1225-08 que es de 25Nm/m.

Respecto a la manipulabilidad (*figura 3.3*) se puede apreciar que aumenta conforme se eleva el contenido de pasta de papel hasta alcanzar un valor máximo de 40.5 mmN/mm en promedio a 60% de lodos de papel. La manipulabilidad es un valor relativo que determina la capacidad de un material para ser manipulado sin que se quiebre, la norma no establece ningún valor mínimo de referencia.

A diferencia de los valores de resistencia a la flexión y momento de rotura, la manipulabilidad muestra una gran variación entre el valor mínimo alcanzado de 23,7 mm/N mm a 40% de lodos de papel, y el máximo valor de 40,5 mm/N mm a 60% de lodos de papel que permite una mejor selección de la matriz óptima.

Las composiciones de 40% y 50% de lodos de papel alcanzaron los valores más altos de momento de rotura: 103,0 N/m/m y 102,1 Nm/m respectivamente (*tabla 3.1*), sin embargo sus valores de manipulabilidad no llegan a 30 mmN/mm.

Con los resultados obtenidos en el ensayo de flexión de las probetas de lodos de papel y cemento según norma ASTM C1185 se pudo limitar la composición óptima del material entre 40% y 50% de cemento y así poder realizar las probetas de lodos de papel, cemento y bentonita.

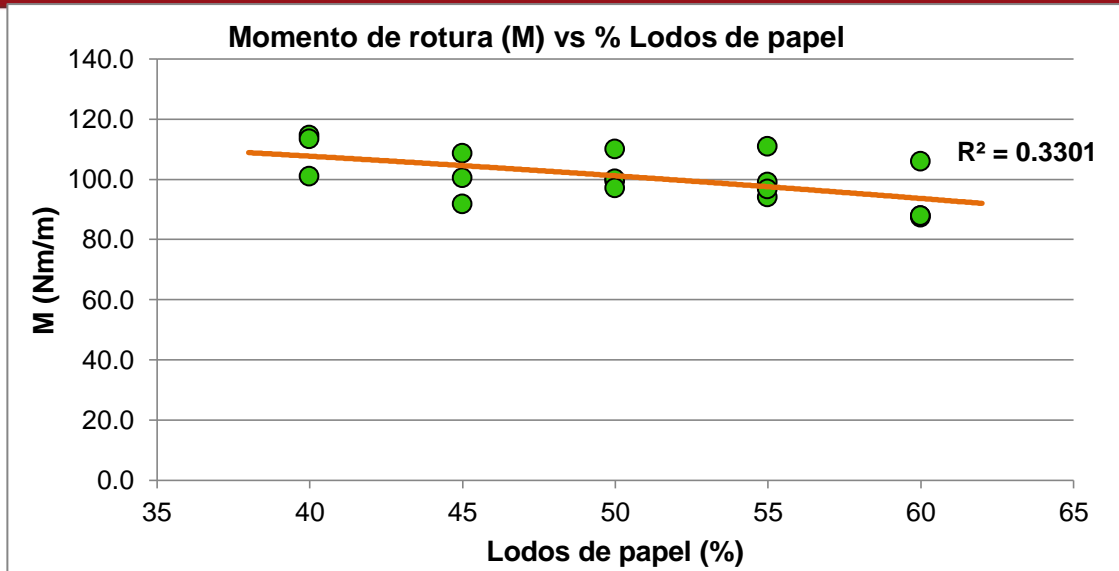


Figura 3.2 Momento de rotura (M) vs % Lodos de papel

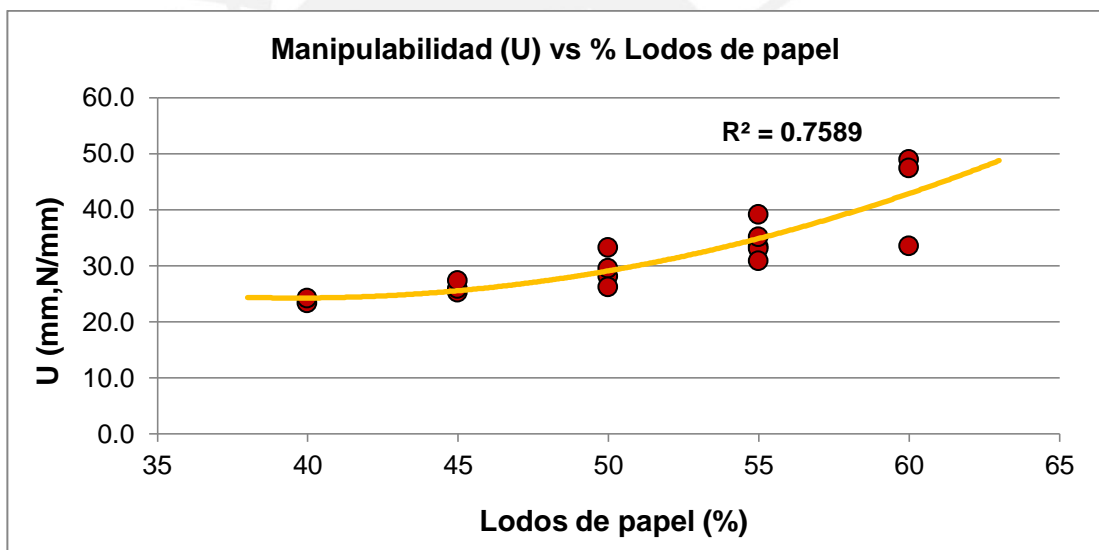


Figura 3.3 Manipulabilidad (U) vs % Lodos de papel

3.1.2 El efecto de la adición de la bentonita sódica

Para analizar los resultados del ensayo de flexión según norma ASTM C1185-08 se representa la variación de la resistencia a la flexión (RB), el momento de rotura (M) y la manipulabilidad (U) en las *tablas* 3.3 hasta 3.8 y *figuras* 3.4 hasta 3.12 respectivamente.

Tabla 3.3 Resultados del ensayo de flexión según norma ASTM C1185-08 para 40% de cemento

Serie	Probeta	F _{máx} (N)	R _B (MPa)	R _B prom (MPa)	M (N- m/m)	M.prom (N-m/m)	U (mm-N/mm)	U prom. (mm-N/mm)
1	40C-5B-1	167	7.55	9.85	69.81	88.66	22.94	43.08
	40C-5B-2	197	9.15		82.35		34.41	
	40C-5B-3	225	9.87		93.81		47.44	
	40C-5B-4	248	12.34		103.67		57.42	
	40C-5B-5	215	10.54		89.82		47.41	
2	40C-10B-1	176	8.17	9.50	73.53	84.02	28.61	36.48
	40C-10B-2	191	8.84		79.64		32.89	
	40C-10B-3	194	9.02		81.21		36.08	
	40C-10B-4	202	9.25		84.39		38.32	
	40C-10B-5	207	10.24		86.48		38.62	
3	40C-15B-1	217	10.47	10.85	90.48	88.57	38.73	37.50
	40C-15B-2	223	11.39		93.04		19.64	
	40C-15B-3	217	10.95		90.71		35.82	
	40C-15B-4	230	11.08		95.71		52.63	
	40C-15B-5	203	10.35		84.53		37.93	
4	40C-20B-1	217	10.49	9.81	90.60	74.17	38.19	32.98
	40C-20B-2	190	10.08		79.27		34.76	
	40C-20B-3	168	8.59		70.14		23.90	
	40C-20B-4	156	9.20		65.21		27.92	
	40C-20B-5	175	9.49		73.11		31.05	
5	40C-25B-1	182	10.77	9.32	75.83	67.93	33.92	30.65
	40C-25B-2	202	10.96		84.44		35.49	
	40C-25B-3	190	10.60		79.32		33.83	
	40C-25B-4	162	8.52		67.59		25.41	
	40C-25B-5	145	8.84		60.38		24.60	

Tabla 3. 4 Resultados promedios del ensayo de flexión al 40% de cemento

Probetas	RBprom.(MPa)	M.prom(Nm/m)	U (mm,N/mm)
40C-5B	9.85	88.66	43.08
40C-10B	9.5	84.02	36.48
40C-15B	10.85	88.57	37.5
40C-20B	9.81	74.17	32.98
40C-25B	9.32	67.93	30.65

En las figuras 3.4, 3.5 y 3.6 se muestran la resistencia a la flexión (R_B) al 40%, 45% y 50 % de cemento variando el % de bentonita sódica en 5%, 10%, 15%, 20% y 25% respectivamente.

Las figuras 3.4, 3.5 y 3.6 muestran que la resistencia a la flexión aumenta, partiendo de las proporciones de 0% bentonita sódica (probetas de lodos de papel y cemento), conforme se agrega la bentonita sódica, obteniéndose al 15% de

bentonita sódica las mayores resistencias a la flexión promedio (*tablas 3.4, 3.6 y 3.8*) de 10,8, 10,9 y 10,7 MPa para 40%, 45% y 50% de cemento respectivamente.

Tabla 3.5 Resultados del ensayo de flexión según norma ASTM C1185-08 para 45% de cemento

Serie	Probeta	F _{máx} (N)	R _B (MPa)	R _B prom (MPa)	M (N-m/m)	M.prom (N-m/m)	U (mm-N/mm)	U prom. (mm-N/mm)
1	45C-5B-1	216	10.17	10.34	90.30	92.62	39.26	40.23
	45C-5B-2	287	12.73		119.98		50.95	
	45C-5B-3	230	10.82		96.09		43.29	
	45C-5B-4	192	7.56		80.05		28.70	
	45C-5B-5	219	10.02		91.49		38.12	
2	45C-10B-1	207	10.14	10.48	86.36	92.34	32.42	36.24
	45C-10B-2	217	10.35		90.65		36.69	
	45C-10B-3	240	12.24		100.00		45.06	
	45C-10B-4	183	8.84		76.40		27.03	
	45C-10B-5	193	9.20		80.58		30.81	
3	45C-15B-1	230	12.11	10.87	96.09	91.47	40.16	34.93
	45C-15B-2	242	11.47		100.50		39.21	
	45C-15B-3	237	10.81		98.69		36.56	
	45C-15B-4	200	9.95		83.61		29.85	
	45C-15B-5	210	9.99		87.50		34.11	
4	45C-20B-1	175	9.71	10.27	73.11	76.27	25.57	31.18
	45C-20B-2	236	12.06		98.46		36.35	
	45C-20B-3	181	9.26		75.62		27.30	
	45C-20B-4	192	10.61		79.84		33.88	
	45C-20B-5	183	9.73		76.50		27.18	
5	45C-25B-1	210	11.81	9.25	87.56	65.96	33.85	29.01
	45C-25B-2	179	10.95		74.78		29.95	
	45C-25B-3	156	9.39		65.13		23.22	
	45C-25B-4	156	8.65		65.09		19.84	
	45C-25B-5	141	7.99		58.87		17.36	

Tabla 3. 6 Resultados promedios del ensayo de flexión al 45% de cemento

Probetas	R _B prom.(MPa)	M.prom(Nm/m)	U prom(mm,N/mm)
45C-5B	10.34	92.62	40.23
45C-10B	10.48	92.34	36.24
45C-15B	10.87	91.47	34.93
45C-20B	10.27	76.27	31.18
45C-25B	9.25	65.96	29.01

Estos valores de resistencia a la flexión son superiores en 98% al valor mínimo de 5,5 MPa establecido según norma ASTM C1225-08 (Standard specification for non-asbestos fiber cement roofing singles, shakes and slates).

Los valores promedios más altos de resistencia a la flexión (*tabla 3.4, 3.6y 3.8*) muestra que las probetas que contienen 45% de cemento son las más resistentes entre 40% y 50% de cemento, dándonos el valor máximo de resistencia a la flexión de 10,9 MPa conteniendo 15% de bentonita sódica y 45% de cemento por tanto se le puede considerar como la composición que presenta mejor combinación de propiedades. Además con respecto a la mayor resistencia promedio de la composición de lodos de papel y cemento (9,5 MPa) con la adición de 15% de bentonita sódica se logra aumentar hasta en un 14% (10,9 MPa).

Tabla 3.7 Resultados del ensayo de flexión según norma ASTM C1185-08 para 50% de cemento

Serie	Probeta	F _{máx} (N)	R _B (MPa)	R _B prom (MPa)	M (N-m/m)	M.prom (N-m/m)	U (mm-N/mm)	U prom. (mm-N/mm)
1	50C-5B-1	221	9.43	9.71	91.96	99.31	31.08	33.26
	50C-5B-2	253	11.88		105.56		35.51	
	50C-5B-3	241	10.38		100.42		31.72	
	50C-5B-4	207	9.34		86.36		27.16	
	50C-5B-5	265	11.94		110.49		34.71	
2	50C-10B-1	226	10.19	10.43	94.23	93.44	31.05	31.33
	50C-10B-2	229	10.68		95.42		32.70	
	50C-10B-3	230	10.63		95.71		30.92	
	50C-10B-4	202	9.07		84.33		26.22	
	50C-10B-5	212	10.23		88.39		30.63	
3	50C-15B-1	251	11.54	10.69	104.45	90.91	33.08	29.28
	50C-15B-2	231	10.25		96.12		31.76	
	50C-15B-3	186	9.15		77.30		25.15	
	50C-15B-4	214	10.26		89.11		26.91	
	50C-15B-5	210	10.71		87.50		29.51	
4	50C-20B-1	217	11.08	10.22	90.48	82.66	28.03	25.42
	50C-20B-2	183	9.20		76.25		23.34	
	50C-20B-3	195	10.39		81.25		24.88	
	50C-20B-4	241	12.65		100.35		32.57	
	50C-20B-5	240	12.98		100.07		36.22	
5	50C-25B-1	178	11.20	8.77	74.12	68.45	27.53	15.25
	50C-25B-2	210	12.04		87.44		33.90	
	50C-25B-3	132	7.43		55.07		14.58	
	50C-25B-4	137	8.78		57.16		16.11	
	50C-25B-5	128	7.68		53.26		15.05	

El aumento de la resistencia a la flexión con la adición de la bentonita sódica se debe también a que esta es un elemento puzolánico, es decir que tienen propiedades cementantes ya que se comporta como un aglomerante lo que permite formar una masa más sólida y resistente.

Tabla 3. 8 Resultados promedios del ensayo de flexión al 50% de cemento

Probetas	R _B prom.(MPa)	M.prom(Nm/m)	U (mm,N/mm)
50C-5B	9.71	99.31	33.26
50C-10B	10.43	93.44	31.33
50C-15B	10.69	90.91	29.28
50C-20B	10.22	82.66	25.42
50C-25B	8.77	68.45	15.25

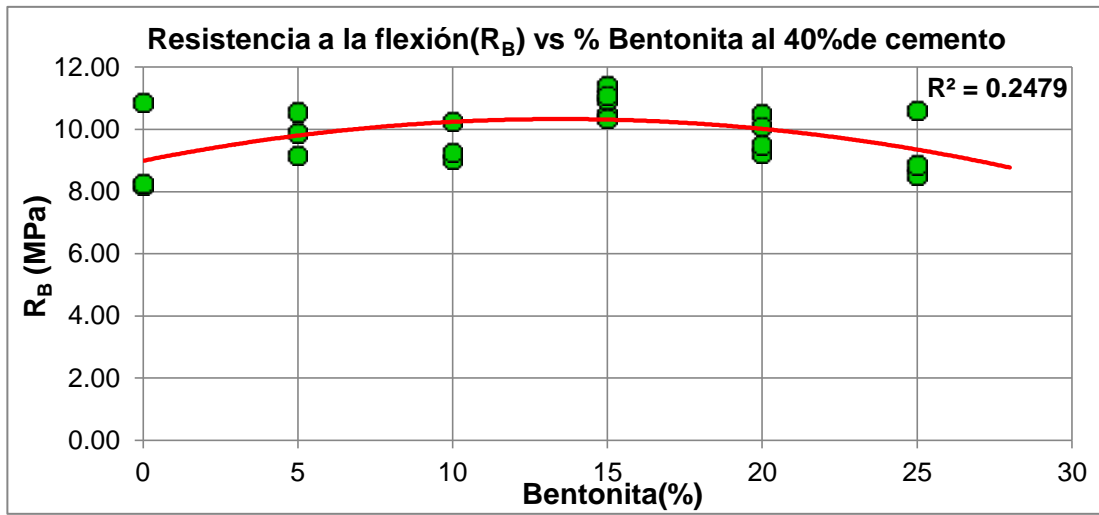


Figura 3. 4 Resistencia a la flexión (R_B) vs % Bentonita al 40%de Cemento

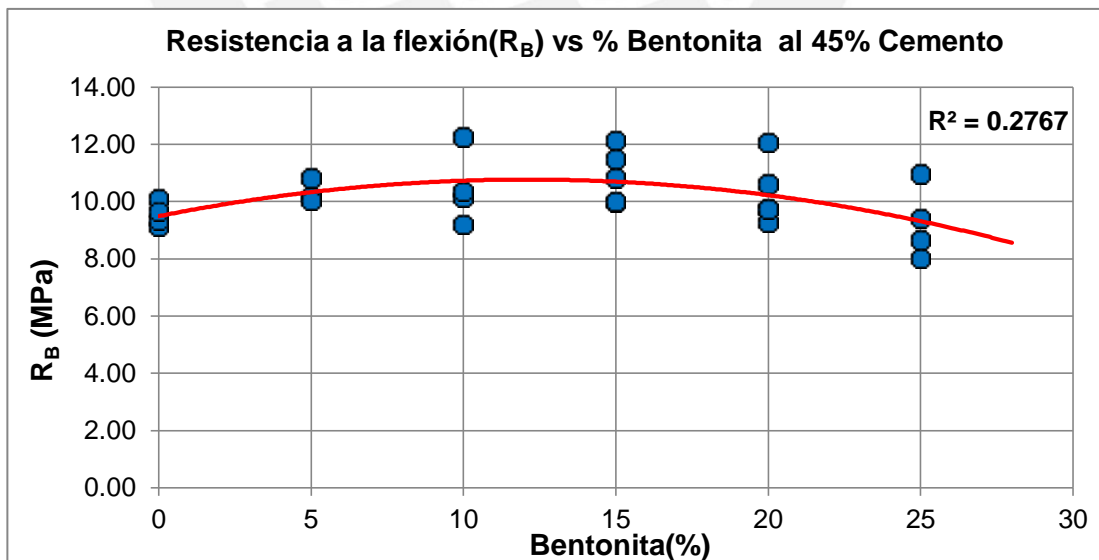


Figura 3. 5 Resistencia a la flexión (R_B) vs % Bentonita al 45%de Cemento

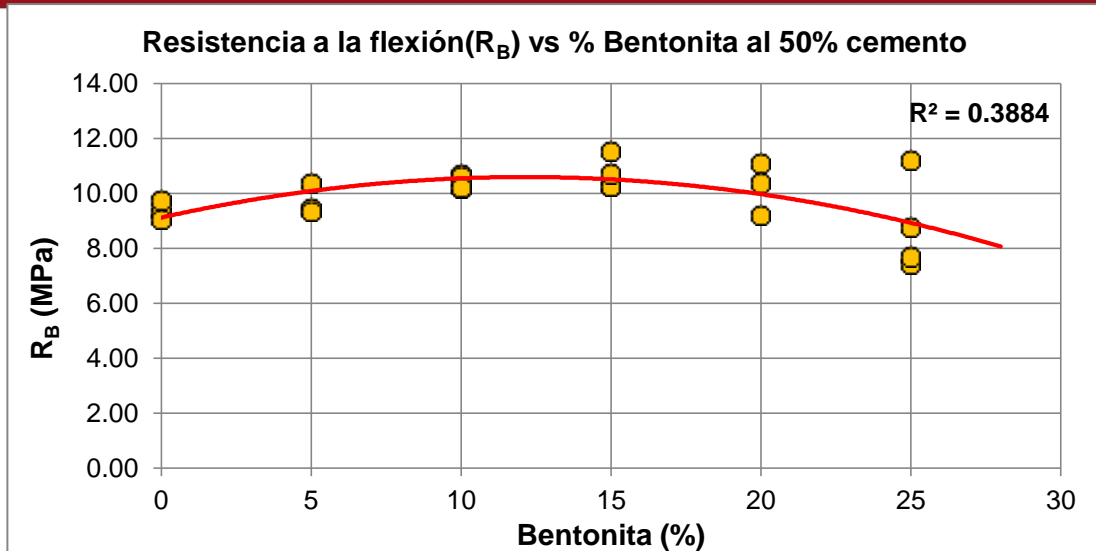


Figura 3. 6 Resistencia a la flexión (R_B) vs % Bentonita al 50%de Cemento

De las *figuras 3.7, 3.8 y 3.9* se observa que el momento de rotura (M_r) disminuye a medida que aumenta el porcentaje de la bentonita sódica.

La disminución del momento de rotura se debe a que el material al ser más sólido es más frágil y esto se debe también a la disminución de la cantidad de lodos de papel en el material compuesto lo que significa una pérdida de plasticidad.

La *figura 3.9* muestra que a 50% de cemento conforme aumenta el porcentaje de bentonita sódica la disminución del momento de rotura es mayor (disminuye 31%) que la que las que se presentan a 40% de cemento (disminuye 23%) y 45% de cemento (disminuye 28%) lo que indica que a mayor porcentaje de cemento y bentonita sódica la fragilidad del material aumenta.

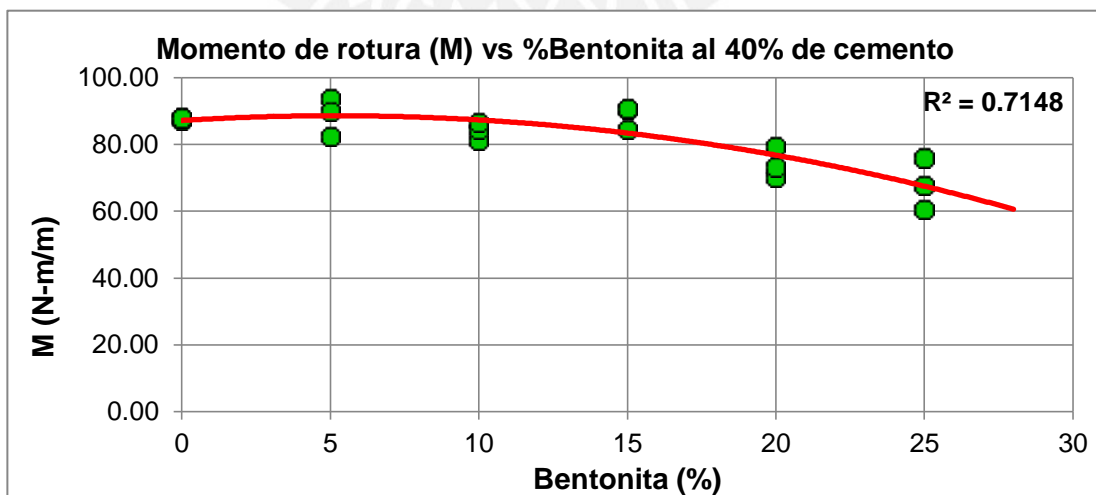


Figura 3. 7 Momento de rotura (M) vs % Bentonita al 40% de cemento

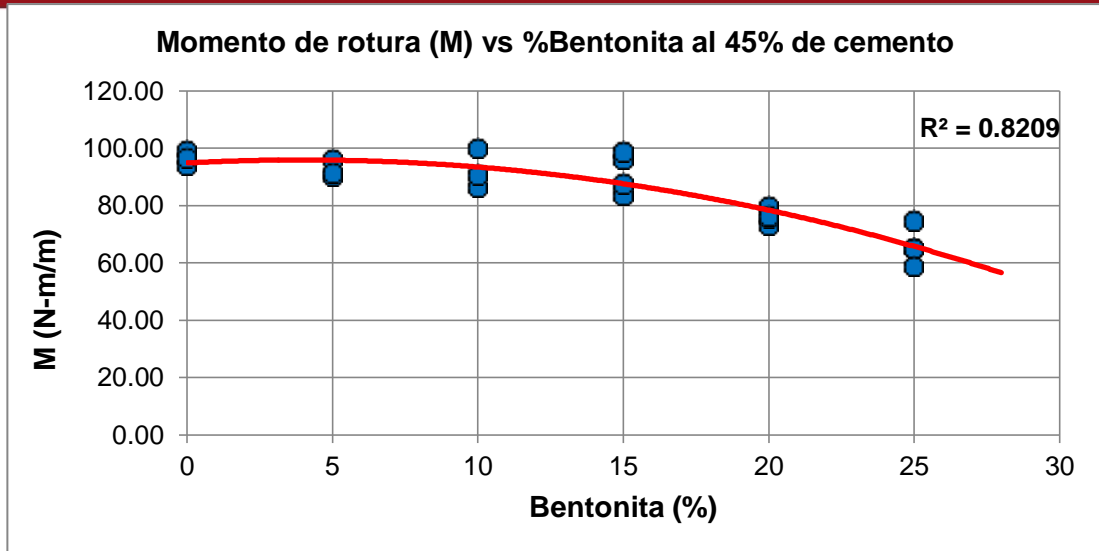


Figura 3. 8 Momento de rotura (M) vs % Bentonita al 45% de cemento

El valor promedio de la momento de rotura alcanzada por la composición de 45% de cemento y 15% de bentonita sódica es de 91,5 N-m/m que resulta ser un 266% mayor que el mínimo dado por la norma ASTM C1225-08 por lo que puede ser usado como material de construcción para techos.

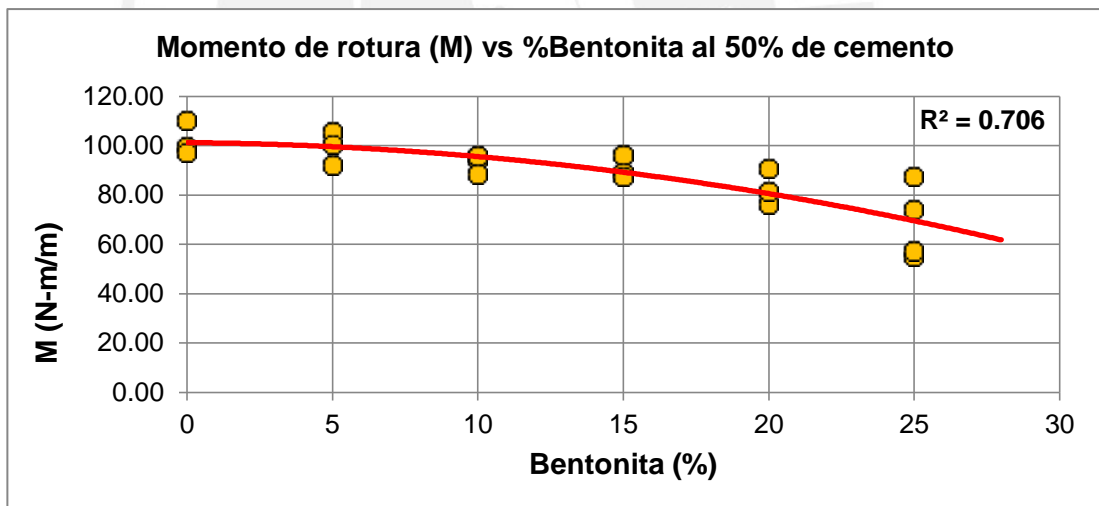


Figura 3. 9 Momento de rotura (M) vs % Bentonita al 50% de cemento

De la manipulabilidad (*figuras 3.10- 3.12*) se puede decir que entre 5% y 10% de bentonita sódica se alcanza los valores máximos de manipulabilidad: 43,08, 40,23 y 33,26 mm-N/mm (*tablas 3.4, 3.6 y 3.8*), para las composiciones de 40%, 45% y 50% de cemento respectivamente.

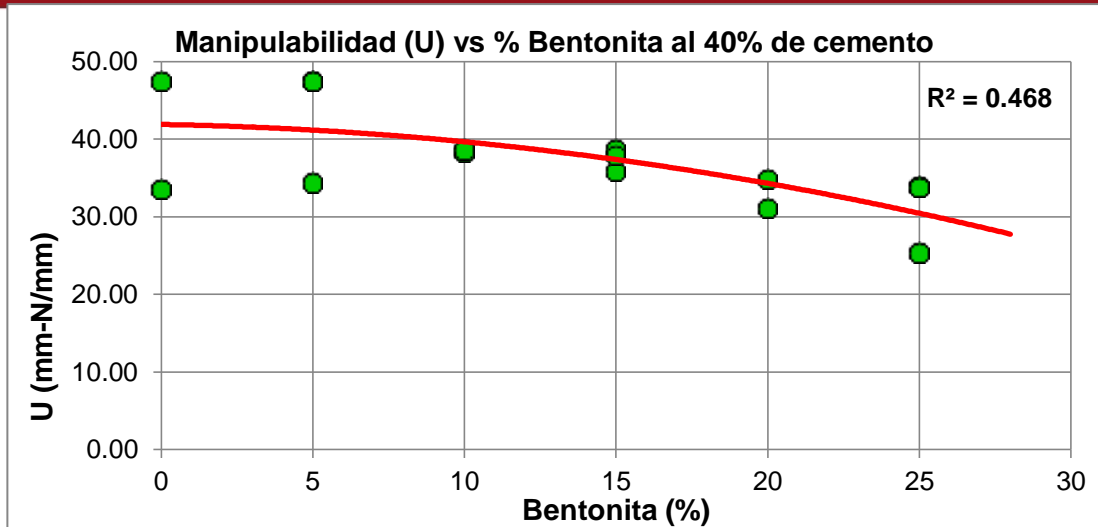


Figura 3. 10 Manipulabilidad (U) vs % Bentonita al 40% de cemento

La composición de 45% de cemento, 55% de lodos de papel y 15% de bentonita que alcanza el mayor valor promedio de resistencia a la flexión (10,9 MPa) presenta una manipulabilidad de 34,93 mm-N/mm que es un 1,83% mayor que el alcanzado por la composición de 45% de cemento y 55% de lodos de papel, lo que indica que a mayor proporción de bentonita en la composición el material será menos manipulable.

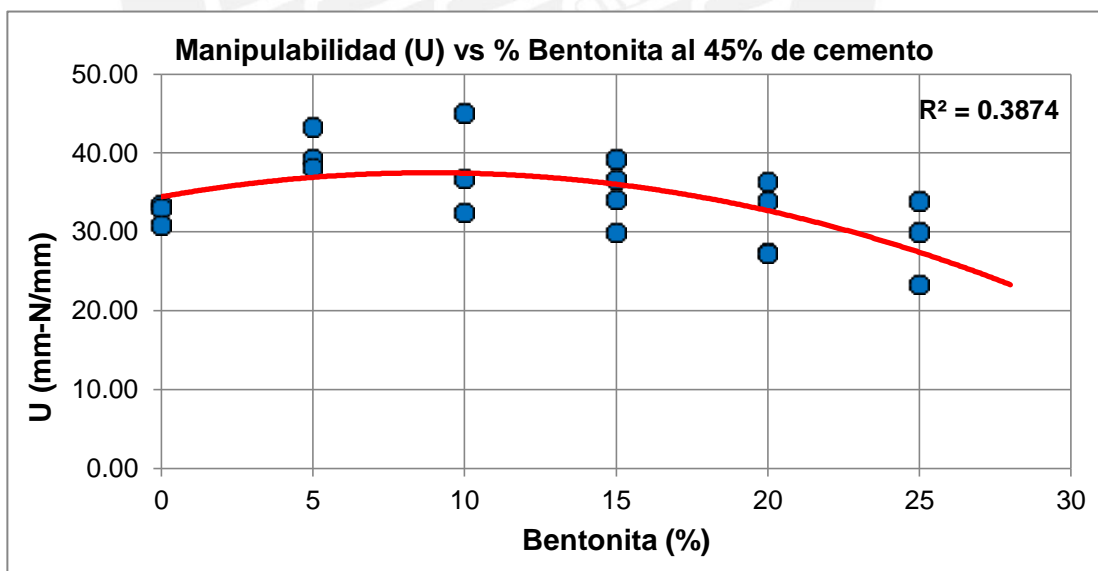


Figura 3. 11 Manipulabilidad (U) vs % Bentonita al 45% de cemento

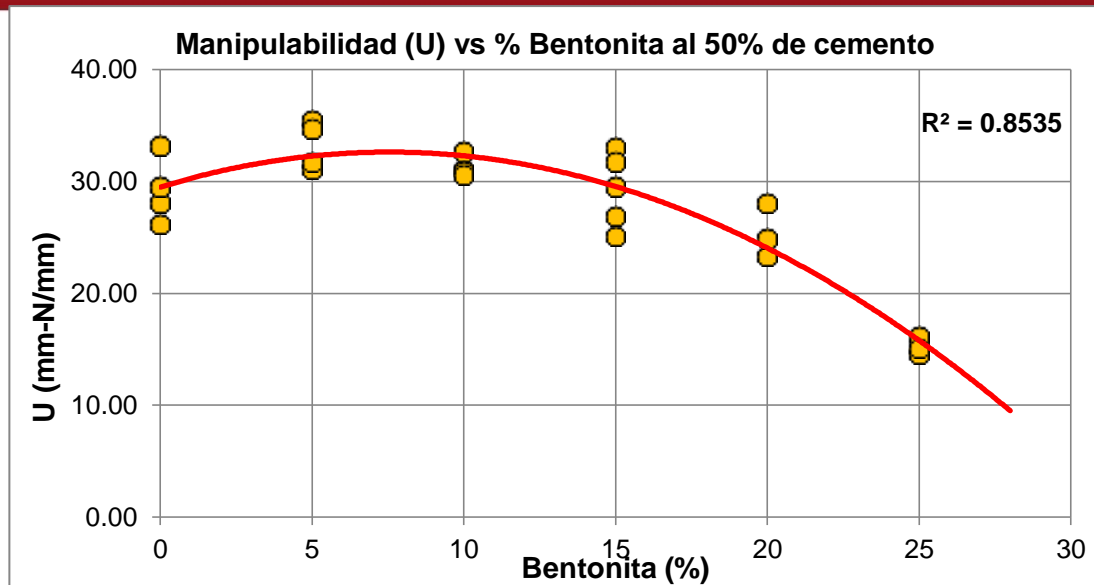


Figura 3. 12 Manipulabilidad (U) vs % Bentonita al 50% de cemento

3.13 Resumen

El efecto del contenido de los lodos de papel

La resistencia a la flexión aumento desde el inicio conforme se incrementó el contenido de los lodos de papel desde 8,8 MPa a 40% de lodos de papel hasta alcanzar el valor de 9,5 MPa a 55% de lodos de papel que es un valor 72% mayor al valor mínimo de 5,5 MPa establecido por la norma ASTM C1225-08.

El momento de rotura no presenta una tendencia clara, sin embargo los valores obtenidos son superiores como mínimo en 275% al valor mínimo de 25 Nm/m según la norma ASTM C1225-08.

La manipulabilidad tiende a aumentar conforme aumenta el porcentaje de lodos de papel en el compuesto y esto se debe a que las fibras celulósicas de los lodos de papel le dan más flexibilidad al material compuesto.

El efecto del contenido de la bentonita sódica.

La resistencia a la flexión aumenta hasta tener un 15% de bentonita sódica en la composición del material, resultando ser la composición a 40% de lodos de papel, 45% de cemento y 15% de bentonita sódica la que muestra el valor más alto alcanzado (10,9 MPa).

El momento de rotura presenta una tendencia disminuir conforme aumenta el porcentaje de bentonita, disminuyendo para las tres composiciones constantes de

cemento: 40%, 45% y 50% respectivamente, además la disminución es más grande al 50% de cemento (disminuye un 33%).

La mejor composición de 40% de lodos de papel, 45% de cemento y 15% de bentonita muestra un momento de rotura de 91,5 N-m/m que resulta ser un 266% mayor que el mínimo dado por la norma ASTM C1225-08. Así mismo su manipulabilidad de 34,93 mm-N/mm es un 1,83% mayor que el alcanzado por la composición de 45% de cemento y 55% de lodos de papel.

La bentonita sódica tiende a aumentar la fragilidad del material compuesto ya que el momento de rotura y la manipulabilidad disminuyen conforme esta aumenta.

3.2 ENSAYO DE COMPRESIÓN

El ensayo de compresión se analizara según la norma ASTM C 39-12, donde se evalúa principalmente el esfuerzo a la compresión y el tipo de rotura que la probeta presenta después del ensayo de compresión, los resultados del ensayo de compresión son mostrados en las *tablas 3.9, 3.10 y 3.11*.

Tabla 3.9 Resultados del ensayo de compresión según norma ASTM C39-12 para 40% de cemento

Serie	Probeta	L/D	F.C	F (N)	R _c (MPa)	R _{Cprom} (MPa)	T.F
1	40C-5B-1	1.25	0.93	53601	23.52	22.06	2
	40C-5B-2	1.33	0.94	47938	21.21		2
	40C-5B-3	1.29	0.93	48741	21.45		2
2	40C-10B-1	1.25	0.93	44850		24.26	2
	40C-10B-2	1.27	0.93	52977	23.26		2
	40C-10B-3	1.28	0.93	57782	25.26		2
3	40C-15B-1	1.24	0.93	57922	25.20	25.83	2
	40C-15B-2	1.25	0.93	47425			2
	40C-15B-3	1.21	0.92	61381	26.45		2
4	40C-20B-1	1.31	0.94	39116		18.56	2
	40C-20B-2	1.29	0.93	42096	18.53		2
	40C-20B-3	1.24	0.93	42313	18.59		2
5	40C-25B-1	1.25	0.93	49693	22.06	21.32	2
	40C-25B-2	1.23	0.93	55713			2
	40C-25B-3	1.27	0.93	46624	20.59		2

Tabla 3.10 Resultados del ensayo de compresión según norma ASTM C39-12 para 45% de cemento

Serie	Probeta	L/D	F.C	F (N)	R _c (MPa)	R _{Cprom} (MPa)	T.F
1	45C-5B-1	1.31	0.92	54185	23.39	23.33	2
	45C-5B-2	1.36	0.94	51175	22.99		2
	45C-5B-3	1.26	0.93	54137	23.60		2
2	45C-10B-1	1.24	0.93	60690	26.31	26.35	2
	45C-10B-2	1.25	0.93	60371	26.39		2
	45C-10B-3	1.26	0.93	61450			2
3	45C-15B-1	1.24	0.93	50589		26.45	2
	45C-15B-2	1.23	0.93	60357	26.14		2
	45C-15B-3	1.24	0.93	61484	26.75		2
4	45C-20B-1	1.18	0.91	63603	27.24	27.14	2
	45C-20B-2	1.18	0.91	62850	27.03		2
	45C-20B-3	1.19	0.92	58028			2
5	45C-25B-1	1.16	0.91	61741	26.43	24.52	2
	45C-25B-2	1.15	0.91	56780	24.18		2
	45C-25B-3	1.18	0.91	53343	22.94		2

Tabla 3.11 Resultados del ensayo de compresión según norma ASTM C39-12 para 50% de cemento

Serie	Probeta	L/D	F.C	F (N)	R _c (MPa)	R _{Cprom} (MPa)	T.F
1	50C-5B-1	1.31	0.94	61290	26.89	27.77	2
	50C-5B-2	1.30	0.94	64472	28.31		2
	50C-5B-3	1.31	0.94	63185	28.10		2
2	50C-10B-1	1.25	0.93	56193		28.47	2
	50C-10B-2	1.25	0.93	67942	29.53		2
	50C-10B-3	1.25	0.93	63069	27.41		2
3	50C-15B-1	1.19	0.92	63376	27.01	28.92	2
	50C-15B-2	1.21	0.92	70265	30.28		2
	50C-15B-3	1.20	0.92	68692	29.47		2
4	50C-20B-1	1.19	0.92	72470	31.06	30.85	2
	50C-20B-2	1.18	0.91	68691	29.37		2
	50C-20B-3	1.19	0.92	74640	32.12		2
5	50C-25B-1	1.17	0.91	57581	24.74	22.43	2
	50C-25B-2	1.23	0.93	38408	17.03		2
	50C-25B-3	1.22	0.92	58479	25.51		2

3.2.1 El efecto del contenido de los lodos de papel y la bentonita sódica

Para evaluar los resultados del ensayo de compresión (*tablas 3.9, 3.10 y 3.11*) se presenta la variación de la resistencia a la compresión (R_c).

La *figura 3.16* muestra la variación de la resistencia a la compresión observándose que la resistencia a la compresión aumenta para cada proporción de cemento constante (40%, 45% y 50%), sin embargo las composiciones de 45% y 50% de cemento presentan una variación más uniforme que la de 40% de cemento.

De la *figura 3.16* se puede observar que a mayor porcentaje de cemento la resistencia a la compresión aumenta y entre un 15% y 20 % de bentonita sódica se alcanzan las mayores resistencias a la compresión para las composiciones de 40%, 45% y 50% de cemento (25,83 MPa, 27,14 MPa y 30,85 MPa respectivamente).

La composición de 30% de lodos de papel, 50% de cemento y 20% de bentonita sódica presenta la mayor resistencia a la compresión promedio (30,9 MPa), pudiendo tener aplicaciones como adoquines tipo I, adoquines para pavimentos de uso peatonal, ya que la resistencia mínima requerida es de 28 MPa según la norma NTP.399.611:2003. También puede ser usado como ladrillos de concreto según norma NTP.399.601:2006 ya que la norma pide como mínimo 21MPa.

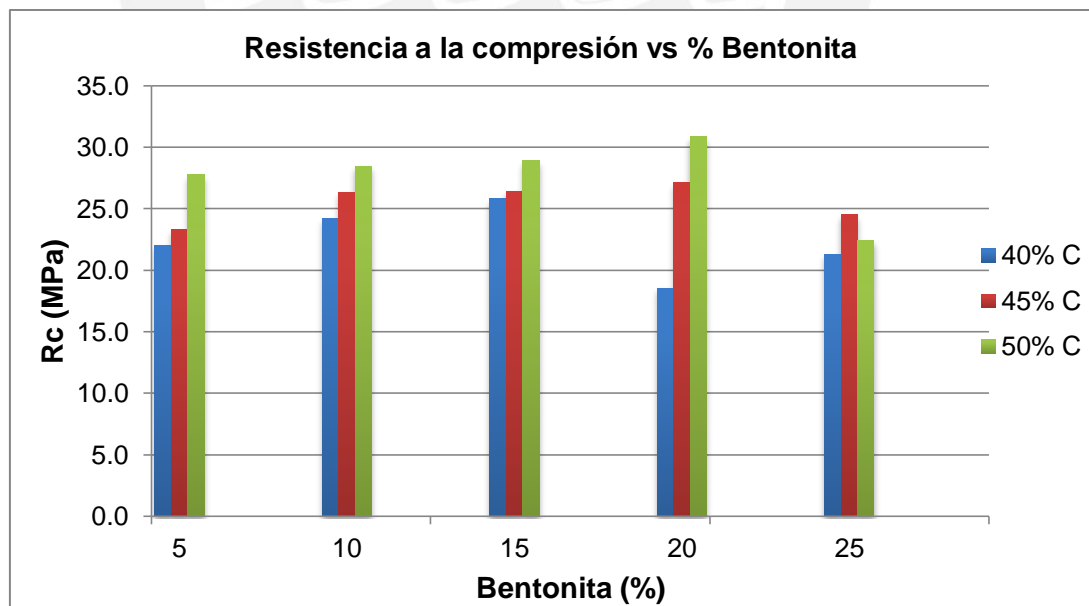


Figura 3.13 Variación de la resistencia a la compresión promedio con el porcentaje de bentonita sódica según norma ASTM C39-12

De acuerdo a la norma técnica E.070 de albañilería de ladrillos y bloques de España la resistencia a la compresión para ladrillos macizos o perforados no deberá ser inferior a 9.81 daN/cm^2 (9,81 MPa), por lo que la composición de mayor resistencia a la compresión promedio (30,9 MPa) supera en un 214% a tal valor., sin embargo quedaría realizar otras pruebas como son las de alabeo, absorción que pueden ser realizadas según la Normas NTP 399.613 y NTP 399.604.

3.2.2 Resumen

La composición 50% de cemento, 30% de lodos de papel y 20% de bentonita resulto ser la de mayor resistencia a la compresión promedio (30,9 MPa) y puede tener aplicaciones como ladrillos de arcilla, ladrillos de concreto y adoquines.

3.3 ENSAYO DE DENSIDAD

En el ensayo densidad se realizó a las probetas del ensayo de flexión según norma ASTM C1185-08, usando el rango óptimo de lodos de papel y cemento que contiene 40%, 45% y 50% de cemento y también las composiciones de 45% de cemento constantes con las variaciones de bentonita al 5%, 10%, 15%, 20% y 25% debido a que este nos brindó la mayor resistencia a la flexión promedio (10,9 MPa).

Tabla 3.12 Resultados del ensayo de densidad según norma ASTM C1185-08 para probetas de lodos de papel y cemento

Probeta	Peso T° amb (g)	Peso seco (g)	Peso sumergido (g)	Peso saturado (g)	Volumen (mm ³)	ρ (kg/m ³)	ρ prom. (kg/m ³)
1-F-60L	28.04	25.59	6.69	32.55	21351.30	1310.62	1307.36
2-F-60L	29.53	26.70	6.75	34.62	22783.10	1293.60	
3-F-60L	27.88	25.29	6.43	31.93	21442.40	1297.29	
4-F-60L	27.22	24.70	6.50	31.10	20726.10	1310.70	
5-F-60L	26.50	24.07	6.54	30.12	19966.80	1324.61	
1-F-55L	30.20	27.38	8.12	34.10	22077.10	1365.13	1360.06
2-F-55L	28.01	25.35	7.61	31.25	20408.00	1369.80	
3-F-55L	27.36	24.61	7.46	30.68	19903.20	1371.88	
4-F-55L	29.26	26.28	7.62	32.80	21634.60	1349.44	
5-F-55L	27.96	25.23	7.20	31.52	20755.70	1344.05	
1-F-50L	28.76	25.87	8.02	31.87	20732.40	1384.07	1382.75
2-F-50L	30.07	27.03	8.23	33.29	21841.50	1373.92	
3-F-50L	29.55	26.50	8.04	32.89	21509.70	1370.82	
4-F-50L	31.26	28.03	8.72	34.83	22540.00	1383.76	
5-F-50L	30.86	27.81	8.88	34.85	21975.80	1401.17	
1-F-45L	29.58	26.37	8.74	32.76	20837.60	1416.45	1389.96
2-F-45L	28.78	25.53	7.98	31.84	20797.60	1380.79	
3-F-45L	26.96	24.65	7.36	29.62	17293.10	1422.61	

En la *tabla 3.12* y *3.13* quedan expresados los resultados finales del ensayo de densidad según la norma ASTM C1185-08. La toma de datos se realizó a temperatura ambiente de 22°C y humedad relativa del 72%.

Tabla 3.13 Resultados del ensayo de densidad según norma ASTM C1185-08 para probetas con 45% de cemento constante

Probeta	Peso T° amb (g)	Peso seco (g)	Peso sumergido (g)	Peso saturado (g)	Volumen (mm ³)	ρ (kg/m ³)	ρ prom. (kg/m ³)
45C-0B-1	30.20	27.38	8.12	34.10	22077.10	1365.13	1360.06
45C-0B-2	28.01	25.35	7.61	31.25	20408.00	1369.80	
45C-0B-3	27.36	24.61	7.46	30.68	19903.20	1371.88	
45C-0B-4	29.26	26.28	7.62	32.80	21634.60	1349.44	
45C-0B-5	27.96	25.23	7.20	31.52	20755.70	1344.05	
45C-5B-1	27.53	25.29	7.92	32.34	19607.00	1401.13	1399.68
45C-5B-2	28.50	25.95	7.91	33.39	20590.30	1381.38	
45C-5B-3	27.19	24.79	7.72	31.77	19471.10	1393.50	
45C-5B-4	25.85	23.72	7.79	29.99	18061.40	1428.10	
45C-5B-5	27.01	24.74	8.06	31.27	18942.80	1422.71	
45C-10B-1	26.85			30.83	26845.20	997.90	1414.88
45C-10B-2	27.88	25.33	8.10	32.28	19772.50	1406.87	
45C-10B-3	27.43	24.77	7.96	31.57	19472.90	1405.80	
45C-10B-4	27.04	24.58	8.27	31.03	18762.60	1437.96	
45C-10B-5	26.47	24.01	8.03	30.08	18449.60	1431.96	
45C-15B-1	26.42	24.43	7.26	29.93	19161.40	1375.92	1435.18
45C-15B-2	27.33	24.64	8.25	31.15	19079.00	1429.55	
45C-15B-3	29.27	23.85	8.24	33.27	21029.40	1388.96	
45C-15B-4	26.74	24.08	7.98	30.53	18762.80	1422.34	
45C-15B-5	28.32	25.55	8.88	32.01	19440.20	1453.67	
45C-20B-1	26.77	23.94	8.57	29.81	18202.30	1467.57	1455.59
45C-20B-2	26.67	23.72	8.15	29.86	18528.80	1436.62	
45C-20B-3	27.70	24.88	8.94	31.06	18766.20	1473.08	
45C-20B-4	25.74	22.91	8.12	28.60	17613.00	1458.23	
45C-20B-5	27.97	24.91	8.85	31.07	19119.10	1459.92	
45C-25B-1	27.65	24.48	8.67	30.50	18982.40	1453.57	1442.56
45C-25B-2	26.00	22.99	7.79	29.05	18204.00	1424.99	
45C-25B-3	26.96	24.04	8.90	29.71	18064.60	1489.47	
45C-25B-4	29.55	26.30	8.88	32.56	20671.10	1426.63	
45C-25B-5	27.07	23.97	8.43	30.04	18638.60	1449.13	

3.31 El efecto del contenido de lodos de papel

Del análisis de la *figura 3.18* y *tabla 3.14* se puede deducir que el incremento de los lodos de papel en la composición lleva aparejado una disminución de la densidad.

El efecto es muy cercano al lineal, y a un aumento de lodos de papel corresponde una reducción directamente proporcional en el peso de la mezcla.

Como era de esperarse el valor de densidad promedio más alto es de 1389.96 kg/m^3 . El valor más bajo correspondió a las probetas con 60% de lodos de papel es decir un valor inferior al 129% del alcanzado por la matriz de cemento (1307 kg/m^3).

Tabla 3.14 Valores promedio de las densidades de las probetas de lodos de papel y cemento

Probeta	ρ prom. (kg/cm^3)
F-45L	1389.96
F-50L	1382.75
F-55L	1360.06
F-60L	1307.36

Los hormigones ligeros son aquellos cuya densidad aparente es inferior a 1850 kg/m^3 [ACI, 2001] dentro de esta calificación general se establecen tres subclases en función de la densidad del hormigón: estructural (densidad $>1440 \text{ kg/m}^3$), semi-estructural ($900 \text{ kg/m}^3 < \text{densidad} < 1440 \text{ kg/m}^3$) y no estructural (densidad $< 900 \text{ kg/m}^3$); de acuerdo a estos rangos nuestras proporciones se encuentran en el tipo semi-estructural.

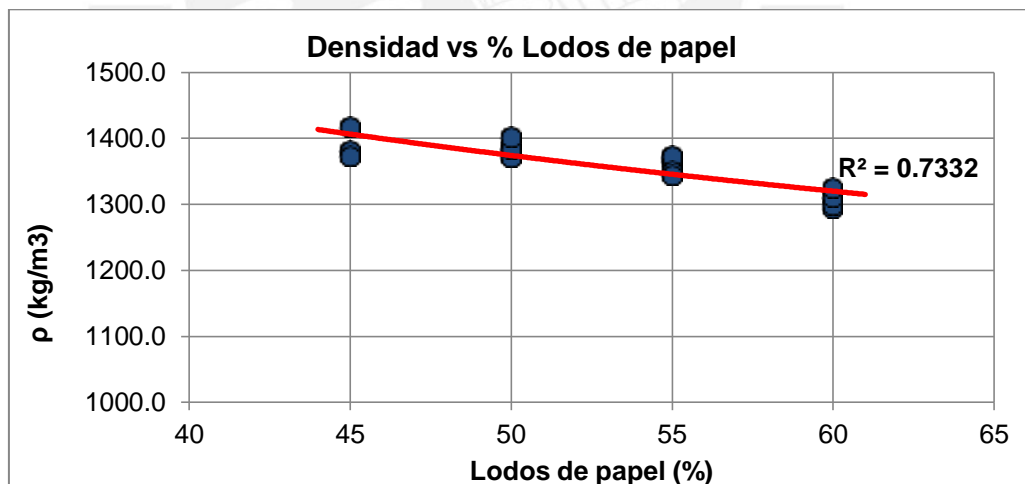


Figura 3.14 Variación de la densidad con el porcentaje de lodos de papel según norma C1185-08

3.3.2 El efecto del contenido de bentonita sódica

De acuerdo a la *figura 3.19* y *tabla 3.15* se deduce que la densidad aumenta al ir disminuyendo el porcentaje de lodos de papel y aumentar el porcentaje de la bentonita sódica, variando desde $1360,1 \text{ kg/m}^3$ hasta $1455,6 \text{ kg/m}^3$.

Tabla 3.15 Valores promedio de densidad de las probetas de lodos de papel, cemento y bentonita sódica

Probeta	ρ promedio (kg/m ³)
45C-5B	1399.68
45C-10B	1414.88
45C-15B	1435.18
45C-20B	1455.59
45C-25B	1442.56

De acuerdo a la *tabla 3.9* para nuestra composición óptima (45C-15B) que alcanzo el valor máximo de resistencia a la flexión de 10,9 MPa le corresponde una densidad promedio de 1420,37 kg/m³ por lo que según el tipo de hormigón se encontraría en el tipo estructural además que es un 119% menos denso que la matriz.

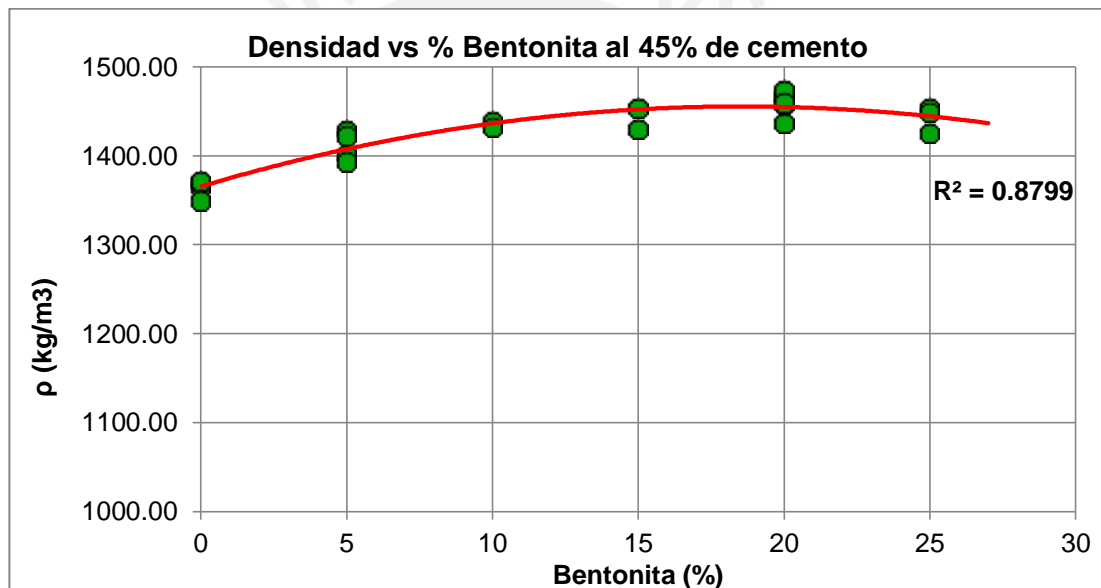


Figura 3.15 Densidad vs % Bentonita sódica al 45% de cemento según norma ASTM C1185-08

3.3.3 Resumen

El efecto del contenido de los lodos de papel

Se deduce que a mayor porcentaje de lodos de papel presente en la composición disminuirá la densidad del mismo, esta disminución de la densidad se realiza casi linealmente, por lo que se puede decir que la densidad varía de forma inversamente proporcional al porcentaje de lodos de papel.

El efecto del contenido de la bentonita sódica

La composición óptima del ensayo de flexión (45C-15B) obtuvo una densidad de 1447,7 kg/m³ por lo que se puede considerar un hormigón estructural según la clasificación de la ACI (American Concrete Institute). Además cumple con la densidad requerida por la norma NTP E.070 de Albañilería, ya que la menor densidad requerida es de 1500 kg/m³.

La adición de la bentonita sódica aumenta la densidad del material, lo que nos da un material más sólido y resistente, sin embargo como se vio en los resultados del ensayo de flexión y compresión solo hasta un 15% y 20% de bentonita sódica respectivamente se logró aumentar la resistencia del material.

3.4 ENSAYO DE ABSORCIÓN DE AGUA

De manera análoga el ensayo de densidad, se mantuvieron la misma composición y rango de evaluación.

Tabla 3.16 Resultados del ensayo de absorción de agua según norma ASTM C 1185-08 para diferentes probetas lodos de papel y cemento

Probeta	Peso T° amb (g)	Peso seco (g)	Peso sumergido (g)	Peso saturado (g)	Abs. agua ambiente %	Abs. amb. prom. %	Abs. Agua seco %	Abs. seco prom. %
1-F-60L	28.04	25.59	6.69	32.55	16.06	15.14	27.18	26.83
2-F-60L	29.53	26.70	6.75	34.62	17.21		29.64	
3-F-60L	27.88	25.29	6.43	31.93	14.54		26.25	
4-F-60L	27.22	24.70	6.50	31.10	14.23		25.90	
5-F-60L	26.50	24.07	6.54	30.12	13.65		25.15	
1-F-55L	30.20	27.38	8.12	34.10	12.91	12.29	24.53	24.44
2-F-55L	28.01	25.35	7.61	31.25	11.55		23.26	
3-F-55L	27.36	24.61	7.46	30.68	12.11		24.63	
4-F-55L	29.26	26.28	7.62	32.80	12.12		24.82	
5-F-55L	27.96	25.23	7.20	31.52	12.76		24.93	
1-F-50L	28.76	25.87	8.02	31.87	10.82	11.44	23.16	24.01
2-F-50L	30.07	27.03	8.23	33.29	10.70		23.18	
3-F-50L	29.55	26.50	8.04	32.89	11.31		24.11	
4-F-50L	31.26	28.03	8.72	34.83	11.43		24.27	
5-F-50L	30.86	27.81	8.88	34.85	12.94		25.31	
1-F-45L	29.58	26.37	8.74	32.76	10.76	10.42	24.24	23.04
2-F-45L	28.78	25.53	7.98	31.84	10.63		24.71	
3-F-45L	26.96	24.65	7.36	29.62	9.87		20.16	

En la *tabla 3.16* y *3.17* se muestran los resultados finales del ensayo de absorción de agua (Abs. agua %) según norma ASTM C1185-08, a diferentes concentraciones de lodos de papel. La toma de datos se realizó a 22°C y humedad relativa de 72%, en los ambientes del Laboratorio nº4 de Materiales de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

Tabla 3.17 Resultados del ensayo de absorción de agua según norma ASTM C 1185-08 para 45% de cemento

Probeta	Peso T° amb (g)	Peso seco (g)	Peso sumergido (g)	Peso saturado (g)	Abs. agua ambiente %	Abs. amb. prom. %	Abs. Agua seco %	Abs. seco prom.%
45C-0B-1	30.20	27.38	8.12	34.10	12.91	12.29	24.53	24.44
45C-0B-2	28.01	25.35	7.61	31.25	11.55		23.26	
45C-0B-3	27.36	24.61	7.46	30.68	12.11		24.63	
45C-0B-4	29.26	26.28	7.62	32.80	12.12		24.82	
45C-0B-5	27.96	25.23	7.20	31.52	12.76		24.93	
45C-5B-1	27.53	25.29	7.92	32.34	17.46	16.64	27.87	27.51
45C-5B-2	28.50	25.95	7.91	33.39	17.14		28.67	
45C-5B-3	27.19	24.79	7.72	31.77	16.83		28.14	
45C-5B-4	25.85	23.72	7.79	29.99	16.01		26.44	
45C-5B-5	27.01	24.74	8.06	31.27	15.77		26.40	
45C-10B-1	26.85			30.83		14.81		26.59
45C-10B-2	27.88	25.33	8.10	32.28	15.81		27.44	
45C-10B-3	27.43	24.77	7.96	31.57	15.07		27.46	
45C-10B-4	27.04	24.58	8.27	31.03	14.77		26.22	
45C-10B-5	26.47	24.01	8.03	30.08	13.60		25.25	
45C-15B-1	26.42	24.43	7.26	29.93	13.29	13.62	22.52	28.10
45C-15B-2	27.33	24.64	8.25	31.15	13.99		26.45	
45C-15B-3	29.27	23.85	8.24	33.27	13.65		39.48	
45C-15B-4	26.74	24.08	7.98	30.53	14.14		26.78	
45C-15B-5	28.32	25.55	8.88	32.01	13.03		25.26	
45C-20B-1	26.77	23.94	8.57	29.81		11.57	24.52	24.97
45C-20B-2	26.67	23.72	8.15	29.86	11.94		25.89	
45C-20B-3	27.70	24.88	8.94	31.06	12.13		24.82	
45C-20B-4	25.74	22.91	8.12	28.60	11.13		24.87	
45C-20B-5	27.97	24.91	8.85	31.07	11.08		24.73	
45C-25B-1	27.65	24.48	8.67	30.50	10.29	10.68	24.56	24.72
45C-25B-2	26.00	22.99	7.79	29.05	11.74		26.35	
45C-25B-3	26.96	24.04	8.90	29.71	10.17		23.57	
45C-25B-4	29.55	26.30	8.88	32.56	10.19		23.82	
45C-25B-5	27.07	23.97	8.43	30.04	10.98		25.30	

3.4.1 El efecto del contenido de lodos de papel

Los resultados (*figura 3.20*) muestran la tendencia del material a incrementar su capacidad de absorción de agua a medida que se incrementa el contenido de lodos de papel, siendo el valor más alto 15.14%. Esto puede explicarse debido a la naturaleza hidrofílica de las fibras naturales cuyas moléculas poseen afinidad por el agua y contribuyen a elevar el porcentaje final de la absorción en el material.

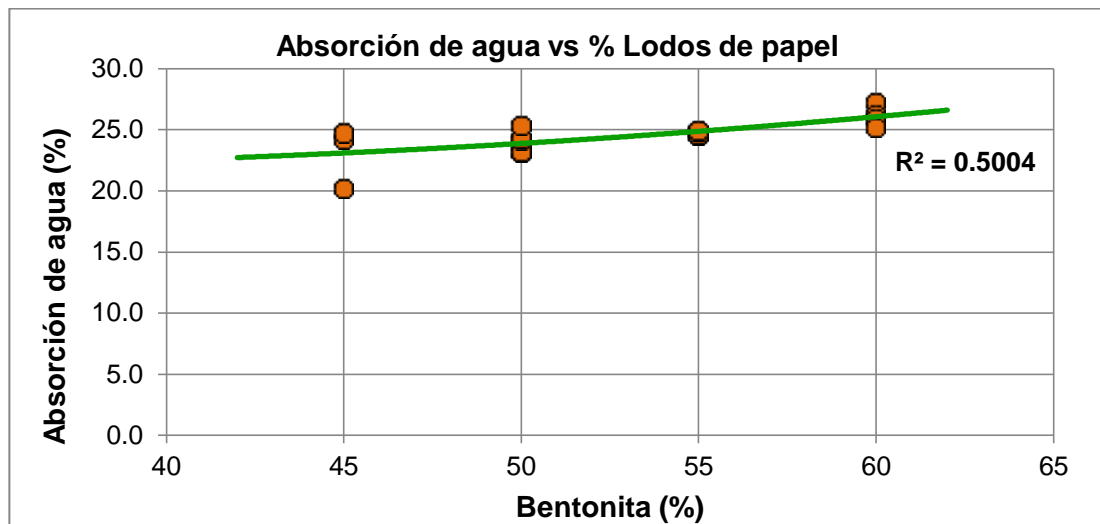


Figura 3.16 Absorción de agua vs % Lodos de papel

3.4.2 El efecto de la adición de bentonita

Los requerimientos para el material según ASTM C1185 establece valores de absorción de agua entre 30% y 90%, el material de estudio muestra buena resistencia a la absorción pues la composición óptima (45C-15B) alcanza un valor máximo 13.62% de absorción de agua.

Hay un aumento de la absorción de agua cuando hay un 5% de bentonita sódica presente en el material compuesto debido a que la cantidad de bentonita sódica presente en la superficie del material no es suficiente para tapar las porosidades en la superficie cuando se hincha tras absorber agua, permitiendo que el agua pueda ser absorbida en mayor cantidad ya que la bentonita sódica también absorbe agua.

En la *figura 3.21* se muestra dos curvas, la curva superior (círculos) es la absorción de humedad en la condición de seco, es decir que el material no posee humedad en su interior, mientras que la curva inferior (rombos) tiene las condiciones ambientales, es decir a 21° C y 72% de humedad relativa, y ya cuenta con cierta humedad en su interior.

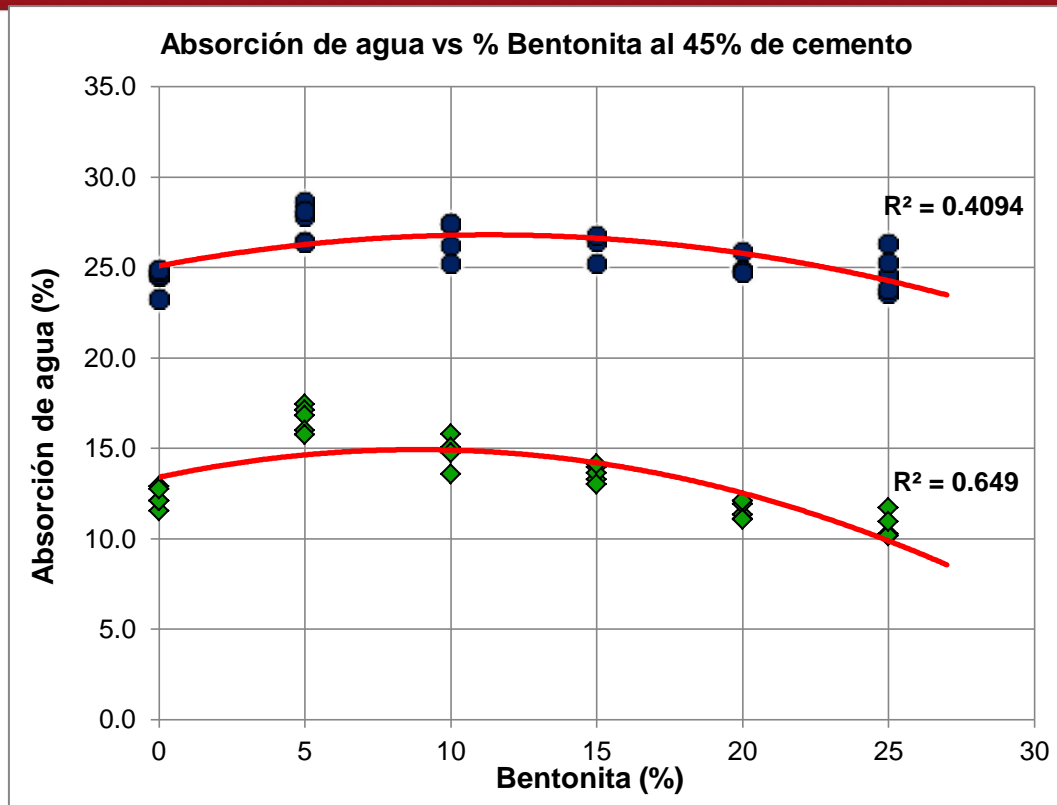


Figura 3.17 Absorción de agua vs % Bentonita para 45% de cemento según norma C1185-08

3.4.3 Resumen

El efecto de la adición de lodos de papel

Se puede apreciar que debido a la naturaleza hidrófila de las fibras celulósicas presentes en los lodos de papel la absorción de agua aumenta conforme se agrega más lodos de papel en el material compuesto.

El efecto de la adición de la bentonita sódica

Se aprecia que la absorción de agua disminuye conforme aumenta el porcentaje de bentonita sódica y disminuye el porcentaje de lodos de papel, lo que indica que la absorción de agua en el compuesto está más influenciada por los lodos de papel que por la bentonita sódica a pesar que la bentonita sódica también absorbe agua.

La absorción de agua disminuye a partir del 15% bentonita sódica, debido a que la bentonita sódica presente en la superficie del material al entrar en contacto con el agua es la que se hincha en primer lugar tapando los poros presentes en el material compuesto evitando que el agua pueda seguir fluyendo hacia el interior del material, esto demuestra también la propiedad de impermeabilidad que presenta la bentonita sódica.

CONCLUSIONES

Se ha estudiado las propiedades de mezclas elaboradas a partir de lodos celulósicos de la industria papelera, cemento y arcilla del tipo bentonita; y se ha logrado fabricar materiales compuestos útiles para la construcción. Asimismo, el estudio realizado nos ha permitido elaborar una metodología experimental para la fabricación de muestras de dichos materiales compuestos que podrían servir de referencia para otras investigaciones.

La mejor combinación de propiedades mecánicas corresponde al material compuesto de 45% de cemento, 55% lodos de papel y 15% de bentonita sódica, ya que presenta el valor más alto de resistencia a la flexión (10,9 MPa); buen momento de rotura (100,2 mmN/mm), buena manipulabilidad (34,3 mmN/mm), una densidad de 1447,7 kg/m³ correspondiente al tipo de concreto estructural y una absorción de agua de 13.62% en equilibrio con el medio ambiente; estos valores logran superar los valores mínimos establecidos por la norma ASTM C1225-08 ; resultando en un material compuesto de buena resistencia y rigidez específicas suficientes para algunas aplicaciones como revestimiento para techos (tejas, lozas, paneles y cubiertas para techos).

Del ensayo de compresión se obtuvo que el material compuesto de 50% cemento, 30% de lodos de papel y 20% de bentonita, muestra el mayor valor promedio de resistencia a la compresión (30,85 MPa), por lo que podría ser un material usado en la elaboración de ladrillos de arcilla, concreto y adoquines para pavimento de uso peatonal según las normas NTP.

Los resultados han demostrado el efecto favorable de los lodos de papel a pesar de contener fibras celulósicas rehusadas, aumentando la resistencia a la flexión, a la compresión y la manipulabilidad hasta una composición de 55% de lodos de papel, demostrando que es posible darles una aplicación como materiales de construcción de buenas propiedades físicas.

Se ha demostrado que la bentonita sódica puede ser usada como aditivo en el material compuesto ya que permitió: aumentar la resistencia a la flexión del material compuesto desde 9,55 MPa hasta 10,85 MPa, obtener una resistencia a la compresión de 30,9 MPa y disminuir la absorción de agua del material a partir del 15% de bentonita sódica.

El uso de la bentonita sódica en forma natural resulta ser más provechoso que otras arcillas, ya que los ladrillos de arcilla de uso común requieren un proceso de cocción entre 900 °C y 1000 °C, mientras que si se llegara a elaborar materiales de construcción con el material compuesto obtenido mediante un curado en condiciones ambientales, estos serían más baratos.

RECOMENDACIONES

Mejorar el procedimiento de fabricación de las probetas de manera que permita mayor homogeneidad de la mezcla de los materiales; se debe contemplar el uso de una mezcladora mecánica y la fabricación de moldes más ergonómicos.

Asimismo es necesario evaluar el grado de adhesión por microscopía electrónica de barrido (SEM) de las fibras de lodos de papel, el cemento y la bentonita sódica, para muestras a diferentes proporciones de bentonita sódica.

Realizar un estudio del coeficiente de conductividad térmica del material y absorción térmica ya que otros estudios señalan que los lodos de papel poseen propiedades de aislantes térmicos y aislantes acústicos, para este estudio se pueden usar las normas IRAM 1155.9 y ASTM C177-13.

Los lodos de papel al tener materia orgánica entre sus componentes y estar expuesto a diversas condiciones climatológicas se debe realizar estudios de biodegradación, el desarrollo del ensayo debe garantizar el mismo grado de contaminación en todas las muestras, además de realizar estudios del comportamiento del material ante la acción de rayos ultravioleta. Para estos estudios se sugiere usar la norma ASM sección 11 (Cap. 45), Manual of Clinical Microbiology.

Probar nuevas mezclas adicionando arena o agregados para aumentar la resistencia del material compuesto, ya que las mezclas de cemento y arena tienen buenas propiedades mecánicas.

BIBLIOGRAFÍA

ACI Perú. American Concrete Institute, 2001. Normas peruanas de estructuras. Lima. Perú.

Acosta Sulcahuaman, Julio Arnaldo, 2010. Ingeniería de Materiales 2 Polímeros y Compuestos. Material de enseñanza. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima. Perú.

Arteaga Arcos, Juan Carlos, 2009. “Comportamiento Mecánico y caracterización de morteros elaborados con cemento portland ultrafino” Tesis de doctorado México D.F.: Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación.

ASPAPEL, 2007. Guía de gestión de residuos (Fábricas de pasta, papel y cartón).

ASTM C39, 2012. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens

ASTM C150, 2012. Standard Specification for Portland Cement.

ASTM C470, 2009. Standard Specification for Molds for Forming Concrete Test Cylinders Vertically.

ASTM C1185. 2008. Standard Test Methods for Sampling and Testing Non-Asbestos Fiber-Cement Flat Sheet, Roofing and Siding Shingles, and Clapboards.

ASTM C1225, 2008. Standard Specification for Fiber-Cement Roofing Shingles, Shakes, and Slates.

Clem Arthur G. y Doehler Robert W, 1961. Industrial Applications of Bentonite, Illinois.

Garcia R., R.Vigil de la Villa, I. Vegas, M. Frías y M.I. Sánchez de Rojas, 2007. Propiedades puzolanicas de los residuos papeleros.

Gibson R.F, 1994. Principles of material mechanics. New York: Mc. Graw Hill, Inc.

Gonzales López, José Manuel, 2000. Las Arcillas como minerales industriales.

Gonzales Velázquez, Jorge Luis, 1999. Metalurgia Mecánica México DF: Editorial Limusa, S.A.

Groover Mikell P, 1997. Fundamentos de Manufactura Moderna Naucalpan de Juárez: Prentice-Hall Hispanoamericana

Hamzeh, Yahya, Alireza Ashori y Babak Mirzaei, 2011. “Efectos de los lodos de residuos de papel en el físico-mecánicas Propiedades de los materiales compuestos de polietileno de alta densidad de harina Madera”.

Harris, Bryan; 1999. Engineering composites materials. The Institute of Materials. London. England.

Keith, K.S. and Murray, 1994. Clay liners and barriers. Chapter in Industrial Minerals and Rocks, 6th Edition. Carr, D.D., ed. Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Littleton.

Kimberly Clark Corporation, 2013. “Proceso de Fabricación del Papel”.

Mielenz Richard C. y King Myrle, 1952. E. Physical-Chemical Properties and Engineering Performance of Clays, Clay and Clay minerals Colorado. pp196-254.

Murray, Haydn H.; 2007. Applied Clay Mineralogy Indiana Elsevier U.S.A.

Ojeda Ch. María J. y Atilio Mendoza A., 1986. “Geoquímica y estructura de arcillas”.

Perate, Luis del Cañizo, Eraso, Romero Adolfo y Aguado Soler Julian, 1976. La Bentonita-Cemento y sus Aplicaciones. Madrid Obras Públicas.

Praseyto, Joni, Jing Zhu y Tatsuya kato, y Park Enoch Y, 2011. “Efficient Production of Cellulase in the Culture of Acremonium cellulolyticus Using Untreated Waste Paper Sludge”.

Quinchía, Adriana María y Valencia, Marco; 2007. Uso de Lodos Provenientes de la Industria Papelera en la Elaboración de Paneles Prefabricados para la Construcción, Revista EIA, pp.11.

Ramachandram V. S., Kacher K. P. and Garg S. P. Industrial Applications Of Clay Mineralogy.

Rivva López, Enrique, 2000. “Naturaleza y materiales del concreto. Capitulo Peruano del American Concrete Institute”. Lima. Perú.

Rodríguez O., M. Frías, M. I. Sánchez de Rojas, R. García, R. O. Rodriguez y M. Frias, 2012. Effect of thermally activated paper sludge on the mechanical properties and porosity of cement pastes, *Materiales de Construcción* Vol. 59, 294, pp41-52.

Romero, Emilia García y Suárez Barrios, Mercedes, 2005. “Las Arcillas: Propiedades y usos”. Universidad de Salamanca Madrid.

SCA, 2010. Fabricación de Papel SCA Publication Papers. 2010.

Teschke, Kay y Paul Demers. “Industria del papel y de la pasta de papel” <<http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/EnciclopediaOIT/tomo3/72.pdf>>

Vegas, I, J. Urreta, M. Frias y R. Garcia, 2009. “Freeze–thaw resistance of blended cements containing calcined paper sludge”. *ELSEVIER*. pp.7.

Whitlow R., 1994. “Fundamentos de Mecanica de Suelos”. Mexico D.F CECSA.

ANEXOS

A. Ensayo de Flexión

1. Fabricación de probetas.
2. Dimensiones de las probetas y resultados.

B. Ensayo de Compresión

1. Fabricación de probetas.
2. Dimensiones de las probetas y resultados.

C. Ensayo de Densidad y Absorción de agua

1. Resultados.