



UACJ

PROYECTO 342-19-01

UNIVERSIDAD
AUTÓNOMA DE
CIUDAD JUÁREZ

Título del proyecto:

Estudio y Pruebas Piloto para la Transformación del Residuo Polimérico de la empresa SOFI en un material de Utilidad Práctica.

Reporte Técnico final

Responsable Técnico

Dr. Javier S. Castro Carmona

Participantes

Dr. Luis Fernando Jimenez Tinoco

Dr. Elifalet López González

Enero de 2020

Proyecto de investigación y desarrollo (I+D)

Título: Estudio y pruebas piloto para la transformación del residuo polimérico de la empresa SOFI en un material de utilidad práctica.

Autor: Dr. Javier Servando Castro Carmona

Participantes: Dr. Luis Fernando Jiménez Tinoco, Dr. Elifalet López, Ing. Fernando Vega,

Estudiantes: Brissa Terrazas, Alexis Chávez, Oliver Fernández, Juan Fernando González

Fecha: Noviembre de 2019

Objetivo: Transformar el residuo polimérico de la empresa SOFI en un material conformado en elementos estructurales con aplicaciones prácticas.

Introducción.

La empresa SOFI genera una rebaba polimérica color blanca como resultado de sus procesos de fresado de los bloques de polímero para fabricar las micas para los lentes. Debido al tipo de polímeros usados no es fácil incorporarlos a los procesos de reciclado convencionales para la industria del plástico local. Este trabajo de tecnológico ha sido financiado por la empresa SOFI de México con el fin de buscar una utilidad práctica a los desechos de rebaba polimérica.

El presente proyecto consta de cinco partes: 1. Procesamiento de la rebaba plástica, 2. Caracterización y pruebas. 3. Análisis de consumo de energía. 4. Propuesta de un producto de utilidad para construcción. 5. Conclusiones.

En el capítulo 1 se presenta un proceso para el reciclaje de esta rebaba polimérica para obtener un material de utilidad práctica conformado en tabloncitos y paneles plásticos que pueden usarse como madera plástica. En el 2 se realizó una caracterización física del material y pruebas de utilidad práctica, incluyendo pruebas de resistencia mecánica, al agua, al fuego, procesos de atornillado, clavado, corte, maquinado, etc. En el capítulo 3 se realizó un análisis del consumo de energía para procesar la rebaba obteniendo un estimado del índice energético del producto. En el capítulo 4 se presenta una propuesta de uso práctico donde se

propone la fabricación de un sistema de construcción mediante elementos estructurales como barrotes y paneles análogos a los de madera usados en el sistema de construcción tipo americano para una vivienda del tipo de interés social. Finalmente en el capítulo 5 se presentan las conclusiones mas relevantes del proyecto.

A lo largo del documento el material en cuestión será la rebaba polimérica ya procesada y convertida en un material sólido y resistente a cual nos vamos a referir como **rebaba procesada** o abreviado **(RP)** para facilitar la presentación de resultados. No se presentan análisis de la rebaba antes de su procesamiento.

Capítulo 1 . Procesamiento de la rebaba polimérica.

Para la transformación de la rebaba polimérica (figura 1.1) en un producto mecánicamente resistente y funcional se ha desarrollado un método simple, que consta de un precalentamiento de la rebaba, un compactado en un molde, calentado en un horno de tratamientos térmico, prensado del material dentro del molde, desmoldado y retirado del material sobrante en las orillas. Se buscó obtener los parámetros más adecuados del proceso, que consisten en definir las temperaturas de calentamiento y la presión del prensado. El diagrama del proceso de la transformación de la rebaba en piezas de madera plástica se muestra en la figura 1.2



Figura 1.1 Rebaba polimérica antes de ser procesada.

Diagrama de flujo de la elaboración de piezas de madera plástica.

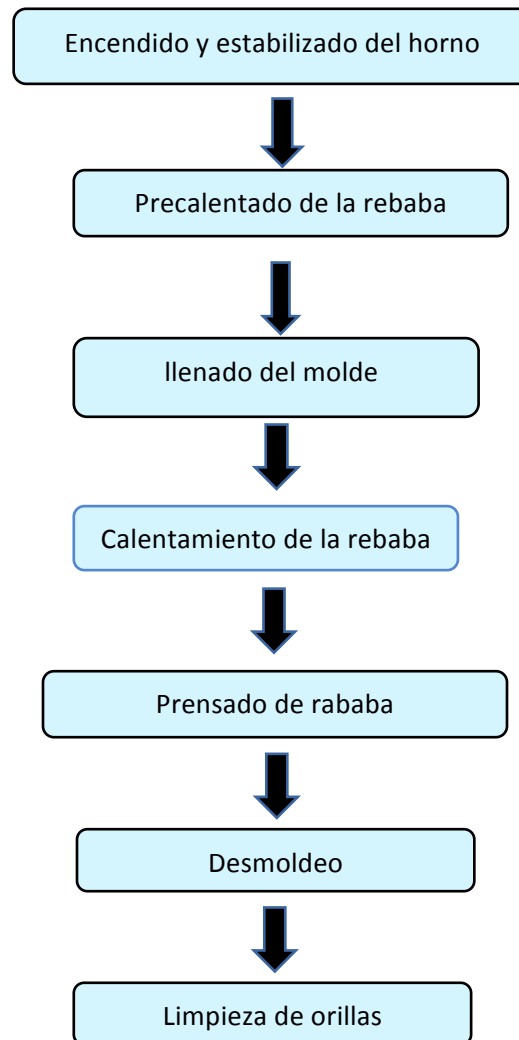


Figura 1.2 Diagrama de proceso de la rebaba

Se realizaron experimentos para transformar el residuo polimérico en un material sólido y resistente. Esto se logró aplicando temperatura y presión. Se usó un molde del tipo cámara-émbolo para formar una pieza rectangular de espesor variable dependiendo de la cantidad de material puesto en la cavidad del molde.

1.1 Diseño de moldes.

Molde prototipo. Dicho molde cuenta con tres partes principales las cuales son las siguientes:

(1). -Tapa prensa: Este elemento está fabricada de placa de acero y perfil tubular del mismo material, esta es utilizada para comprimir los residuos de rebabapolimérica para obtener las muestras deseadas.

(2). -Aro: Este componente está fabricado de placa de acero el cual nos servirá para contener la rebabapolimérica a comprimir y dar la forma deseada a la muestra.

(3). -Tapa inferior: este elemento permite tapan el aro para evitar derramamientos de rebabapolimérica además esta misma se retira para poder extraer la muestra del aro. cuenta con elementos de sujeción lo que permite sostener el molde al momento de ser introducido y sacado del horno de pruebas.

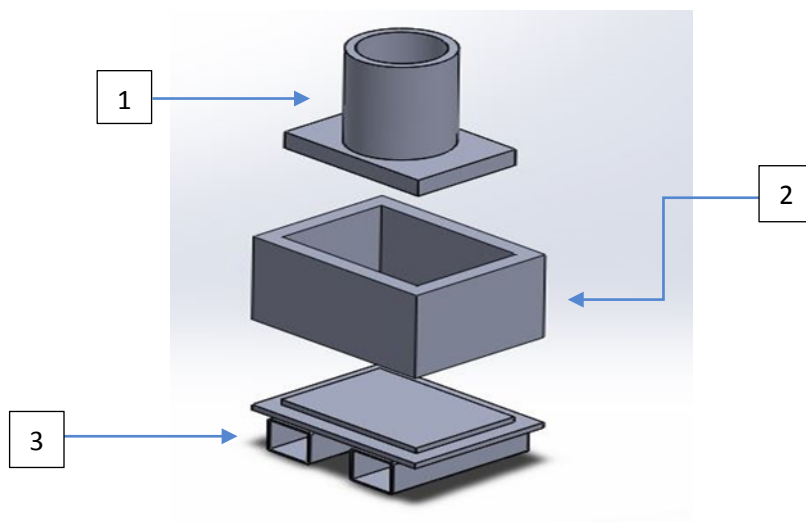


Figura 1.3 Diseño de molde para prototipo de madera plástica.

Una vez que se tienen los parámetros establecidos se decide elaborar unos tablonés de mayor tamaño, para ello se pasa a la elaboración del nuevo molde con el que se va a trabajar, el proceso de fabricación fue igual al que se menciona

en un principio. Dicho molde al igual que el otro consta de tres partes principales; la tapa prensa, aro y tapa inferior.

Molde para barrotos.

(1). -Tapa prensa: Este elemento este fabricado de placa de acero con un espesor de 3/8 y perfil cuadrado de 5 cm.

Esta es utilizada para compactar los residuos de polímeros con finalidad de obtener las muestras deseadas.

(2). -Aro: Este componente fue fabricado de placa de acero de 3/8 con dimensiones de 61 cm. de largo por 10 cm. de ancho y 20 cm de alto.

Dicho componente nos servirá como recipiente para depositar la rebabapolimérica a comprimir, además de dar forma para la fabricación de las muestras deseadas.

(3). -Tapa inferior: Este elemento fue fabricado de placa de acero de 3/8 con dimensiones de 61 cm. de largo por 10 cm. de ancho.

La tapa inferior permite tapar el aro para evitar derramamientos de rebabapolimérica, además esta misma se retira para extraer la muestra obtenida durante el proceso dentro del horno precalentador.

Cuenta con elementos de sujeción lo que permite sostener el molde al momento de introducirlo y sacarlo del horno precalentador.

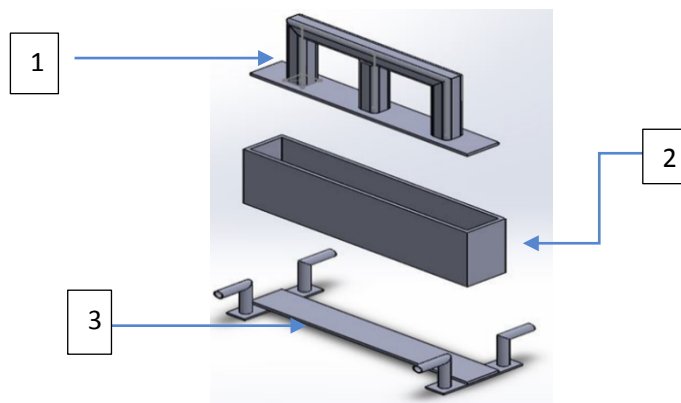


Figura 1.4 Diseño de molde para barrotos.

1.2 Diseño y fabricación de máquina procesadora.

Con la finalidad de procesar la rebaba y transformarla en barrotes y paneles se fabricó una máquina procesadora compuesta por una tolva pre-calentadora, una mesa transportadora y una prensa. Como se muestra en la siguiente figura

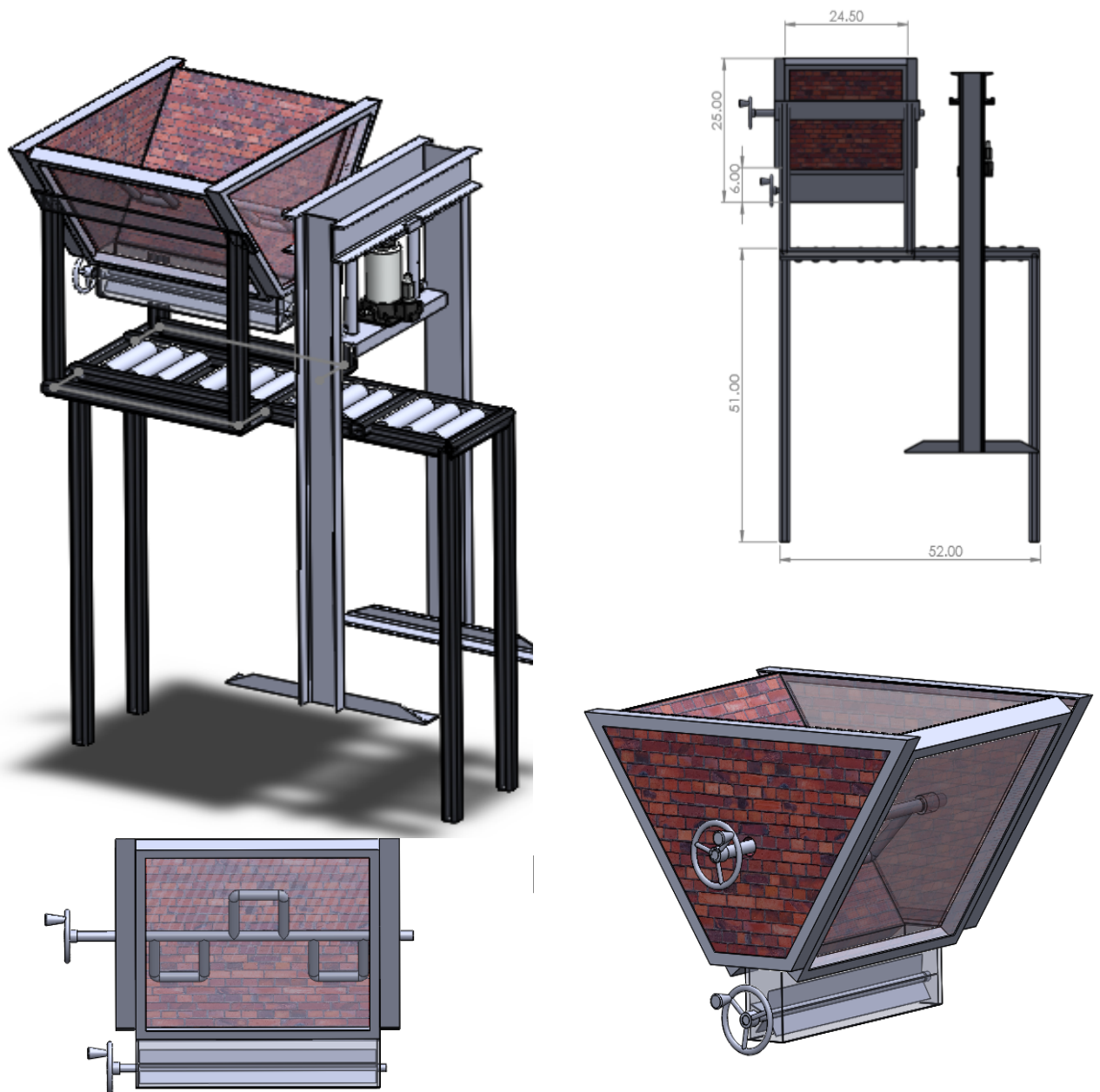


Figura 1.5 Diseño de la máquina procesadora.

Prensa.

La prensa es utilizada para compactar el material una vez llenado el molde con la cantidad de material necesario para la obtención de la muestra con las características deseadas.

La estación de prensado fue construida con una estructura de perfil en C, se utilizó placa de acero de 3/8 para la parte superior e inferior en los sistemas de sujeción para el gato hidráulico, misma que cuenta con sistema de guías y resortes para el desplazamiento de la prensa.



Figura 1.6 a) Prensa completa. b) Sistema de rieles, gato y resortes

Tolva alimentadora.

La tolva es utilizada para el precalentado de la rebaba y para depositar el material precalentado dentro de los moldes utilizados para la obtención de las muestras de tipo barrote y tablón. Fue fabricada de lámina negra calibre 18, además dicho elemento cuenta con un agitador mismo que permite mover el material a procesar durante el proceso de precalentado logrando con ello un proceso de precalentado más uniforme. También cuenta con un sistema de alimentación compuesto por cuatro aspas mismas que permiten depositar el material previamente precalentado dentro de los moldes.



Figura 1.7 Tolva pre-calentadora.



Figura 1.8 Sistema alimentador de la tolva

Mesa de rodillos.

La mesa de rodillos es utilizada para transportar los moldes previamente llenados con el material precalentado hacia el horno procesador.

El elemento en mención fue fabricado en su estructura de perfil cuadrado, además el equipo en mención cuenta con un conjunto de rodillos mismos que facilitan el transporte de los moldes previamente llenados con el material precalentado hacia el horno procesador.

Además la mesa cuenta con elementos de sujeción para la tolva así como tornillos ajustadores para la nivelación de esta.



Figura 1.9 Mesa de rodillos.



Figura 1.10 Sistema completo y equipo de trabajo.

1.3 Proceso.

Después de realizar varios estudios de los parámetros de procesamiento como temperatura de precalentamiento, temperatura y tiempo de calentamiento, y presión de prensado se obtuvieron los parámetros adecuados para la conformación de la rebaba. El proceso completo con todo y sus parámetros se mostrará a continuación.

Para dar inicio al proceso de fabricación se asegura que la rebaba polimérica se encuentre completamente seca y libre de residuos de refrigerante, para ello se somete a un proceso de precalentado en el horno a 160 °C durante media hora, después de eso se saca la viruta, se agrega en el molde pesando la masa con la que se va a trabajar para tener un mejor control.

El molde con la rebaba precalentada se mete al horno a una temperatura de 220°C de 90 a 120 minutos, esto depende de la masa, la humedad y la temperatura del medio ambiente. En el punto de cocción adecuado la rebaba debe estar en un estado de media fusión, no completamente líquida pero sí con una apariencia chiclosa. Una vez que la rebaba está en su punto, es retirada del horno e inmediatamente pasa a la prensa donde se coloca la tapa superior del molde y se realiza el proceso de prensado a una presión de 2000 psi, el molde se deja bajo presión aproximadamente 5 minutos y luego se realiza la maniobra de desmolde retirando la tapa inferior del molde y usando la prensa para sacar la pieza del molde por la parte de abajo. Finalmente las orillas e imperfecciones son retiradas con una navaja y el proceso queda finalizado, ver proceso en la figura 1.11.

La apariencia de la rebaba procesada debe ser completamente fundida y cristalizada, lo cual produce un material sólido y resistente como se observa en la muestra A5. El polímero al ser tratado bajo el proceso que se menciona tiene la capacidad de conformarse en tabloncillos sólidos y resistentes, figura 1.13.



a) Llenado de molde



b) Calentado en horno



c) Prensado



d) Revisión de temperatura

Figura 1.11 Proceso de fabricación de la madera plástica. a) Llenado de molde, b) horneado, c) revisión de temperatura, d) prensado.

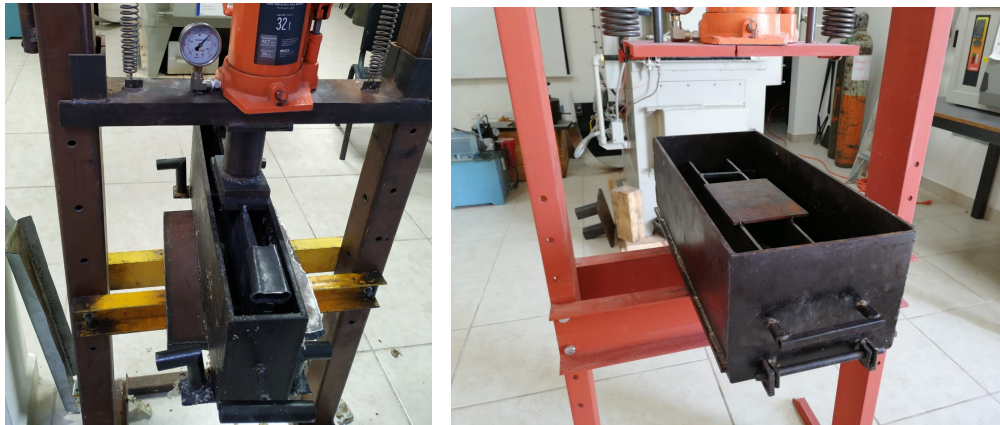


Figura 1.12 Moldes para conformación de barrote y panel. a) Izquierda molde para barrote, b) derecha molde para panel.

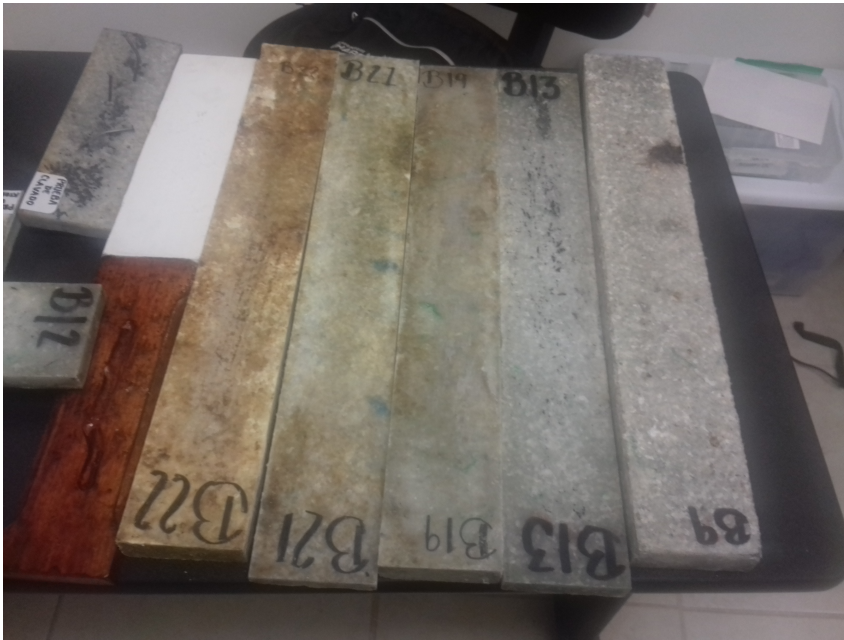


Figura 1.13 Varias piezas obtenidas exitosas en el molde de barroses.

Es de suma importancia controlar los parametros de las variables del proceso ya que de lo contrario se obtienen resultados adversos reflejados en una cocción deficiente de la viruta, afectando la apariencia y constitucion física de las piezas. Por ejemplo pueden quedar crudas en el centro, lo cual da una sensación de un material esponjoso, blando y no totalmente sólido.

Piezas defectuosas

Cuando el proceso de cocción de la rebaba no es suficiente se obtienen piezas crudas donde la rebaba no se funde una con otra quedando de aspecto esponjoso y con baja resistencia (pieza A4) . De lo contrario si la rebaba se coce de más, adquiriendo un color café obscuro, el resultado serán piezas demasiado cristalizadas y frágiles con baja resistencia, figura 1.14 muestra E1.

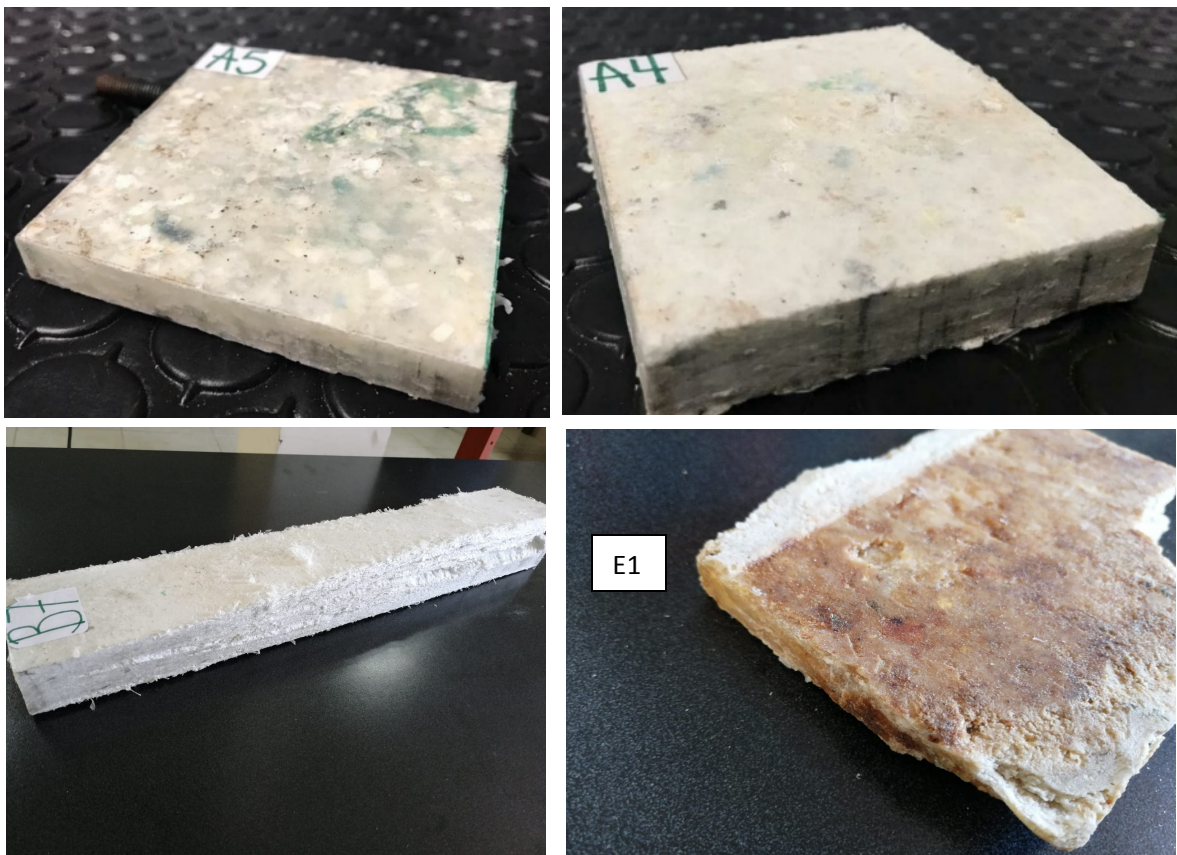


Figura 1.14 Muestras de rebaba procesada. Muestra A5 procesada correctamente. Muestras A4 y B7 con falta de cocción, muestra E1 con exceso de cocción.

Capítulo 2. Caracterización y pruebas

Se realizaron una variedad de análisis y pruebas al material de rebaba procesada (RP) que permitieron tener un conocimiento más certero de las propiedades físicas del material y de sus alcances para ser aplicado como una madera plástica. A continuación se exponen las pruebas realizadas a la RP

2.1 Medición de densidad.

Para determinar la densidad de la rebaba procesada se procedió a cortar una probeta con las dimensiones mostradas en la tabla.

Lado 1	Lado 2	Espesor
1.994cm	1.95cm	0.901 cm

Tabla 1. Dimensiones muestra densidad

Posteriormente en base a las dimensiones se procede a obtener el volumen de dicha muestra.

$$\text{Volumen} = (1.994) * (1.95) * (0.901) = 3.50\text{cm}^3$$

Una vez calculado el volumen de la probeta muestra, con ayuda de una báscula granulométrica se procede a presar la muestra dando un peso total de **4.05 gramos**

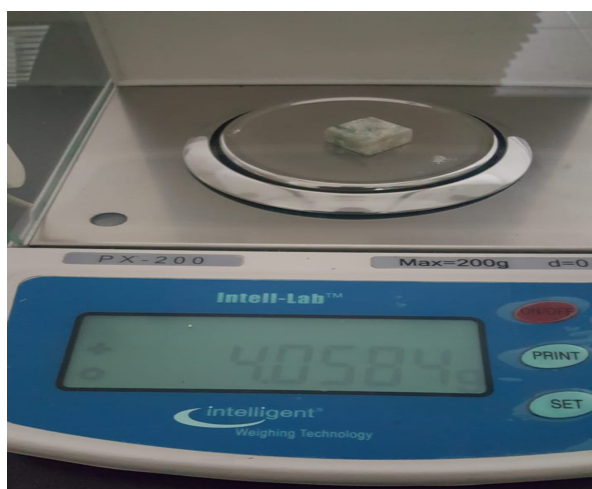


Figura 2.1 Peso probeta densidad.

Una vez obtenido el peso de la muestra se da inicio a calcular la densidad de la rebaba procesada.

$$Densidad = \frac{masa}{volumen}$$

Sustituyendo los valores de la ecuación utilizada para calcular densidad nos da el siguiente resultado

$$Densidad = \frac{4.05\text{gramos}}{3.50\text{cm}^3} = 1.15\text{gr/cm}^3$$

La rebaba procesada tiene una densidad con un valor de **1.15gr/cm³**

2.2 Prueba de resistencia al agua.

Para la prueba de resistencia al agua e hinchamiento se hizo sumergiendo en agua la misma probeta donde se midió la densidad y se hicieron mediciones periódicas del cambio de sus dimensiones durante un periodo de 24 horas. Como se muestra en la siguiente tabla.

Tiempo transcurrido	Lado 1 cm	Lado 2cm	Espesor
Inicio	1.95cm	1.994cm	0.901cm
15 minutos	1.95cm	1.994cm	0.901cm
45 minutos	1.95cm	1.994cm	0.901cm
1:45 horas	1.95cm	1.994cm	0.901cm
3 horas	1.95cm	1.994cm	0.901cm
5 horas	1.95cm	1.994cm	0.901cm
7 horas	1.95cm	1.994cm	0.901cm
8 horas	1.95cm	1.994cm	0.9.01cm
24 horas	1.95cm	1.994cm	0.9.01cm

Tabla 1. Tiempos prueba de hinchamiento.

Durante la prueba de hinchamiento no se observaron cambios en las dimensiones de la muestra, por

lo que tampoco hubo cambio en el valor del volumen de la probeta muestra destinada para este propósito dando un volumen total de 3.50cm^3 , la muestra también fue pesada al final de la prueba y su peso fue el mismo que el inicial 4.05 g. Esto además de indicarnos que no absorbe agua también nos dice que el material no se disuelve o pierde masa por la exposición prolongada al agua.

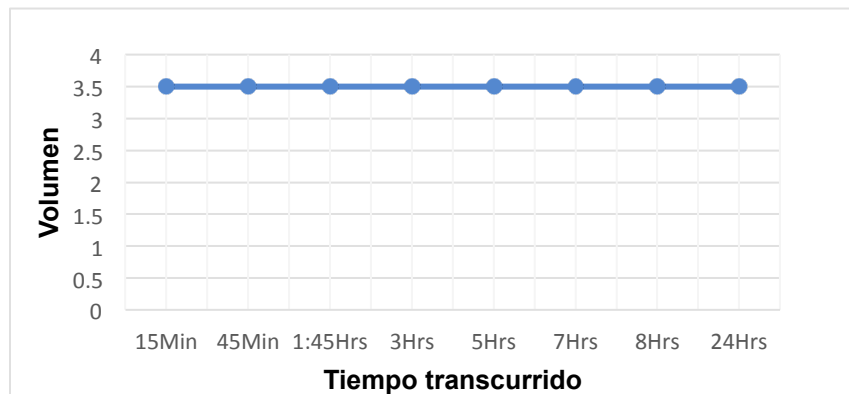


Figura 2.2. Volumen probeta muestra.

2.3 Pruebas mecánicas tensión y compresión

Para conocer las propiedades mecánicas de la rebaba procesada se realizaron pruebas (ensayos) de tensión y compresión usando una máquina universal de pruebas mecánicas, usando el material cortado en las dimensiones estandarizadas para las pruebas. Con estas pruebas se mide de manera certera la resistencia mecánica del material tanto en tensión como en compresión que son los dos tipos de esfuerzos más comunes.

Pruebas de tensión

Para realizar el ensayo de tensión se utilizaron probetas estandarizadas, la probeta es sostenida por unas mordazas, misma que se coloca de forma vertical, una vez colocada la probeta de forma correcta se aplica una fuerza en uno de los extremos de forma lenta y constante, dicha fuerza va en aumento conforme pasa el periodo de prueba. Conforme pasa este tiempo la aplicación de esta fuerza provoca que la probeta comience a estirarse con ello disminuyendo su sección y aumentando su longitud, posteriormente se sigue aplicando una mayor fuerza hasta que la probeta se rompe.



Figura 2.3 Prueba de tensión en probeta de RP colocada en máquina universal

A continuación, se muestran las probetas después de que fueron sometidas a tensión.



Figura 2.4 Probetas de RP sometidas a prueba de tensión.

Una vez realizada la prueba de tensión se procesan los resultados medidos, obteniendo una gráfica de esfuerzo contra deformación donde se observa la

resistencia del material medida con el esfuerzo aplicado en mega pascales (MPa) y su deformación o estiramiento antes del rompimiento.

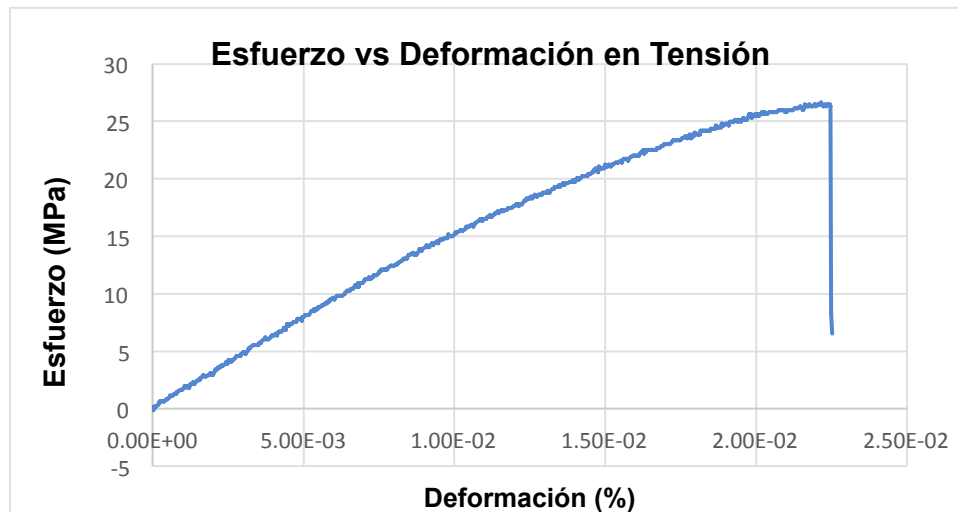


Figura 2.5 Gráfica de esfuerzo deformación para la RP, probeta C1.

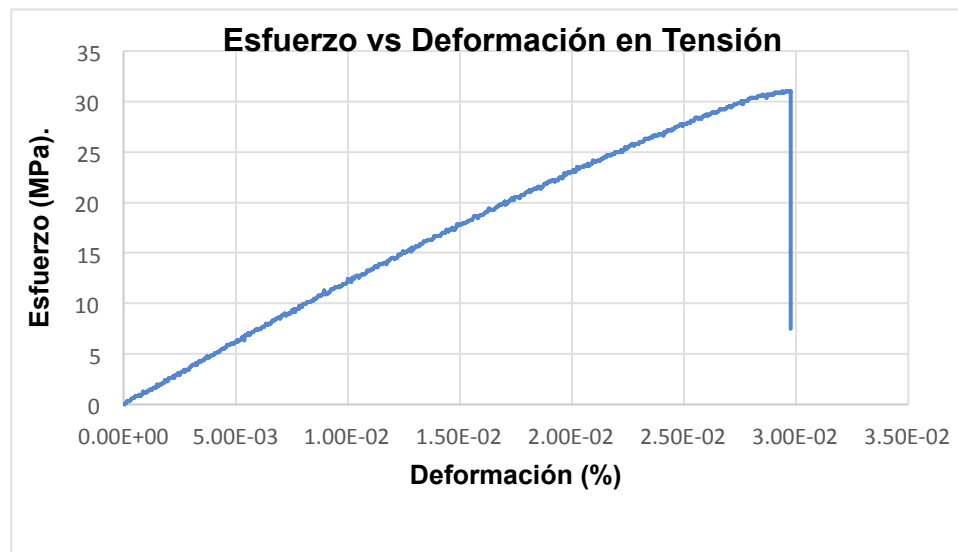


Figura 2.6 Gráfica de esfuerzo deformación para la RP, probeta C3.

Después de analizar los gráficos obtenidos en la prueba de tensión para el material plástico nos da como resultado que el material para la probeta C1 tuvo

una resistencia máxima de **26.45 MPa**. Mientras que para la probeta **C3** el esfuerzo máximo fue de **31.02MPa**.

Tomando el promedio como resultado el esfuerzo máximo a la deformación en tensión para el material plástico de **28.7 MPa**.

Comparación con madera de pino.

Con la finalidad de realizar la comparación de la rebaba procesada contra la madera de pino, se hicieron dos probetas estandarizadas de madera de pino, mismas que fueron sometidas a las pruebas de tensión.

A continuación, se muestran las probetas de madera de pino una vez sometidas a



Figura 2.7 Probeta de madera de pino sometidas a tensión

las pruebas de tensión.

Una vez finalizada la prueba de tensión a las probetas de pino se obtienen resultados, mismos que permiten realizar un gráfico esfuerzo-deformación en tensión para la madera de pino, los cuales se muestran a continuación.

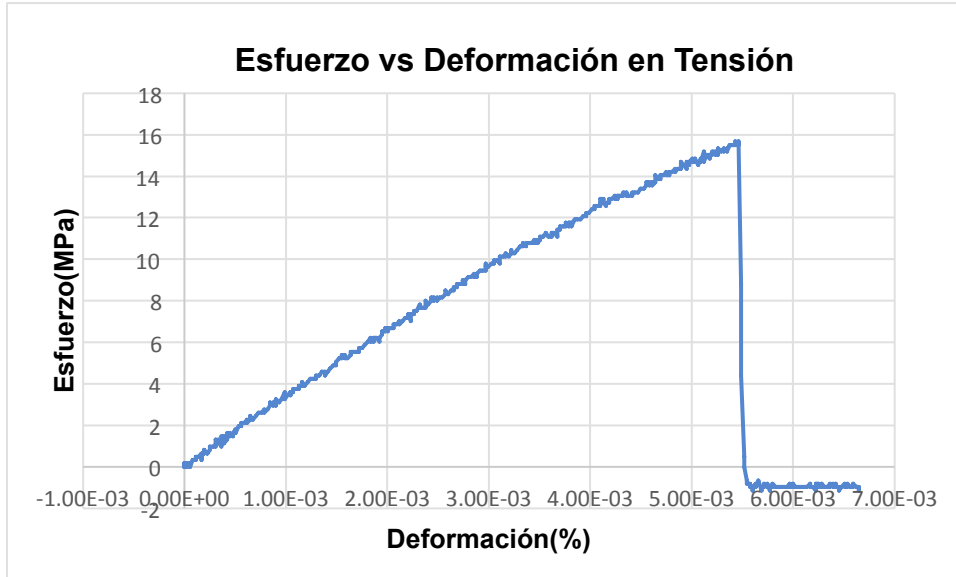


Figura 2.8 Prueba de tensión en madera de pino probeta **D1**

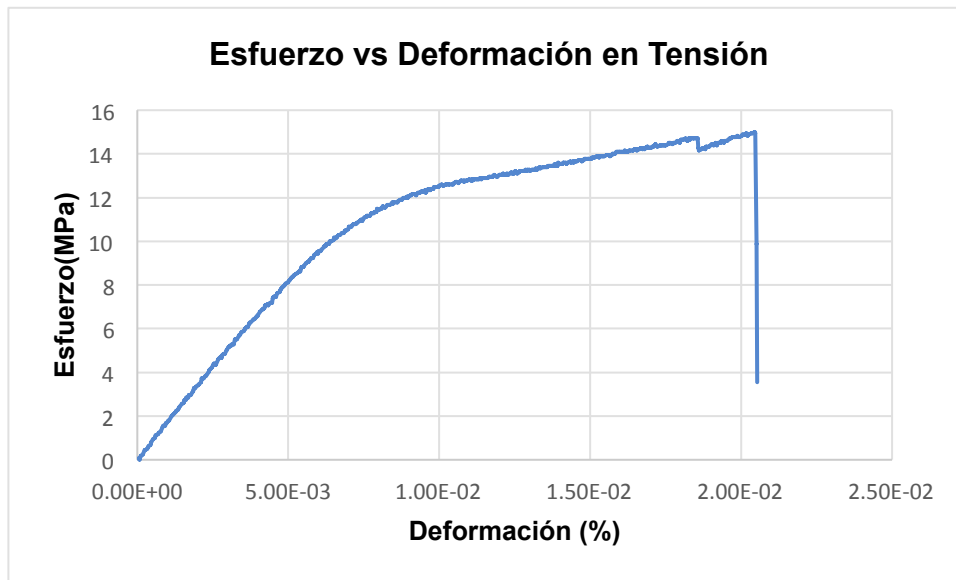


Figura 2.9 Prueba de tensión en madera de pino probeta **D2**

Una vez analizados los resultados obtenidos mediante la gráfica de esfuerzo deformación tenemos que para la probeta **D1** un esfuerzo máximo de **15.67MPa** y para la probeta **D2** es de **14.95MPa**.

Tomando como resultado el esfuerzo máximo en tensión promedio de **15.3MPa** para la madera de pino.

Como conclusión el material plástico de RP presenta una resistencia a la tensión con un valor máximo de **28.7 MPa**, mientras que la madera de pino presenta una resistencia a la deformación en tensión de **15.3 MPa**. Por lo que el material plástico prácticamente tiene el doble de resistencia a la tensión que la madera de pino.

Pruebas de compresión.

La prueba de compresión es un ensayo destinado para determinar la resistencia del material ante un esfuerzo de compresión para ello se toman probetas previamente estandarizadas, dichas probetas tienen forma de prisma cuadrangular. Para iniciar la prueba de compresión se coloca la probeta muestra en el plato de la máquina universal y se comienza a aplicar una fuerza de compresión hasta que la probeta cede, es decir colapsa.

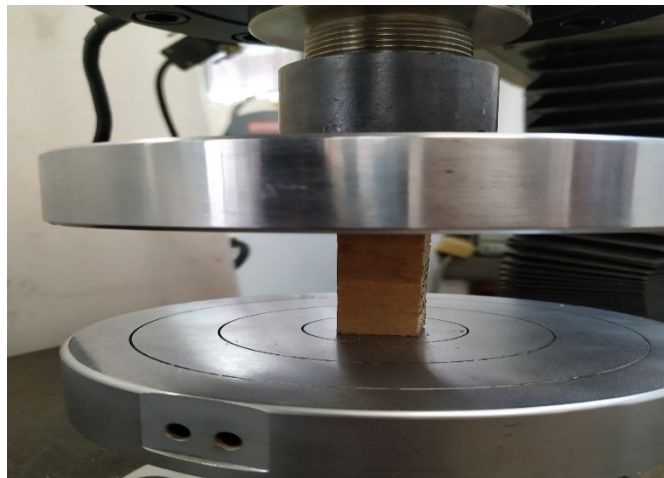


Figura 2.9 Prueba de compresión.

Para realizar las pruebas de compresión a la rebaba procesada, se hicieron dos probetas del material en mención previamente dimensionadas, a continuación se muestran dichas probetas una vez sometidas a la prueba de compresión.



Figura 2.10 Probetas de RP sometidas a compresión

Una vez realizada la prueba de compresión del material plástico obtenemos resultados mismos que nos permitieron realizar los gráficos de esfuerzo-deformación en compresión, los cuales se muestran a continuación.

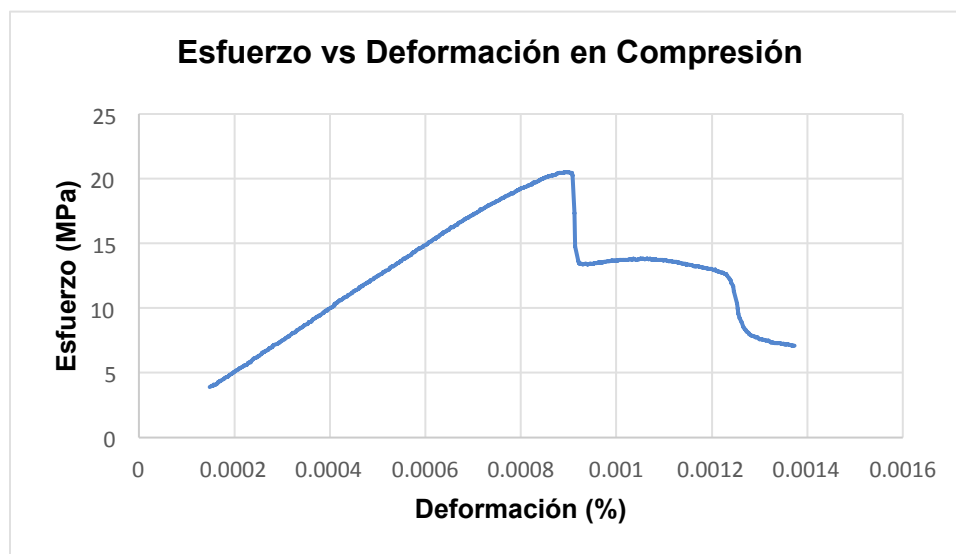


Figura 2.11 Prueba de compresión de RP, probeta F2



Figura 2.12 Prueba de compresión de RP, probeta F3

Una vez analizados los resultados gráficos de la prueba de compresión del material plástico obtenemos que para la probeta **F2** el material tiene una resistencia a la deformación en compresión de **20.49MPa**. Mientras que para la probeta **F3** fue de **19.21MPa**.

Tomando como resultado que el material plástico tiene un esfuerzo máximo a la deformación en compresión promedio de **19.85 MPa**.

Comparación con la madera de pino.

Con el objetivo de comparar las características físicas del material plástico contra la madera de pino se hicieron dos probetas de madera y fueron sometidas a compresión, a continuación, se muestran las probetas una vez realizada la prueba.



Figura 2.13 Probetas de madera de pino sometidas a compresión.

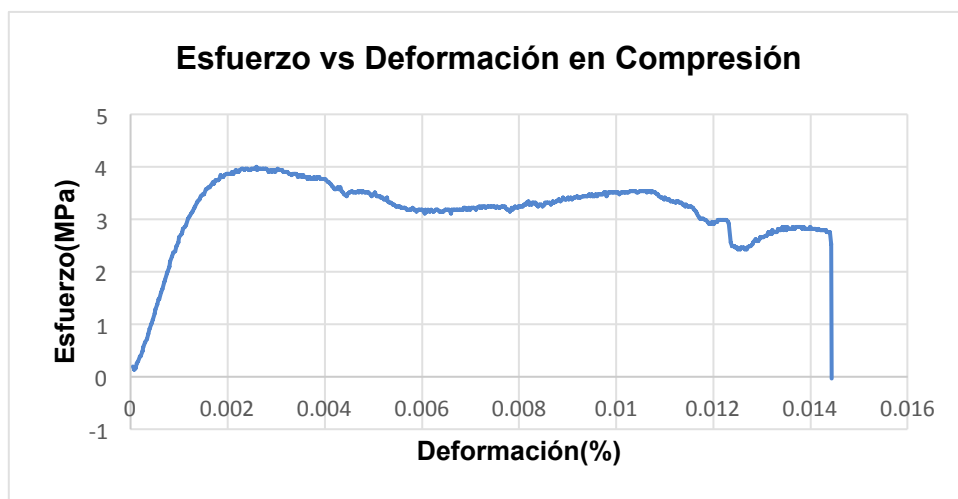


Figura 2.14 Prueba de compresión probeta E2

Después de realizar las pruebas de compresión con la madera de pino se obtienen resultados mismos que nos permitieron desarrollar gráficos esfuerzo deformación los cuales son mostrados a continuación.

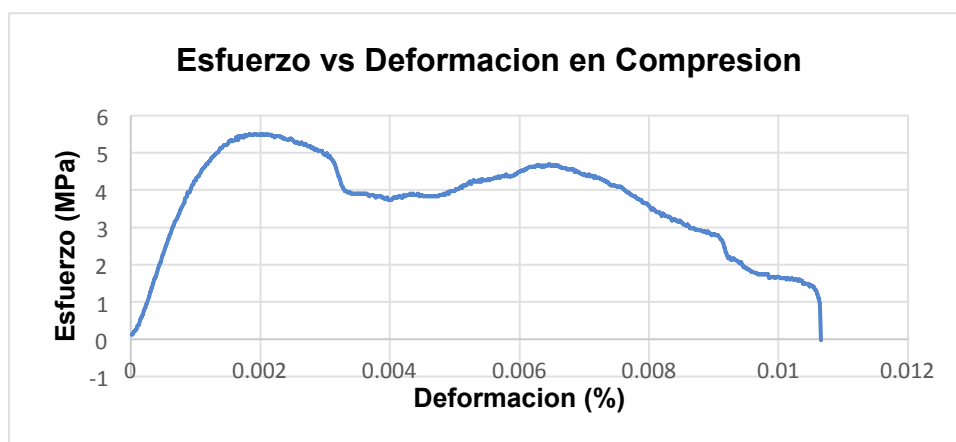


Figura 2.15 Prueba de compresión probeta E3

Después de analizar los gráficos obtenidos en base a la prueba de compresión para la madera de pino nos da como resultado que para la probeta **E2** tiene una resistencia a la compresión de **4.00MPa**. Mientras que para la probeta **E3** de **5.50MPa**.

Tomando como resultado el esfuerzo máximo a la deformación en compresión promedio de **4.75 MPa**.

Como conclusión el material plástico presenta una resistencia mayor a la deformación en compresión con un valor de **19.85 MPa**, mientras que la resistencia de la madera de pino a la deformación en compresión es de **4.75 MPa**.

Por lo que el material plástico tiene 4 veces más resistencia a la compresión que la madera de pino.

2.4 Pruebas de inflamabilidad

Para conocer el comportamiento de la rebaba procesada ante la exposición del fuego se realizó una prueba de inflamabilidad vertical a una probeta muestra del material en mención. Lo anterior con base a la norma UL94 misma que determina la capacidad de un material plástico para prologar o extinguir la flama, dicha norma cuenta con distintas clasificaciones mismas que están destinadas para la clasificación de materiales utilizados en cerramientos y piezas estructurales.

Las clasificaciones de la norma **UL 94** son las siguientes:

- **5VA:** La combustión o luminiscencia se mantiene durante un periodo ≤ 60 segundos después de haber aplicado la llama 5 veces, es posible que la muestra no tenga orificios causados por la quemadura.
- **5VB:** la combustión o luminiscencia se mantiene durante un periodo ≤ 60 segundos después de haber aplicado la llama 5 veces, es posible que la muestra tenga orificios causados por la quemadura.

- **V-0:** La combustión se detiene dentro de los 10 segundos sin goteo ni llamas.
- **V-1:** La combustión se detiene dentro de los 30 segundos sin goteo de llamas.
- **V-2:** La combustión se detiene dentro de los 30 segundos con goteo de llamas o partículas encendidas.
- **HB:** Combustión lenta a una muestra horizontal, de menos de 76 mm/min en espesor inferior a 3mm.

La prueba de inflamabilidad vertical consistió en colocar una probeta muestra de rebaba procesada en un soporte universal (figura 2.16) , luego se prende el fuego y una vez que se enciende la probeta se retira la fuente de ignición. Una vez retirada la fuente de ignición con la probeta encendida se procede a tomar un periodo de tiempo máximo de 60 segundos para que la muestra del material se apague por si sola.

Lo anterior nos permite conocer el comportamiento de la rebaba ante la exposición del fuego, así como también el periodo de tiempo en el que la flama se extingue y a su vez observar el daño que el fuego causa a la probeta muestra.



Figura 2.16 Probeta de RP colocada para la prueba de inflamabilidad .

Resultado.

Al realizar la prueba en mención observamos la propagación de la flama de manera inmediata, misma que se desplazo por la totalidad de la muestra, una vez retirada la fuente de ignición la propagación de la flama continua. Luego se tomó el tiempo, la muestra supero el tiempo máximo de 60 segundos sin apagarse sola, por lo que se procedió a extinguir el fuego de la muestra de forma manual.

Una vez finalizada la prueba al observar la muestra de RP (fig. 2.17) nos dimos cuenta de que presenta quemaduras en su totalidad y además se muestra desprendimientos de material carbonizados.



Figura 2.17 Probeta de RP despues de la prueba de inflamabilidad.

Con el objetivo de realizar una comparativa del comportamiento de la rebaba ante la exposición del fuego con otro material nos dimos a la tarea de tomar una probeta de madera de pino para realizar la prueba en mención a este material.



Figura 2.18 Probeta de madera de pino.

Para el caso de la madera de pino se observó la propagación de la flama a lo largo de la muestra, pero en este caso presentaba un desplazamiento más lento, una vez retirada la fuente de ignición la propagación de la flama continua. Pero una vez transcurrido un tiempo de 30 segundos la propagación de la flama en la madera de pino se extinguió en su totalidad.

Una vez finalizada la prueba a la probeta de madera observamos la muestra y solo presentaba daños en su coloración presentando un color carbonizado, pero sin desprendimiento de partículas de material carbonizado.



Figura 2.19 Prueba de inflamabilidad en madera de pino

Como conclusión ante la prueba de inflamabilidad la rebaba procesada sobrepasa la última clasificación según la norma **UL94** dado que sufrió desprendimiento de material carbonizado y además la propagación de la flama fue continuo mismo que supero el tiempo de extinción de flama establecido por la norma. Por lo tanto no cumple con dicha norma. Por lo que se recomienda la aplicación de retardantes de flama, lo anterior con la finalidad de retardar el tiempo de propagación del fuego.

2.5 Pruebas de atornillado y clavado.

Con el objetivo de probar los distintos elementos de sujeción en la rebaba procesada se realizaron pruebas de atornillado y clavado, en las que se utilizaron tornillos y clavos que comúnmente son utilizados para realizar la unión de tabloncillos de madera.

Atornillado

Al momento de realizar la prueba de atornillados en la rebaba procesada, se observa que los tornillos se incrustan de manera correcta, lo que permitió la unión de dos tablones del material en mención. Cabe destacar que la unión de dichos tablones se realizo de forma fija y simple sin que dichos tablones se separaran o sufrieran fractura alguna, lo que nos da como conclusión que la rebaba procesada puede ser unida con tornillos para madera o los tornillos para tablaroca.



Figura 2.20 Prueba de atornillado.

Clavado

Para realizar la prueba de clavado se utilizaron clavos de dos pulgadas mismos que son utilizados como elementos de sujeción de madera comercial.

Para la prueba de clavado se utilizaron dos tablones de rebaba procesada mismos que se pretendía unir, pero al momento de efectuar dicha prueba los

clavos no pudieron penetrar del todo y se doblaron al realizar el proceso de clavado manual, por lo que no se pudieron clavar los dos tablones.

Lo anterior nos da como conclusión que la rebaba procesada difícilmente puede ser unida utilizando martillo manual y clavos, posiblemente una pistola neumática de clavos podría funcionar.



Figura 2.21 Prueba de clavado

2.6 Pruebas de corte

Corte con sierra

Con el objetivo de conocer el comportamiento de la rebaba procesada ante procesos de corte, se realizaron distintas pruebas en los que se utilizaron distintos equipos destinados para este propósito como los son sierra cinta eléctrica y sierra eléctrica manual, dado que estos equipos son los mas utilizados para el corte de madera.

Al momento de realizar las pruebas de corte se observa que con ambos equipos se obtuvieron cortes limpios, sin desprendimientos de material ni astillas de ningún tipo. Por lo tanto la rebaba puede ser sometida a procesos de corte con distintos equipos, sin ningún problema.



Figura 2.22 Pruebas de corte.

Corte con router

Para conocer el comportamiento de la rebaba ante el trabajo con router con cortadores de madera se realizaron distintas pruebas de trabajo con cortadores destinados para este propósito.

Dicho proceso se realizó con un tablón del material en mención y con ayuda de un router para madera, probando tres cortadores distintos, como se muestra en la imagen. La muestra se barnizó para mejorar el contraste i poder observar mejor los cortes ya que en color natural los cortes se pedían en la fotografía.

Durante la realización de la prueba se observó un comportamiento ideal del material al ser trabajado con el router no presentando problemas para ser contorneado al igual que la madera.



Figura 2.23 Pruebas de router.

2.7 Prueba de adherencia de pintura

Una vez obtenidas distintas muestras de rebaba procesada se realizaron distintas pruebas de adherencia de pintura, lo anterior con la finalidad de observar las características del material ante la aplicación de pintura. Dichas pruebas se realizaron con base a la norma **NMX-U-065-SCFI-2011** misma que describe la metodología comparativa de adherencia de pinturas y barnices por medio de cinta adhesiva, esta misma cuenta con tres métodos distintos.

Las pruebas fueron realizadas con base al método C este mismo es utilizado para la comparación de adherencia de pintura entre plásticos y madera. La metodología para la realización de las pruebas consiste en distintos pasos.

Como punto inicial se toma una muestra de la rebaba procesada para realizar la prueba de pintura.

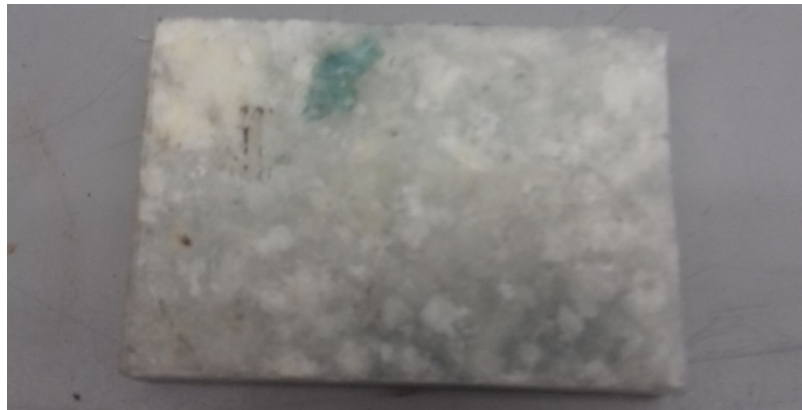


Figura 2.24 Probeta para pintura.

Posteriormente aplicamos pintura sobre la muestra y se deja secar durante el tiempo y condiciones establecidas por el fabricante de pinturas, cabe destacar que la pintura utilizada en la prueba de adherencia son materiales utilizados en maderas de pino.

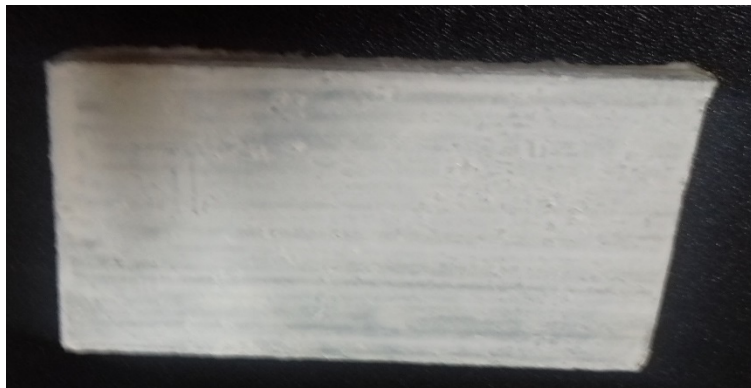


Figura 2.25 Probeta para prueba de pintura.

Luego de que la pintura se encuentra seca en su totalidad, con ayuda de una navaja se procede a cortar una cuadrícula de 6 x 6 líneas con una distancia de entre línea de 3 mm, la profundidad del corte no importa solo es importante definir correctamente la cuadrícula como se muestra en la figura.

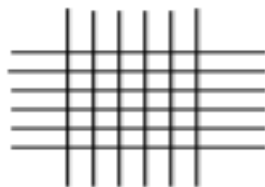


Figura 2.26 Cuadrícula para corte.

Una vez realizados los cortes con la geometría correspondiente se aplica la cinta adhesiva sobre la muestra en la zona donde se encuentra la cuadrícula anteriormente definida, es importante limpiar la zona donde se realizaron los cortes con la finalidad de obtener una mejor adherencia de la cinta adhesiva. La cinta adhesiva para utilizar durante la prueba tiene un ancho de 25 mm a 50mm como máximo esto con la finalidad de cubrir en su totalidad la cuadrícula dibujada.

Al momento de colocar la cinta adherente es importante dejar un dobléz en uno de los extremos como se observa en la imagen, esto con la finalidad de realizar un desprendimiento correcto de la cinta y de este modo nos permita observar el desprendimiento de pintura

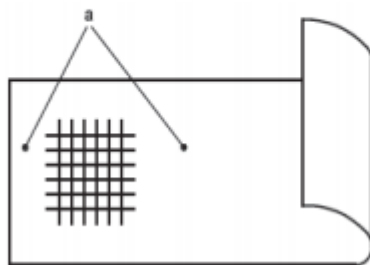


Figura 2.27 Forma correcta para colocar cinta adhesiva

Luego de la colocación de la cinta se deja pasar un periodo de tiempo de 5 minutos, para posteriormente retírala de la muestra con ayuda del extremo donde se realizó el dobléz

Posteriormente se evalúan los resultados según la clasificación establecida en la norma anteriormente mencionada observar imagen.

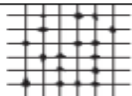
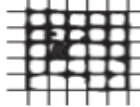
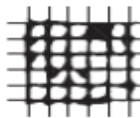
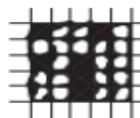
Clasificación	Descripción	Aspecto de la superficie del área de corte donde ha ocurrido desprendimiento (Ejemplo para seis cortes paralelos)
0	Los bordes de los cortes están completamente lisos; ninguno de los cuadros de la cuadrícula está desprendido.	-----
1	Desprendimiento de hojuelas pequeñas del recubrimiento en las intersecciones de los cortes. El área afectada del corte transversal no es mayor al 5 %.	
2	El recubrimiento se ha desprendido a lo largo de los bordes y/o en las intersecciones de los cortes. El área afectada del corte transversal es mayor a 5 %, pero menor a 15 %.	
3	El recubrimiento se ha desprendido parcialmente a lo largo de los bordes de los cortes o totalmente en tiras grandes, y/o éstas han desprendido parcial o completamente diversas partes de los cuadrados. El área afectada del corte transversal es mayor a 15 %, pero menor a 35 %.	
4	El recubrimiento se ha desprendido a lo largo de los bordes de los cortes en tiras grandes y/o algunos cuadrados se han desprendido parcial o completamente. El área afectada del corte transversal es mayor a 35 %, pero menor a 65 %.	
5	Cualquier grado de desprendimiento que no pueda ser calificado como 4. El área afectada del corte transversal es mayor a 65%	-----

Figura 2.28 Clasificación de adherencia de pintura.

Resultado. La probeta destinada para la prueba de adherencia de pintura al ser



Figura 2.29 Resultado prueba de pintura

observada tiene una clasificación de grado dos debido a que la pintura se desprendió a lo largo de los bordes y en las interacciones de los cortes observar imagen de la muestra.

Una vez analizados los resultados se procedió a pintar una superficie más grande, donde se observaron los resultados esperados, es decir una excelente adherencia de la pintura. Se utilizaron pinturas comerciales comúnmente usadas para pintar la madera de pino como lo son el barniz y la pintura vinílica.



Figura 2.30 Prueba de barniz y pintura vinílica

2.8 Resumen de la evaluación comparativa de la madera plástica contra la madera de pino

Después de realizar todas las pruebas correspondientes a la rebaba , se pretende realizar una comparación de las propiedades y características que describen a cada material.

Propiedades físicas.

Propiedades	Madera plástica	Madera de pino
Densidad	1.15g/cm ³	.500g/cm ³
Hinchamiento	No presenta hinchamiento	Si presenta hinchamiento

Tabla 2a.Propiedades físicas RP y madera de pino. Densidad e hinchamiento

Resistencia mecánica.

Tipo de esfuerzo (MPa)	Madera plástica	Madera de pino
Tensión	28.7	15.3
Compresión	19.85	4.75

Tabla 2b.Propiedades físicas RP y madera de pino. Tensión y compresión.

Inflamabilidad.

- Para la rebaba se recomienda uso de retardante de flama dado que la prolongación de la flama es alta.
- La madera de pino clasifico en la categoría v-1 debido a que su flama se extingue a los 30 segundos después de retirada la fuente de ignición por lo que tiene un menor índice de flamabilidad.

Pruebas atornillado y clavado.

- Para unir barrotes de rebaba se recomienda utilizar tornillos para tablaroca, dan una excelente firmeza, los barrotes no quedan flojos, no se recomienda usar clavos dado que estos se doblan al momento de ser clavados

Pruebas de corte.

- Al momento de realizar las pruebas de corte la rebaba presenta cortes limpios sin astillas ni desprendimientos de material, por lo que este material es más manejable al realizar cortes.
- La madera de pino presenta cortes limpios, pero desprende astillas, cuando los cortes no se realizan de forma correcta.

Mecanizado con cortadores para madera.

- Ambos materiales presentan son similares al momento de utilizar equipos como router para dar las formas deseadas.

Prueba de pintura.

- La rebaba puede ser pintada con material comerciales que comúnmente son utilizados para pintar la madera de pino como lo son el barniz y la pintura vinílica.
- Ambos materiales presentan una adherencia de grado dos sin grandes desprendimientos de partículas de pintura.

Capítulo 3. Análisis de consumos de energía.

En esta parte del proyecto se hace un análisis de la energía necesaria para transformar la rebaba polimérica en un material sólido que pueda ser usado como madera plástica. El proceso de transformación requiere de calentar la rebaba hasta una temperatura de hasta 220°C y la energía consumida para este proceso depende de la masa que se quiera calentar, por lo tanto es posible hacer mediciones de consumo de energía eléctrica en el horno y obtener un índice de consumo por unidad de masa procesada. Para tal tarea, se monitoreo el amperímetro del horno, el cual marca el amperaje por fase, una vez alcanzada la temperatura de proceso se metió el molde con una masa de 1.2 kg, y se realizó una gráfica de amperaje contra tiempo hasta que la muestra fue retirada. Las mediciones que se presentan fueron para dos procesos de 120 minutos cada uno

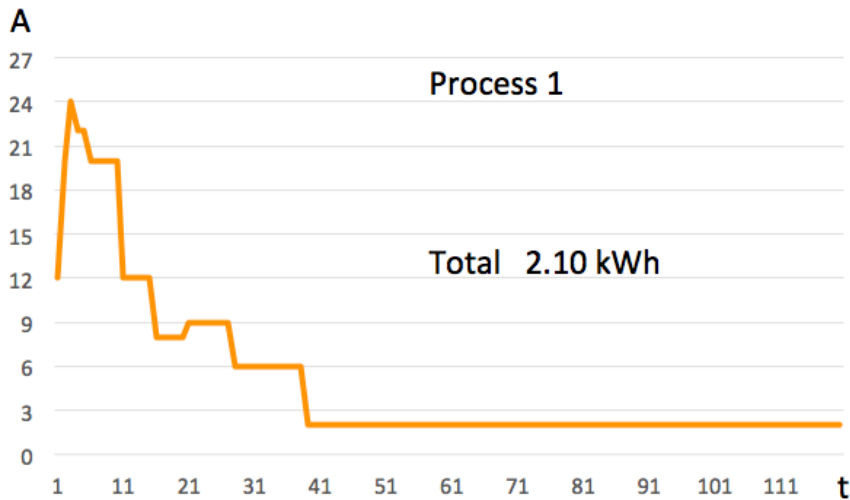


Figura 3.1 Medición de amperaje vs tiempo durante un proceso (1) de RP en el horno.

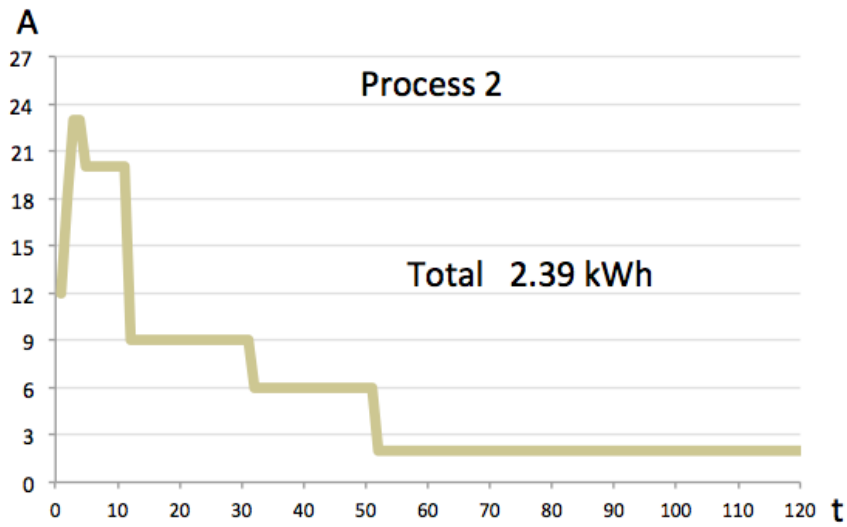


Figura 3.2 Medición de amperaje vs tiempo durante un proceso (2) de RP en el horno.

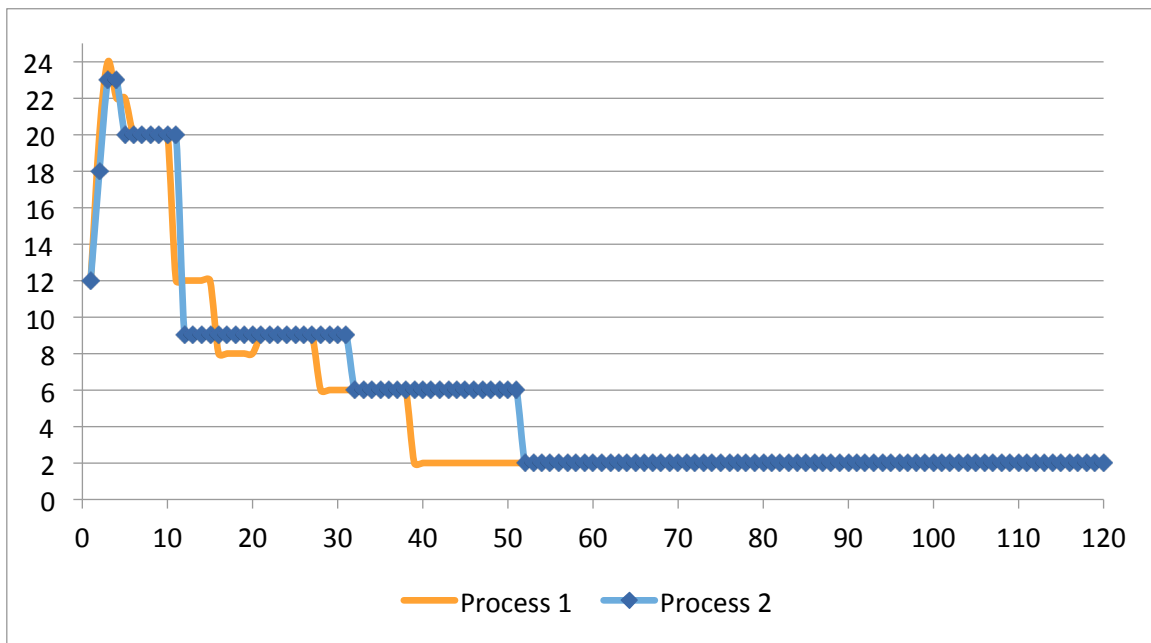


Figura 3.3 Comparación del consumo de amperaje en los dos procesos.

Los cálculos del consumo de energía eléctrica se realizan integrando el perfil de la demanda con respecto al tiempo mediante el siguiente cálculo

$kWh=3^{0.5}(V)(I)(t)$ donde $3^{0.5}$ es un factor para la determinación de la potencia en un sistema trifásico, V es voltaje, I corriente en amperes, t es el tiempo de consumo. De esta manera se obtuvieron los consumos de energía para cada proceso. Para los cálculos usaremos un promedio de varios procesos el cual fue de 2.25 kWh

Una vez determinada la energía consumida solo se divide entre la masa para tener el consumo por unidad de masa, en este caso para ambos procesos se uso una masa de 1.2 kg

Calculo del índice energético, consumo energético por unidad de masa

$$2.25 \text{ kWh}/1.2\text{kg} = 1.875 \text{ kWh/kg}$$

Con este índice energético es posible cuantificar los costos por para cada pieza de dimensiones específicas o por unidad de masa en general.

Ejemplo de cálculo de costo de energía para un barrote comercial.

Por ejemplo para un barrote de dimensiones comerciales de 2x4" y 8 pies de largo, tendría un volumen total usando las dimensiones reales que son menores que las nominales $v=4\text{cm} \times 9\text{cm} \times 244\text{cm} = 8784 \text{ cm}^3$

De acuerdo a la densidad determinada para el material de 1.15 gr/cm^3

Se obtiene el peso del barrote que sería de $(8784 \text{ cm}^3)/1.15 \text{ gr/cm}^3 = 7638.3\text{gr}$

O sea 7.64 kg

Usando el índice energético se obtiene el consumo de energía de la pieza

$$7.64 \text{ kg} \times 1.875 \text{ kWh/kg} = 14.32 \text{ kWh por dicha pieza}$$

Con una tarifa eléctrica industrial del tipo GDMTO el costo de energía aproximado es de 1.084 pesos/kWh podemos determinar el costo de la pieza por concepto de la energía consumida para su procesamiento, el cual sería de:

$$\text{Costo en pesos} = 14.32\text{kWh} \times 1.084 \text{ pesos/kWh} = 15.52 \text{ pesos por pieza}$$

De la misma manera podemos estimar el costo de un panel de madera plástica de dimensiones comerciales de 4'x8' de ½" de espesor, similar a las hojas de tabla roca. Para este panel el peso calculado sería de 32.7 kg , por el índice energético consumiría 61.31 kWh y por el precio de la energía eléctrica tendría un costo de 66.5 pesos.

Es importante que estos costos son únicamente de energía en el proceso principal, pero no representa el costo total del producto, habría que agregar otros costos como de subprocesos (que representan consumos menores) o de mano de obra y gastos fijos de la empresa, además que la CFE no solo realiza el cobro de energía sino también de demanda, factor de potencia, DAP, etc. Por lo tanto el costo total podría verse incrementado significativamente.

Capítulo 4. Propuesta de un producto de utilidad para construcción.

De acuerdo con las características observadas y el tipo de procesamiento necesario, se espera que la RP puede ser transformada en piezas con uso estructural que demanden resistencia mecánica. A continuación se presenta una propuesta de uso práctico.

Se propone la fabricación de un sistema de construcción mediante elementos estructurales como barrotos y paneles similares a los de madera usados en el sistema de construcción tipo americano. Los barrotos o tablones de 2"x4" , 2"x8" y paneles estructurales de 4x8 pies con ½ " de espesor. Como se muestran en la figura 4.1.

Este sistema presentará características semejantes a la madera pero con algunas cualidades superiores como su resistencia al agua, humedad, hongos, termitas y otras plagas. Se pretende obtener un sistema económico, eficiente, duradero, versátil y amigable que pueda ser usado desde cercas caseras, mobiliario exterior, tejabanos, ampliaciones hasta la edificación de vivienda económica. En la figura 4.2 se ejemplifica el tipo de construcción que se podría hacer con este sistema.

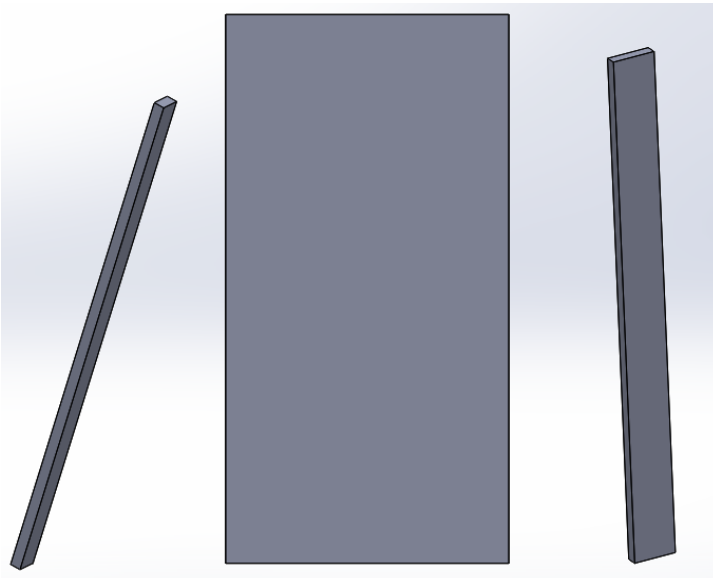


Figura. 4.1 Barrotes de 2"x4" 2"x8" y panel estructural de 4x8 pies.

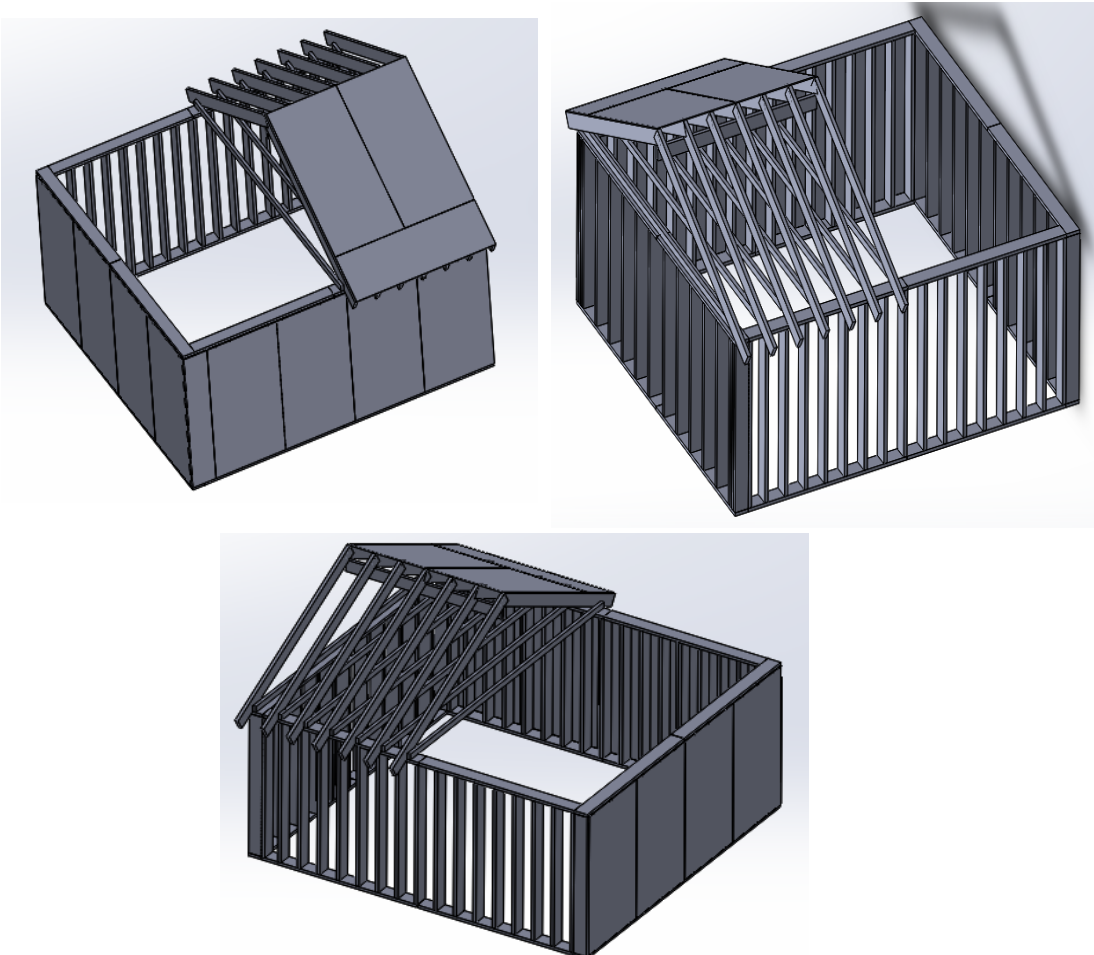


Figura 4.2 Modelo de construcción tipo americano usando solo barrotes de 2"x4" y paneles estructurales de 4x8 pies.

4.1 Diseño de casa habitación.

La casa habitación que se propone tiene el diseño y dimensiones semejantes a una casa de interés social tipo infonavit que consta de dos recámaras, un baño cocina y sala comedor. La figura 4.3 muestra los planos con dimensiones de la casa habitación, los cuales están acotados en metros, la casa tiene una superficie de 60 metros cuadrados y altura total de 2.60 metros.

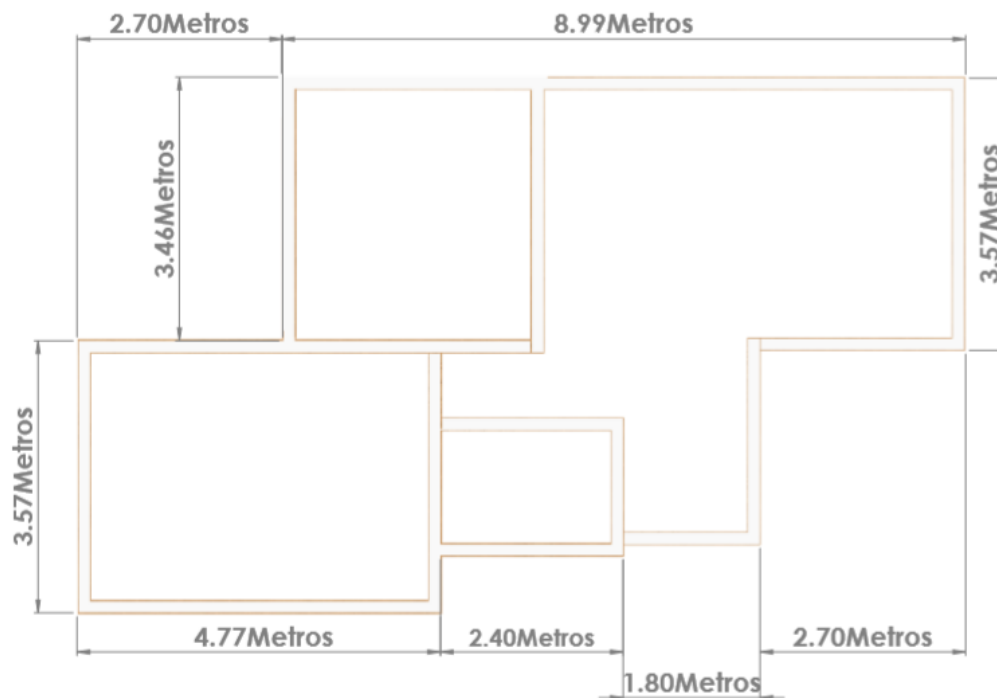


Figura 4.3 Plano de casa habitación

Con la ayuda del software computacional SolidWorks se realizo un modelo de la casa en 3D que servirá para analizar su construcción con el material de estudio.

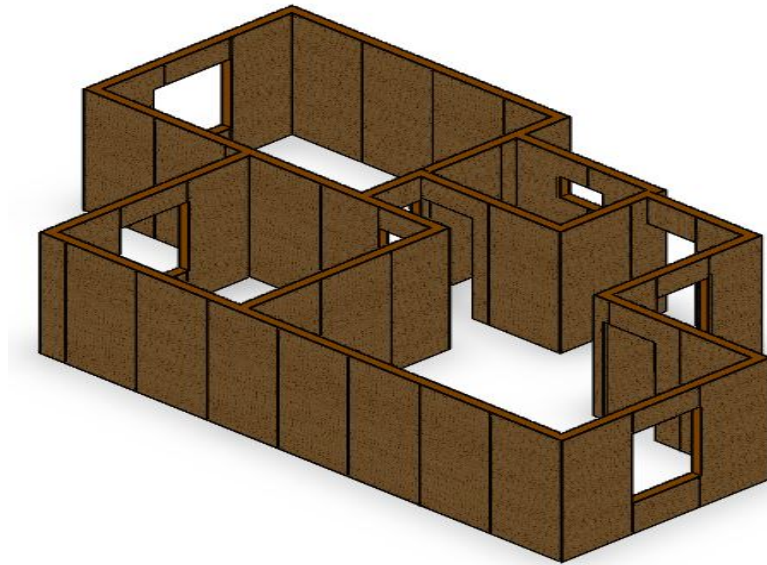


Figura 4.4 Modelo 3D de casa habitación propuesta.

La casa habitación contará con un tipo de fabricación conocido como Americano, el cual tiene una estructura de barrote de madera nominal 2x4" forrada con panel de triplay de astilla (plywood) de $\frac{1}{2}$ ". En nuestro caso la propuesta es que los elementos estructurales sean de madera plástica. La figura 4.5 muestra la estructura de la casa con barrotes .

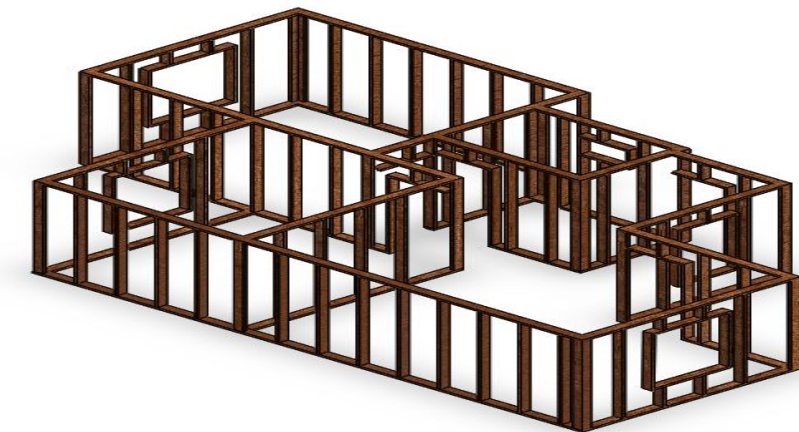


Figura 4.5 Estructura tipo americano de la casa habitación

La estructura va cubierta con láminas tipo panel de $\frac{1}{2}$ in de espesor, la cual va fija sobre la estructura. El panel estándar disponible en el mercado comercial cuenta con dimensiones de 4'x8' por $\frac{1}{2}$ " de espesor. A continuación, se muestra una imagen donde se observa más a detalle este tipo de construcción.

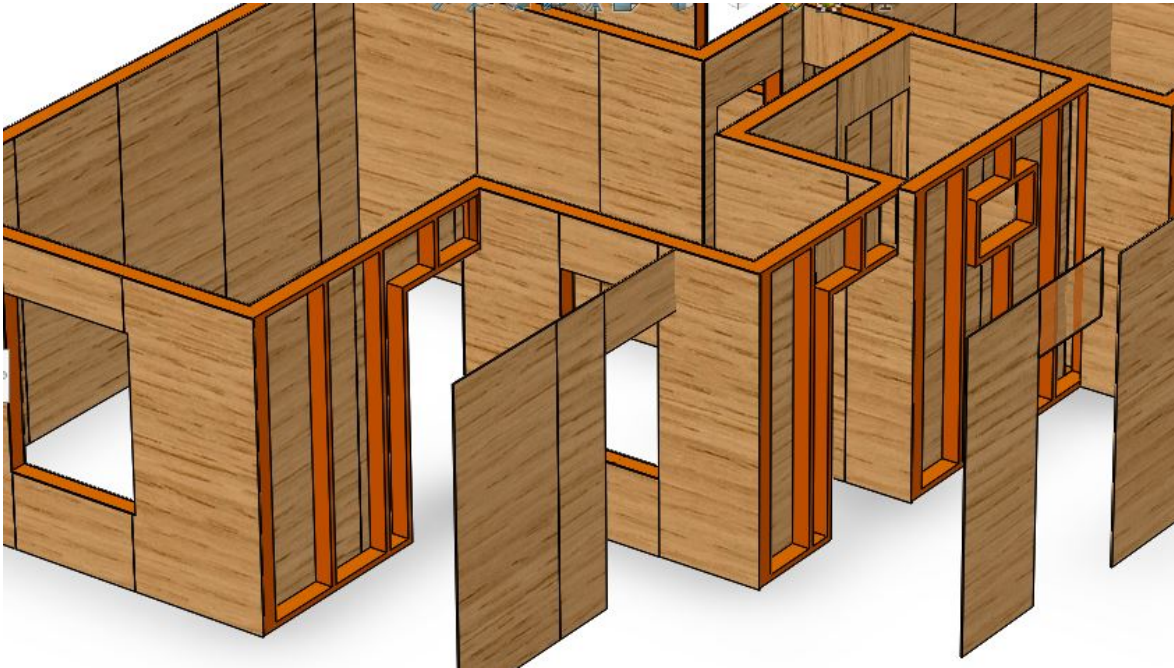


Figura 4.6 Estructura de barrote y panel.

Determinación de la cantidad de material para la fabricación casa habitación.

A continuación, se presentan los cálculos del material correspondiente para la fabricación de la casa especificada en los planos.

Dimensiones panel estándar

Ancho	Largo	Espesor
48in	96in	.5in

Con base a las dimensiones de la tabla procedemos a calcular el volumen del panel.

$$\text{Volumen}=(48in) * (96in) * (.5in)$$

$$\text{Volumen total del panel} =2304 \text{ in}^3$$

Dimensiones del barrote estándar

Ancho	Largo	Espesor
3.5in	96in	1.5in

Tomando en cuenta las dimensiones de la tabla se calculó el volumen de barrote

$$\text{Volumen total de barrote}=(3.5in) * (96in) * (1.5in)$$

$$\text{Volumen total de barrote} = 504\text{in}^3$$

Con ayuda de SolidWorks determinamos el volumen total de la casa, así como también el volumen total de la estructura de tipo barrote y de los paneles.

Volumen total de la casa

Volumen total casa	5.37m³
Volumen total estructura barrotes	2.52m³
Volumen total estructura panel	2.85m³

Posteriormente convertimos el volumen del barrotes y del panel a m³ dado que nuestro software computacional trabajo el volumen en m³

Volumen panel y barrotes en metros cúbicos

Volumen del panel in³	Volumen del panel en m³
2304in³	0.0377558m³

Volumen del barrotes in³	Volumen del panel en m³
504in³	0.00825908m³

Acontinuación se calcula el número total de paneles necesarios para la casa habitación.

$$\text{Paneles totales} = \frac{\text{Volumen total estructura panel}}{\text{volumen del panel}}$$

$$\text{Sustituyendo Paneles totales} = (2.85\text{m}^3) / (0.0377558\text{m}^3) = 75.48$$

Redondeando da un total de **76 paneles**

Determinación del número total de paneles necesarios para la casa habitación

$$\text{Barrotes totales} = \frac{\text{Volumen total estructura barrotes}}{\text{volumen del barrotes}}$$

$$\text{Sustituyendo Barrotes totales} = (2.52\text{m}^3) / (0.00825908\text{m}^3) = 305.11$$

Redondeando da un total de **306 barrotes**

Total de panel para construcción casa habitación

Total de barrote	306
Total de paneles	76

Posteriormente se calcula el peso total de la casa habitación.

$$\text{Peso} = \text{volumen total casa habitacion} * \text{densidad de la rebaba polimerica}$$

$$\text{Sustituyendo peso} = (5.37\text{m}^3 * (1150\text{kg/m}^3)) = \mathbf{6175\text{kg}}$$

Cálculo de materia prima de rebaba necesaria para la casa habitación

A continuación, se determinará la cantidad de materia prima de rebaba para procesar **6175 kg**

Materia prima por barrote	Peso del barrote de RP procesada
2Kg	1.250kg
	6175kg

$$\text{Total de kg materia prima} = (6175\text{kg}) * (2\text{kg}) / (1.250\text{kg}) = \mathbf{9,880\text{kg}}$$

Total de materia prima para una casa habitación **10 toneladas** aproximadamente con un costo de energía para su procesamiento de aproximadamente \$20,325.00 pesos.

Fabricación muro prototipo.

Con la finalidad de observar como sería el ensamble de las paredes en la casa habitación, se realizó un muro prototipo con el material de estudio.

Dicho muro fue ensamblado con los tornillos para madera, dado que son los elementos de sujeción mas apropiados para el material, según los resultados obtenidos durante las pruebas de atornillado y clavado. El muro prototipo muestra la solidez y rigidez esperada para un muro de este tipo.



Figura 4.7 Muro prototipo de madera plástica.

Capítulo 5. Conclusiones

1) A partir de la rebaba es posible producir un material mecánicamente resistente que pueda tener funciones estructurales y darle uso como sustituto de madera, es decir una madera plástica.

2) Para procesar la rebaba se tiene el siguiente proceso. Pre calentado de la rebaba a 160 °C, llenado del molde y calentamiento a 220°C hasta obtener un estado de media fusión, consistencia semi-chiclosa. Prensado a 2000 psi. La falta de cocimiento adecuado de la rebaba puede dar como resultado piezas crudas, con una consistencia esponjosa y con baja resistencia mecánica.

3) Resultados de las pruebas realizadas a la madera plástica:

- Densidad **1.15gr/cm³**
- No presenta hinchamiento ni absorción de agua.
- Tiene una resistencia de esfuerzo máximo a la tensión de **28.7 MPa**. Comparado con la madera de pino de **15.3MPa**
- Tiene una resistencia de esfuerzo máximo a la compresión de **19.85 MPa**. Comprado con la madera de pino de **4.75 MPa**
- Pruebas de inflamabilidad reprobada, es más inflamable que la madera.
- Es atornillable pero no se puede clavar manualmente, requiere de clavo neumático
- Se puede cortar con cualquier tipo de sierra.
- Se puede maquinar con herramental de corte tipo fresa, router, torno, etc.
- Es pintable

4). Se midió un consumo energético de procesamiento de 1.875 kWh/kg. Como ejemplo un barrote comercial de 2x4" y 8' consumiría 14.32 kWh , que al costo actual de energía industrial costaría 15.5 pesos. De la misma forma un panel de 4x8' en ½ " consumiría 61.31 kWh y al costo actual costaría 66.5 pesos. Estos son únicamente costos de energía y habría que agregar otro tipo de costos de producción como los costos fijos.

5) Se hizo una propuesta de aplicación de utilidad de la madera plástica, para la construcción de casas de interés social de 60m² con construcción tipo americano. se necesitarían 306 barrotos de 2x4" x 8' y 76 paneles de 4x8' y ½". Se usarían aproximadamente 10 toneladas de rebaba con un costo de energía para su procesamiento de aproximadamente \$20,325.00 pesos.

La UACJ agradece su confianza y soporte, el cual también ayuda a proveer de actividades científicas y recursos a nuestros estudiantes y profesores.



Para dudas técnicas comunicarse con el responsable del proyecto

Dr. Javier S. Castro Carmona

Email: jcastro@uacj.mx

Tel. (625) 128-17-00 ext.1992

Dirección Km 3.5 carretera Cuauhtémoc Anáhuac

Municipio de Cuauhtémoc, Chih. Mexico, C.P. 31600