



Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Faculta de Ingeniería Química

TESIS



Que para obtener el grado de:

LICENCIATURA EN INGENIERÍA QUÍMICA

Presenta:

TONATIUH TENORIO FERNÁNDEZ

Asesor Interno:
M.C. Mario Flores Rico

AGOSTO 2008

CONTENIDO

Página

1.INTRODUCCIÓN.....	1
1.1Residuos de Cultivo de maíz, como materia prima en la elaboración.....	2
de tableros experimentales	
1.1.1Cantidad y procedencia.....	2
1.1.2Emisiones a la atmosfera por la quema de los esquilmos de maíz.....	5
1.1.3Contribuciones al ambiente por el aprovechamiento.....	5
1.1.3.1Reducción de emisiones de bióxido de carbono.....	5
1.1.3.2Conservación de los recursos naturales y de la biodiversidad.....	6
1.1.3.3Puesta en práctica de políticas ambientales.....	6
1.1.4Composición química y valor nutritivo.....	6
1.1.5Usos.....	7
1.1.5.1En alimentación de bovinos de carne.....	7
1.1.5.2Vacas de lechería.....	7
1.1.5.3En alimentación de otras especies.....	8
1.2Datos relacionados con los tableros comerciales de partícula y su industria.....	8
1.3Diseño de experimentos.....	11
1.3.1Enfoque Taguchi.....	11
1.3.2Métodos recomendados por Taguchi.....	12
1.3.3Comparación entre el diseño experimental clásico y los métodos de Taguchi.....	14
1.3.4Características principales de la metodología Taguchi.....	14
2.OBJETIVOS.....	15
3.JUSTIFICACIÓN.....	15
4.DISEÑO DEL SISTEMA.....	16
4.1Variables de proceso.....	16
4.1.1Variables de entrada.....	17
4.1.1.1Presión de prensado.....	17
4.1.1.2Tiempo de prensado.....	18
4.1.1.3Temperatura de prensado.....	20
4.1.2Variables de salida.....	23
4.1.2.1Humedad del tablero.....	23
4.1.2.2Densidad del tablero.....	25
4.1.2.3Módulo de ruptura, absorción de agua e hinchamiento del	
espesor.....	26
4.1.3Variables que se mantienen constantes.....	30
4.1.3.1Tamaño de la partícula.....	30
4.1.3.2Número de capas.....	33
4.1.3.3Tipo de Partícula.....	34
4.1.3.4Densidad de la partícula.....	35

4.1.3.5	Humedad de las partícula.....	35
4.1.3.6	Adhesivo.....	36
5.	DISEÑO DE PARÁMETROS.....	38
5.1	Descripción del proceso para la obtención de tableros de partícula obtenidos del rastrojo de maíz.....	38
5.1.1	Obtención de la materia prima.....	39
5.1.2	Molienda.....	39
5.1.3	Tamizado.....	39
5.1.4	Mezclado.....	40
5.1.5	Prensado.....	41
5.1.5.1	Pre experimentación.....	42
5.1.5.2	Experimentación.....	45
5.1.5.2.1	Densidad.....	46
5.1.5.2.2	Prueba de fuerza de tensión perpendicular a la superficie o prueba de resistencia a la capa interna. Esfuerzo máximo.....	54
5.1.5.2.3	Prueba de flexión Estática. Modulo de ruptura.....	58
5.1.5.2.4	Prueba de flexión Estática. Humedad.....	60
5.1.5.2.5	Prueba de absorción de agua e hinchamiento del Espesor.....	62
6.	DISEÑO DE TOLERANCIAS.....	67
6.1	Selección de factores y/o interacciones a evaluarse.....	67
6.2	Selección de número de niveles.....	68
6.3	Selección del Arreglo Ortogonal.....	69
6.4	Asignación de factores e interacciones.....	69
6.5	Conducción del experimento.....	71
6.6	Análisis de los resultados experimentales.....	72
6.6.1	Análisis de la varianza del proceso.....	72
6.6.2	Análisis de la varianza de la media.....	76
6.7	Decisión final	78
6.8	Experimento de Confirmación.....	78
7.	VALORACIÓN ECONÓMICA.....	79
7.1	Determinación del número de tableros experimentales equivalentes a un tablero comercial.....	79
7.2	Determinación de la masa de rastrojo de maíz y adhesivo de un tablero comercial.....	80
7.3	Costo de la materia prima de un tablero de rastrojo de maiz tamaño Comercial.....	80
7.4	Costo total de un tablero de rastrojo de maíz tamaño comercial.....	81
7.5	Comparación entre los costos de un tablero de rastrojo de maíz y uno equivalente de astilla de madera.....	82

8.CONCLUSIONES.....	83
9.BIBLIOGRAFÍA.....	87
ANEXO I.....	89
ANEXO II.....	90

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, la industria de los paneles está dedicada a la producción de los contrachapados y los aglomerados de partículas o de fibras de madera. Inicialmente, la elaboración de estos productos se concibió como aprovechamiento de los desperdicios que arrojaban tanto las industrias muebleras como los aserríos, sin embargo esta idea ha sido poco considerada pues en ocasiones se emplean trozos de madera para astillarlos y producir los aglomerados, provocando con esto que en la actualidad, la industria enfrente serios problemas de abastecimiento, ya que los volúmenes cortables de madera han disminuido significativamente al decrecer los recursos boscosos del país.

La solución a estos problemas impulsa a buscar nuevos materiales aglomerables, en volúmenes suficientes y con las características necesarias que les permitan ser trabajados en la elaboración de productos, que compitan en el mercado con los actualmente utilizados.

Una materia prima que podría satisfacer las características de un material aglomerable es el rastrojo de maíz¹, en la actualidad algunos agricultores continúan practicando la quema de estos materiales, ya que el costo que se paga por los trabajos relacionados con el empacado y el retiro del material de las tierras de cultivo suele no recuperarse por la venta de las pacas de rastrojo, el factor tiempo interviene también de manera importante en las parcelas en las que se practican dos cultivos por año, resultando la quema un medio para acelerar el proceso y disminuir el periodo entre siembra y siembra.

Por tanto, el no tener un valor económico alto y una disponibilidad apropiada, el rastrojo de maíz, se le considera, en este trabajo, un material apropiado para producir tableros de partícula, que pueda retomar la idea original con la que se desarrolló la industria de los paneles elaborados con residuos de los aserríos.

1. Rastrojo de maíz.- residuo que queda en el campo de los cereales maduros segados

1.1 Residuos² experimentales del cultivo de maíz como materia prima en la elaboración de tableros

1.1.1 Cantidad y procedencia

El cultivo de maíz genera una gran cantidad de biomasa aérea (vegetación), de la cual el hombre cosecha el 50% en forma de grano, el resto corresponde a diversas estructuras de la planta tales como caña, hojas, panoja³ y otras. La producción de biomasa residual que genera el maíz de grano (cañas, hojas y olotes) fluctúa entre 20 y 25 t/ha (Manterota, 1999).

La proporción entre los componentes del residuo depende de la variedad, nivel de fertilización, tipo de cultivo y otros factores, pero en promedio se ajusta a los porcentajes que se presentan en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1 Proporción de los diferentes componentes de una planta de maíz

Estructura de la planta	Masa en % (base seca)
Panoja	12.0
Tallos	17.6
Hojas	8.9
Total caña	38.5
Olote	11.8
Grano	49.7
Total fruto	61.5
Total planta	100

De acuerdo con la información difundida por el INEGI en su Inventario de Agricultura para el estado de Michoacán, Tabla 1.2, en el ciclo agrícola 2006, del Municipio de Álvaro Obregón, se cosechó un total de 6 055 ha de maíz del que 4 427 ha fueron de riego y 1 628 ha de temporal, extensión cultivada que lo situó en el quinto lugar de la tabla y que le produjo una cantidad total de 46 205 t de grano, 41 912 t de riego y 4 293 t de temporal, con rendimientos de 7.6, 9.5 y 6.8 t/ ha, respectivamente, alrededor de dos veces más que la media estatal, y colocándolo en tercer lugar, sólo después de Santa Ana Maya e Indaparapeo con rendimientos totales de 9,3 y 8.3 t/ha, respectivamente.

2. Material o producto cuyo propietario o poseedor desecha y que puede ser susceptible de ser valorizado o requiere sujetarse a tratamiento o disposición final... Artículo 5, Fracción XXIX de la Ley General para la Prevención y la Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR).

3. Panoja.- Fruto del cultivo de maíz.

Aprovechamiento de los residuos agrícolas del municipio de Álvaro Obregón en la elaboración de paneles para la construcción

El hecho de que el Municipio de Álvaro Obregón se destaque a nivel estatal tanto por la extensión de tierra dedicada a la siembra de maíz como, por la rentabilidad del cultivo, en este trabajo, se seleccionó como un proveedor potencial de la materia prima para la elaboración de los tableros experimentales.

Tabla 1.2 Superficie y cantidad de maíz en grano cosechado en el año agrícola 2006, en el Estado.

Municipio	Superficie cosechada, ha			Cantidad de maíz en grano cosechado, t		
	Total	Riego	Temporal	Total	Riego	Temporal
Vista Hermosa	10 459	6 434	4 025	63 488	46 429	17 059
Morelia	16 063	1 056	15 006	45 560	6 666	38 894
Purúndiro	9 998	1 593	8 405	52 151	11 725	40 426
Maravatío	17 491	6 834	10 657	60 143	28 756	31 388
Álvaro Obregón	6 055	4 427	1 628	46 205	41 912	4 293
Zacapu	10 105	5 898	4 208	47 809	31 021	16 788
Indaparapeo	4 762	3 776	986	39 375	35 746	3 629
Tarímbaro	4 667	2 816	1 851	33 478	26 664	6 814
Contepec	8 062	3 059	5 002	34 995	19 221	15 774
José Sixto Verduz	4 439	3 525	914	29 682	25 944	3 738
Zamora	4 711	794	3 917	28 612	7 933	20 678
Jiménez	6 302	3 221	3 080	27 479	16 944	10 535
Santa Ana Maya	2 746	2 200	546	25 414	20 831	4 583
Zinapécuaro	4 577	880	3 697	22 405	8 795	13 610
Tanahuato	3 959	1 056	2 903	22 924	9 600	13 324
Queréndaro	3 433	880	2 552	19 813	9 073	10 740
Epitafio Huerta	5 946	3 115	2 831	28 855	19 603	9 252
La Huacana	5 179	365	4 814	16 163	998	15 165
Charo	3 899	1 619	2 280	19 623	13 628	5 995
Penjamillo	5 109	440	4 669	20 322	3 701	16 621
Madero	7 376	290	7 085	16 739	1 833	14 906
Pajacuarán	7 515	2 464	5 051	34 221	13 209	21 011
Hidalgo	7 965	1 848	6 117	28 052	8 749	19 303
Turicato	7 270	67	7 203	22 866	261	22 604
Ixtlán	2 730	613	2 118	17 734	5 928	11 806
Tacámbaro	3 169	0	3 169	9 981	0	9 981
Angamacutiro	2 505	1 328	1 178	14 941	9 771	5 170
Coalcomán	7 411	172	7 239	14 900	310	14 590
Zitácuaro	7 285	68	7 217	17 682	221	17 461
Chavinda	2 274	489	1 785	14 463	4 324	10 139
Ecuandurio	2 079	482	1 597	13 061	4 312	8 749
Coeneo	3 593	1 656	1 936	14 057	8 713	5 344
Aguililla	6 985	39	6 946	12 876	62	12 813
Senguio	4 536	2 917	1 619	15 508	10 739	4 770
Arteaga	5 325	0	5 325	7 842	0	7 842
Tangancícuaro	2 781	554	2 227	11 696	4 666	7 030
Villamar	4 346	775	3 571	19 505	4 043	15 462
Venustiano C.	3 922	959	2 963	17 511	5 037	12 474

Aprovechamiento de los residuos agrícolas del municipio de Álvaro Obregón en la elaboración de paneles para la construcción

Municipio	Superficie cosechada, ha			Cantidad de maíz en grano cosechado, t		
	Total	Riego	Temporal	Total	Riego	Temporal
La Piedad	2 608	352	2 256	11 107	2 774	8 332
Los Reyes	3 566	0	3 566	7 503	0	7 503
San Lucas	3 429	260	3 169	11 039	1 040	9 999
Yurécuaro	2 040	572	1 468	10 362	4 811	5 550
Resto de los Mpio	153 575	17 700	135 875	377 412	71 899	305 512
TOTAL	392 247	87 597	304 650	1 405 551	547 893	857 658

De acuerdo con la información presentada en las Tablas 1.1 y 1.2, se puede calcular que en el ciclo agrícola 2006, se quedaron en el terreno de cultivo de maíz, del Municipio de Álvaro Obregón, 45 654 t de residuos susceptibles de ser aprovechados, en el mejor de los casos estos pudieron haberse acordonado, empaquetado y ser utilizados como alimento para ganado, sin embargo, las observaciones hechas en campo, sin haber realizado el inventario correspondiente, indican que esto no fue así, y una parte, se desperdiciaron quemándolos.

La materia prima que se utilizó en este trabajo se obtuvo de los residuos de la cosecha otoño- invierno 2007-2008, de la parcela ubicada en la comunidad El Zapote, Municipio de Álvaro Obregón, coordenadas geográficas 19° 50' 10" dirección Norte y 101° 00' 40" dirección oeste, Fgura 1.1, en ésta se sembraron 8 ha de maíz blanco, de las que se cosecharon 72 toneladas de grano y se generaron otro tanto de esquilmos⁴.

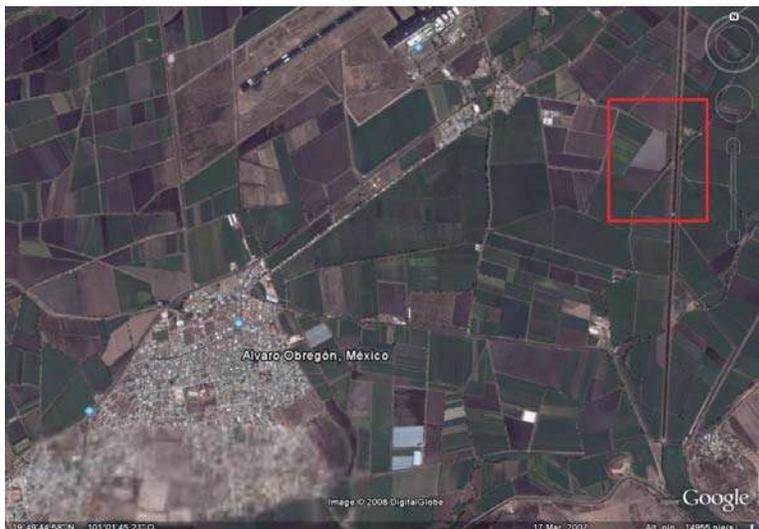


Figura 1.1

4. Esquilmos.- provechos accesorios de menor cuantía que se obtienen del cultivo o de la ganadería.

1.1.2 Emisiones a la atmósfera por la quema de los esquilmos de maíz

De acuerdo con el contenido de carbono de la muestra de esquilmos molidos y mezclados, 34.8 % -determinación analítica que fue realizada en un laboratorio, de la localidad, certificado ante la Entidad Mexicana de Acreditación (EMA), el resultado del análisis fisicoquímico se presenta en el Anexo I- se calcula que la emisión de CO₂ a la atmósfera por la quema del total de los residuos agrícolas del cultivo de maíz en el Municipio de Álvaro Obregón, 45 654 t, sería de 58 255 t.

1.1.3 Contribuciones al ambiente por el aprovechamiento⁵

1.1.3.1 Reducciones de emisiones de bióxido de carbono

De forma general, el aprovechamiento de los esquilmos revaloraría los residuos y quizá, se abandonaría la práctica de la quema, evitándose con esto la emisión a la atmósfera de una cantidad considerable de bióxido de carbono, CO₂, la contribución del trabajo de esta tesis es demostrar, a nivel laboratorio, que técnicamente es factible aprovecharlos en la elaboración de tableros y dar la pauta para continuar con investigaciones en este sentido como el propio proyecto de fabricación y comercialización del producto que bien podría ser considerado como un proyecto de Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL⁶) porque cumple con las características de :

- ✓ reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI⁷).
- ✓ definición del ámbito en el cual ocurre la reducción o secuestro de GEI.
- ✓ adicionalidad, las reducciones de las emisiones de GEI generadas en el proyecto deben ser menores a las emisiones que hubieran ocurrido en ausencia del mismo.
- ✓ implementación posible, solamente a través del mecanismo MDL.
- ✓ contribución al desarrollo sustentable del país.

La característica de adicionalidad es muy importante en la definición de un proyecto MDL, y para esta idea de proyecto la cumpliría, ya que en el proceso de la producción de tableros no se emitiría directamente CO₂, así mismo, la aportación al desarrollo sustentable estaría enfocada a criterios ambientales.

5. Aprovechamiento de los Residuos: Conjunto de acciones cuyo objetivo es recuperar el valor económico de los residuos mediante su reutilización, remanufactura, rediseño, reciclado y recuperación de materiales secundados o de energía; Fracción II, Artículo 5, LGPGIR.

6. MDL.- Instrumento internacional derivado del Protocolo de Kyoto para ayudar a los países en vías de desarrollo a lograr un desarrollo sustentable, así como ayudar a los países desarrollados a dar cumplimiento a sus compromisos cuantificados de limitación y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero durante el período 2008-2012 tomando como base los niveles de emisión del año 1990.

7. GEI: bióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hidrofluorocarbonados (HFC's), pentafluorocarbonados (PFC's) y hexafluoruro de azufre (SF₆).

1.1.3.2 Conservación de los recursos naturales y de la biodiversidad

Otra aportación al desarrollo sustentable –desde un punto de vista ecológico- de la idea de proyecto que se vislumbra de los resultados de este trabajo, sería la conservación de los recursos forestales al utilizar los esquilmos y dejar de consumir madera para la elaboración de los paneles, aparejado a la conservación del bosque viene la de la biodiversidad.

1.1.3.3 Puesta en práctica de políticas ambientales

Al reciclar los esquilmos de maíz se estaría aplicando la normativa ambiental relacionada con la disposición de los residuos agrícolas, la cual los clasifica en la Fracción III del Artículo 19 de la Ley General para la Prevención y la Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) como residuos de manejo especial y por tanto su manejo requeriría de un Plan⁸ de acuerdo con la Fracción XXI Artículo 15 de la LGPGIR.

1.1.4 Composición química y valor nutritivo

Por ser el rastrojo de maíz, un alimento para ganado, único aprovechamiento actual del residuo, conviene considerar algunos aspectos que pudieran, en su momento ejercer presión en el abasto del alimento y quizá una percepción social negativa del proyecto, que en la evaluación del mismo tendría que ser contemplada.

La composición química indica que el rastrojo de maíz es bajo en materias nitrogenadas (4.5% de proteína bruta promedio). La pared celular presenta un mayor porcentaje de hemicelulosa que de celulosa. Su bajo porcentaje de lignina lo hace ser más digestible que las pajas de cereales, siendo así mismo más rico en azúcares solubles que éstas. Por esta razón este residuo presenta un valor energético superior al de las pajas de cereales, fluctuando entre 7.2 y 9 MJ/kg de materia seca (Manterota, 1999).

8.- Instrumento cuyo objetivo es minimizar la generación y maximizar la valorización de residuos sólidos urbanos, residuos de manejo especial y residuos peligrosos específicos, bajo criterios de eficiencia ambiental, tecnológica, económica y social, con fundamento en el Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de Residuos, diseñado bajo los principios de responsabilidad compartida y manejo integral, que considera el conjunto de acciones, procedimientos y medios viables e involucra a productores, importadores, exportadores, distribuidores, comerciantes, consumidores, usuarios de subproductos y grandes generadores de residuos, según corresponda, así como a los tres niveles de gobierno;

La tasa de degradación de la materia seca a nivel ruminal es baja y lenta, alcanzando niveles de 22%, lo que afecta el consumo.

1.1.5 Usos

Aun cuando toda la vegetación producida en este cultivo es alta, en el caso de la cosecha mecanizada, un porcentaje importante de los componentes no se puede colectar, ya que quedan muy trozados; sin embargo se puede utilizar directamente con animales a pastoreo. Se estima que al pastorear un rastrojo de maíz con bovinos, se pierde entre un 50% y 70%, pudiéndose mantener 1.5 unidades animales por hectárea durante 90 – 100 días.

1.1.5.1 En alimentación de bovinos de carne

El rastrojo del maíz puede utilizarse en casi todas las categorías de vacunos de carne, a excepción de los terneros recién destetados. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que es un recurso fibroso, con bajo contenido de proteínas y aportes limitados de energía. Al ser utilizados en pastoreo directo, podrá usarse durante un corto período antes de arar la tierra para el siguiente cultivo.

Al cosechar el rastrojo de maíz, éste puede incluirse en raciones de novillos en niveles que pueden fluctuar entre 20 y 60%, dependiendo de la calidad del rastrojo y de los otros componentes de la dieta. Al incluir entre 20 y 30% de caña de maíz, se pueden obtener ganancias entre 800 y 900 gramos por día, g/d, siempre que ésta se ofrezca trozada. Al incluirla en niveles de 60%, las ganancias de peso bajan a 500-650 g/d. En vaquillas de reemplazo puede usarse en niveles de 60%, obteniéndose ganancias de peso de 500 g/d.

1.1.5.2 Vacas de lechería

El rastrojo de maíz puede ser pastoreado directamente por vacas lecheras siempre que éstas, estén secas o tengan producciones inferiores a 15 l/d. Al ser cosechado, debe ofrecerse picado a fin de disminuir los rechazos. En este caso, puede incluirse en niveles de 20-30% en raciones de vacas lecheras que produzcan 18-20 l/d, teniendo la ventaja de

aportar la fibra necesaria para el funcionamiento del rumen y manutención de la materia grasa de la leche, especialmente cuando las vacas reciben cantidades altas de concentrado.

1.1.5.3 En alimentación de otras especies

El uso directo del rastrojo está reservado más bien a vacunos, ya que dado el grosor de los tallos, los ovinos y caprinos no pueden aprovechar bien este recurso, debiendo trozarse, pero aun así habrá un alto porcentaje de rechazo.

Otros animales en donde puede ser recomendable como alimento es en los equinos y los asnales.

1.2 Datos relacionados con los tableros comerciales de partícula y su industria

El campo de los tableros aglomerados apareció hace aproximadamente unas ocho décadas. Henry Wattson de los Estados Unidos, en 1905, en Paraíso Indiana, registró la primera patente de fabricación de tableros aglomerados después de varios años de investigación. El principal problema para este investigador se centraba en localizar un adhesivo efectivo y redituable en calidad y en costo. Después de aproximadamente 25 años, se utilizaron resinas fraguadas térmicamente, no con mucho éxito al principio, sin embargo, en la ciudad de Bremen en Alemania en 1940, se instaló la primera industria productora de tableros aglomerados que utilizó resinas sintéticas (Sámano Sánchez, 1988).

La segunda guerra mundial retrasó el avance en el desarrollo de esta industria debido, principalmente, a la escasez de pegamentos que entonces se utilizaron para la fabricación de artefactos de guerra. A mediados de los años 40's, en la postguerra, esta industria recibió un gran impulso y se desarrolló grandemente, en los Estados Unidos y en varios países europeos.

Los procesos más utilizados para la fabricación de tableros aglomerados son:

Aprovechamiento de los residuos agrícolas del municipio de Álvaro Obregón en la elaboración de paneles para la construcción

- Proceso intermitente
- Proceso continuo bajo el sistema de extrusión

Siendo el proceso intermitente, el que se lleva a cabo en el 95% de las plantas productoras de tableros.

Los dos sistemas consideran básicamente, los siguientes pasos:

- Transformación de la madera sólida, en sus diferentes formas, astilla clasificada en tamaño y forma. Las máquinas que se utilizan para este fin se conocen como astilladoras o molinos de martillos.
- Secado de las partículas al contenido de humedad deseado.
- Clasificación de las partículas en gruesas y finas mediante un cribado.
- Encolado de las partículas, que consiste en la mezcla con determinada cantidad de adhesivo y de aditivos mediante el método de roseado u otro similar. Los adhesivos más comúnmente utilizados son la urea-formaldehido y el fenol-formaldehido, el primero, se utiliza para tableros destinados a interiores y el segundo para exteriores.
- Acomodo de las partículas en el panel, puede ser controlado, de tal manera que las partículas de mayor tamaño pueden estar ubicadas en el centro del tablero, mientras que los finos pueden depositarse cerca de la superficie, al azar produciendo tableros con características homogéneas.
- Consolidado del material bajo el control de calor, tiempo y presión. Estos factores pueden ser regulados para obtener un tablero con las características deseadas.
- Acondicionamiento, dimensionado y regulación de contenido de humedad.
- Lijado, este paso mejora la presentación y el acabado del tablero, al mismo tiempo que estandariza su espesor.

Según el mercado, al tablero se le pueden dar diferentes acabados: Perfilado, Acanalado, Rayado, Perforado o bien, Enchapado.

En los últimos años se han creado otros tipos de tableros aglomerados, tales como los de hojuela grande de una capa, los de viruta larga de fibra orientada (ver apartado 4.1.3.3), de una o tres capas y los de madera y cemento.

En general, se puede decir que los tableros aglomerados tienden a sustituir en gran parte a la madera aserrada en la fabricación de muebles y otros usos como puertas, pisos, entre pisos, techos, etc., son adecuados para chapeado, laqueado y pintado, se aplican en exteriores como paredes, protecciones de cubiertas, etc. y se encuentran en el mercado en las dimensiones nominales mostradas en la Tabla 1.3.

Tabla 1.3 Dimensiones nominales de los tableros comerciales

Dimensión	Medidas nominales	Tolerancias
Espesor, mm	2, 3, 4.5, 5.5, 7.5, 9, 10, 10.5, 12, 14, 16, 17.5, 19, 21, 25, 30 y 38	± 0.4
Ancho, m	0.91, 1.22 y 1.83	± 1.6
Largo, m	1.83, 2.44, 3.05, 3.66, 4.27, 4.88 y 7.32	± 1.6

Los principales tableros de partículas que se conocen en el mercado son:

- Tableros de partículas de baja densidad (hasta un máximo de 0.49 g/cm^3).
- Tableros de partículas de Densidad Media (de 0.4 a 0.69 g/cm^3).

De estos tipos, el de mayor producción en el país es el tablero de partículas de densidad Media, el cual se clasifica de la siguiente manera:

- Por su construcción en:
 - Tableros de una capa uniforme.
 - Tableros de tres capas, con partículas gruesas en el exterior.
 - Tableros de una capa graduada, con las partículas gruesas en el centro y las finas en el exterior.
 - Tableros de tres capas con partículas finas en el exterior.
- Por su sistema de compactación:
 - Prensado con planchas.
 - Prensado con rodillos calientes.

- Prensado con cadenas.
- Sistema de extrusión.

De estos sistemas, los primeros tres se usan en México actualmente, y el último se utilizó hasta 1963.

1.3 Diseño de Experimentos

Ahora que se ha dado una idea general de lo que se pretende con este trabajo y que se han proporcionado datos sobre la disponibilidad del rastrojo de maíz en la zona del Valle de Álvaro Obregón, Se procede a dar información sobre el diseño y la conducción de la experimentación de la investigación así como las ventajas de la metodología seleccionada.

El diseño de experimentos ha existido desde los años 30's, los enfoques experimentales previos consideraban todos los factores como causa de variación. Si estas causas pudieran estar bien controladas o eliminadas, entonces la variación del producto o del proceso se reduciría, y por lo tanto, se mejoraría la calidad. Pero si por ejemplo, un producto fuera sensible a la temperatura ambiente ¿cómo pudiera alguien controlar o eliminar la temperatura en un entorno caliente? La respuesta sería obvia; las variaciones de la temperatura ambiental ni se pueden controlar ni se pueden eliminar, a menos que se efectúe un gasto económico considerable, se requiere por lo tanto, un enfoque diferente si se va a mejorar la calidad del producto, este enfoque es nombrado por Taguchi como diseño de parámetros.

El diseño de parámetros, se utiliza para mejorar la calidad sin controlar o eliminar las causas de la variación, ya que esto podría dar un costo elevado comparado con un enfoque de diseño de parámetros.

1.3.1 Enfoque Taguchi

Taguchi propone tres etapas para el diseño de un producto o de un proceso, las cuales se basan en lo siguiente:

a) Diseño del sistema

El diseño del sistema es la fase donde se generan nuevos conceptos, ideas, métodos, etc. para proporcionar a los consumidores productos nuevos y mejorados.

En esta etapa se determina la distribución de los componentes del sistema, es decir, en esta parte se determinan los materiales, la distribución del proceso y sus componentes.

b) Diseño de parámetros

Esta fase es crucial para mejorar la uniformidad de un producto y se puede hacer sin costo alguno o aún con ahorros. Esto significa que se establecen ciertos parámetros del diseño de un producto o de un proceso para hacer el desempeño menos sensible a las causas de variación.

c) Diseño de las tolerancias

La fase de diseño de tolerancia mejora la calidad a un costo mínimo. La calidad se mejora cerrando las tolerancias de los parámetros de un producto o proceso para reducir la variación del desempeño. Esto se hace solamente, después del diseño de parámetros.

1.3.2 Métodos recomendados por Taguchi.

Taguchi divide los factores de un experimento, se deben considerar los tipos de factores de diseño y de desarrollo y Taguchi los separa en dos grupos principales:

- ✓ Factores de control o controlables
- ✓ Factores de ruido

Los factores de control son aquellos que establece el fabricante y no los puede cambiar directamente el consumidor, por ejemplo un fabricante de motores puede dictar el material para los pistones, la tensión en los anillos del pistón, la tolerancia del cilindro del pistón,

etc., los cuales no pueden ser modificados por el cliente, claro que llegan a existir personas fanáticas a los arranques que realizan sus cambios muy a menudo, tal vez sacrificando la durabilidad.

Los factores de ruido son aquellos sobre los cuales el fabricante no tiene control directo, pero que varían con el entorno del usuario y del uso. De una manera general podemos decir que son aquellos que el productor desea no tener que controlar del todo.

Los factores de ruido se pueden clasificar en tres categorías:

a) Ruido externo

Los ruidos externos son factores ambientales, tales como la temperatura, la humedad, la presión, etc.

b) Ruido interno

Los ruidos internos están relacionados con la función y el tiempo, tales como el deterioro, el desgaste, la decoloración, el encogimiento, etc.

c) Ruido del producto

El ruido de un producto se manifiesta por sí mismo, en la variación de una pieza a otra.

Los productos pueden ser sensibles a las tres formas de ruido, simultáneamente.

Taguchi se refiere a los esfuerzos de calidad del diseño como control de calidad en línea, que es cualquier actividad de diseño y de desarrollo que puede tomar lugar antes de que se fabriquen los productos.

Taguchi ha creado una transformación de datos de la repetición, a otro valor, la cual es una medida de la variación presente. La transformación es la razón señal-ruido. La razón señal-ruido consolida varias repeticiones (se requieren al menos dos datos) es un valor

que refleja la cantidad de variaciones presentes. Existe varias razones señal-ruido disponibles dependiendo del tipo de medidas de desempeño:

- ✓ Menor es mejor
- ✓ Nominal es mejor
- ✓ Mayor es mejor

Uno de los mejores desafíos para Taguchi consistía en cómo medir la robustez, ya que si se logra hacerlo se podría desarrollar tecnologías a prueba de ruido, Taguchi mide la robustez con la relación señal-ruido. Mientras más robusta es una tecnología, más fuerte es la señal que emite contra cualquier ruido externo que trate de inhibir la señal.

1.3.3 Comparación entre el diseño experimental clásico y el método de Taguchi

Ambos casos ayudan a optimizar procesos que tienen entradas controlables y salidas medibles, la diferencia principal radica en que se manejan de manera distinta las interacciones entre los factores de entrada. El diseño experimental clásico, prueba con todas las combinaciones de niveles de entrada o una parte simétrica, a diferencia de la metodología Taguchi que trabaja con una pequeña parte de las posibles combinaciones de factores de entrada.

1.3.4 Características principales de la metodología de Taguchi para diseño de experimentos

- antepone que los usuarios no conocen a profundidad como se lleva a cabo el proceso que se encuentra en estudio.
- Fue inventada por científicos para científicos.
- Infiere que todas las entradas interactúan entre sí, de tal manera que cuando no se tiene claridad de cuáles son las interacciones que son relevantes, el diseño experimental vendría a ser la opción más conveniente.

Por lo antes dicho, para la conducción y diseño de la experimentación en la investigación de este trabajo se usa la metodología Taguchi.

2 OBJETIVOS

- Demostrar que el aprovechamiento de los residuos agrícolas en tableros para la construcción de muebles es técnicamente, factible.
- Revalorizar los esquilmos.
- Contribuir con la disminución de la contaminación ambiental al evitar la quema de los residuos agrícolas y con la preservación de los recursos naturales al dejar de utilizar la madera como principal fuente de producción de tableros.

3 JUSTIFICACIÓN

Los esquilmos de la cosecha de los granos se aprovechan como alimento para el ganado, sin embargo esta decisión requiere de la utilización de maquinaria y mano de obra que realice las actividades de: desvarar, acordonar, empaquetar y trasladar las pacas a un sitio fuera del área de cultivo. Actualmente, el costo de estas actividades y el tiempo que se emplea en éstas, en la mayoría de los casos no se compensa con el ingreso que se obtiene por la venta de las pacas. De ahí que, se haya convertido en una práctica emergente, la quema de los residuos de la cosecha como una medida que conduce rápidamente, a la preparación de la tierra para el siguiente ciclo agrícola.

La escasez de madera y el fuerte impacto ambiental, que se hace por la tala inmoderada y por la explotación de recursos maderables, concibió la creación de tableros de partículas con la idea de aprovechar los residuos de las industrias muebleras y aserríos, sin embargo el incremento en la producción ha tenido como consecuencia el desabastecimiento y la necesidad de usar madera, perdiendo el fin benéfico para el cual fueron creados los tableros de partícula.

En virtud de lo anterior, el desarrollo de esta investigación pretende encontrar otros mecanismos de aprovechamiento para los residuos agrícolas más redituables para el agricultor y el medio ambiente.

4 DISEÑO DEL SISTEMA

El enfoque Taguchi en la etapa del diseño del sistema se aplicó a la fase de prensado con temperatura, en la figura 4.1 se presentan la distribución del proceso y sus componentes.

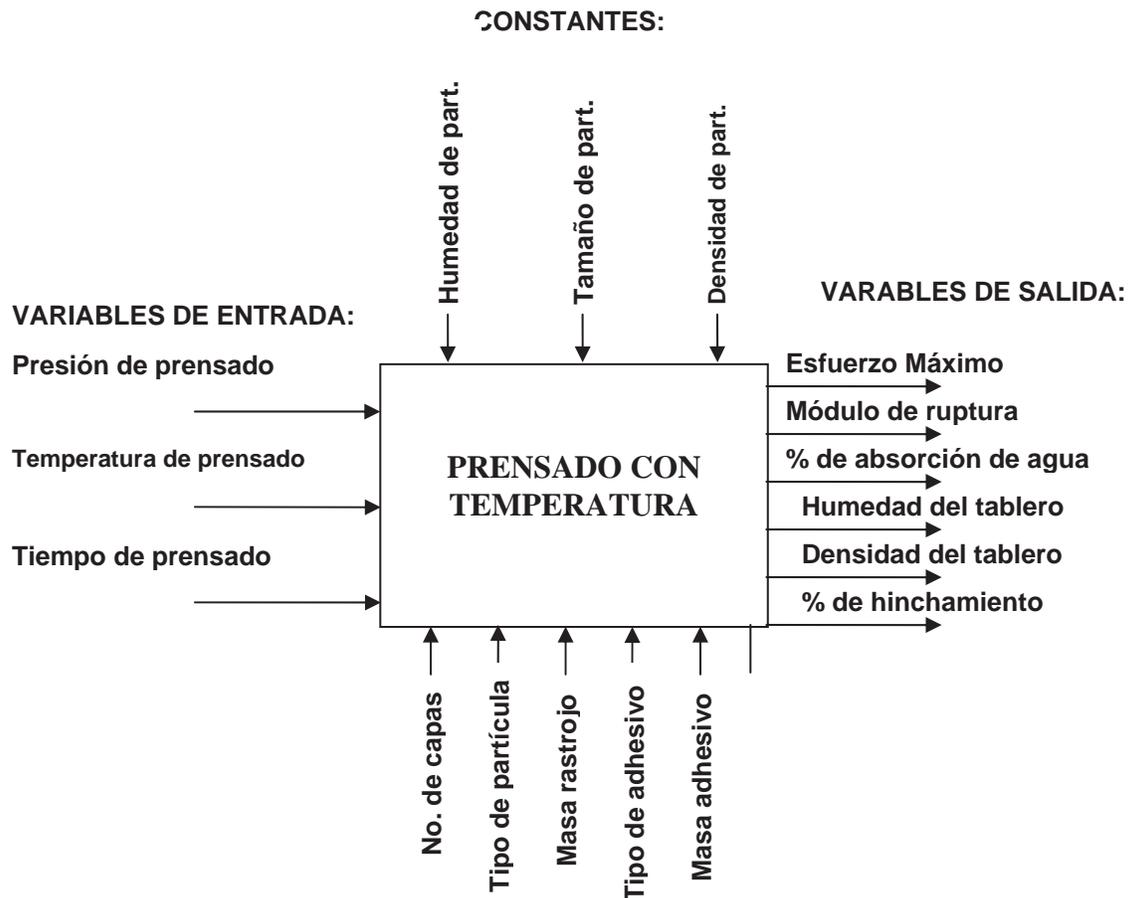


Figura 4.1 Diseño del sistema

4.1 Variables del proceso

En este apartado se presenta la relación de las variables descritas en la literatura especializada en la elaboración de tableros de astilla de madera con la finalidad de hacer más claro el alcance de este trabajo.

4.1.1 Variables de entrada

4.1.1.1 Presión de prensado

La presión que se aplica en el prensado con temperatura afecta a: el área de contacto entre partícula y partícula; la densidad del panel o tablero; el comportamiento de la compresión de la cama; el control del espesor del tablero; el espesor del adhesivo en las capas y; la extensión del adhesivo entre las superficies de las partícula en contacto.

En la Figura 4.2 se muestra de manera cualitativa, la relación que se presenta entre el área de contacto y la presión, bajo tres condiciones diferentes: altas, medias y bajas cantidades de adhesivo. A medida que la presión se incrementa, el área de contacto también aumenta, requiriéndose un incremento de presión considerablemente mayor, para las superficies con poco adhesivo, en comparación con aquéllas, con gran cantidad de éste.

A presiones altas, se producen tableros de altas densidades sin embargo, el excesivo aplastamiento de las partículas puede generar un deterioro en el espesor del tablero

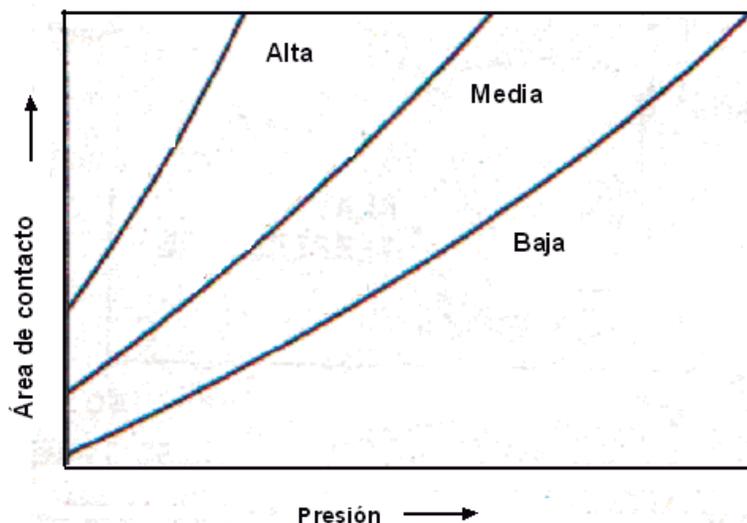


Figura 4.2 Relación área de contacto entre partículas y presión de prensado

4.1.1.2 Tiempo de prensado

En general, es una variable de las de mayor interés, ya que es alta y significativa su influencia en las propiedades de los tableros, tales como: la densidad, el control del espesor, la apariencia de las superficies y la durabilidad.

Además de la influencia en la calidad del tablero, el tiempo de prensado tiene un valor económico de suma importancia. Cualquier reducción en el tiempo requerido para prensar la cama y consolidarla como tablero significará un aumento en el nivel de producción y una reducción en el costo.

Todas la demás variable del material en bruto y de la manufactura pueden ser mantenidas constantes con excepción del tiempo de prensado.

Cuando el tiempo de prensado T_3 , es breve (alta presión de prensado inicial, Figura 4.3), las superficies llegan a ser densas, mientras la capa central tiene bajo nivel de densidad. De manera contraria, cuando se tiene tiempos de prensado prolongados (baja presión de prensado inicial) se obtiene una densidad cerca al promedio.

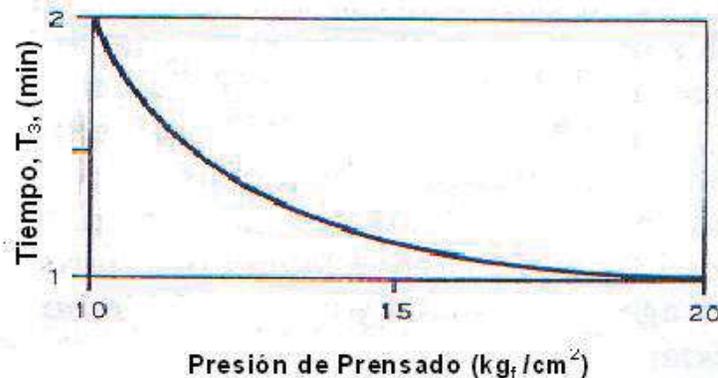


Figura 4.3 Relación tiempo de prensado y presión de prensado

La relación presión- tiempo varía significativamente de acuerdo con el proceso de elaboración de los tableros. Los esquemas A, B y C de la Figura 4.4, muestran tres formas diferentes de mantener la presión de prensado, con y sin rampas de presión.

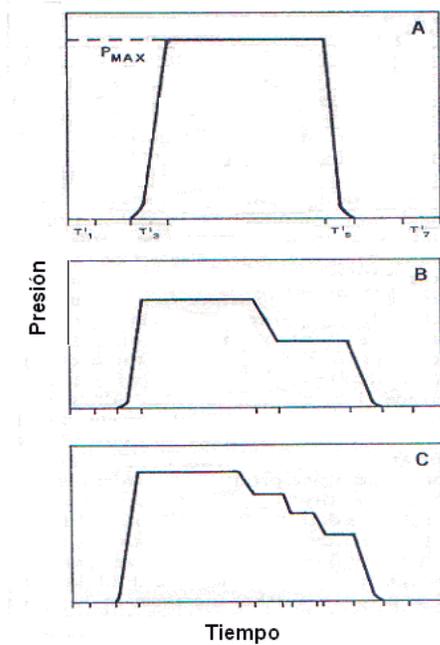


Figura 4.4 Relación presión-tiempo

De acuerdo con las características de operación de la prensa utilizada, en este trabajo se siguió el procedimiento representado por el diagrama A, el que se describe a continuación:

- T_1 .- Es el tiempo que se emplea en la preparación de la cama.
- T_2 .- Representa el periodo en el que se reduce el espacio entre los platos de la prensa y se establece el contacto entre ambos.
- T_3 .- Tiempo, en el que la presión de prensado se incrementa hasta alcanza un valor máximo.
- T_4 .- Intervalo en el que la presión máxima de prensado se mantiene constante.
- T_5 .- Cuando la polimerización de la resina ha terminado, se baja la presión hasta el valor mínimo, cero. Este periodo de caída de presión no necesariamente, es igual al tiempo, T_3 .
- T_6 .- Una vez alcanzado el valor de cero, la prensa se abre completamente para facilitar la remoción del tablero.
- T_7 .- Tiempo que transcurre en sacar el tablero de la prensa.

4.1.1.3 Temperatura de prensado

Una de las principales funciones del prensado con temperatura es la aplicación de calor para que los adhesivos termo sintéticos puedan ser rápidamente polimerizados. El nivel de calor requerido depende, del tipo de adhesivo, del material en bruto y de los parámetros de prensado. En las primeras épocas del desarrollo de los tableros, las resinas requerían de relativamente bajos niveles de calor y prolongados tiempos de prensado (15 minutos o más). Para disminuir los tiempos de prensado e incrementar la producción, se buscaron nuevas resinas que pudieran funcionar a altas temperaturas.

La aplicación de calor en el prensado con temperatura, además de la resina polimerizadora, tiene un papel muy significativo. El suministro de calor hasta obtener altas temperaturas y partículas más flexibles, reduce la fuerza de compresión del tablero. En muchos estudios se ha podido observar que durante la compresión a temperaturas y humedades altas se producen flujos plásticos (Moslemi,1974.)

La Figura 4.5, muestra los resultados obtenidos por Moslemi (1974) en la elaboración de tableros de astilla de madera a dos diferentes presiones (10 y 15 kgf/cm²) y con dos temperaturas en los platos (175 y 210 °C). En ésta se observa la variación de la temperatura en la capa central de la cama en función del tiempo de compresión así como, la forma en la que la temperatura en la capa central del tablero se alcanza hasta cierto punto, donde se mantiene prácticamente constante, más rápidamente a medida que la presión y la temperatura de los platos es mayor.

El calor no solo propicia la polimerización del adhesivo, en realidad, inicialmente, reduce su viscosidad, permitiéndole fluir y entrar en contacto con las partículas. En este periodo inicial, la tensión superficial del adhesivo se reduce y se facilita la

hidratación de las superficies de las partículas vecinas. El calor también remueve el agua y los solventes de los adhesivos por evaporación, difusión o por movimientos capilares.

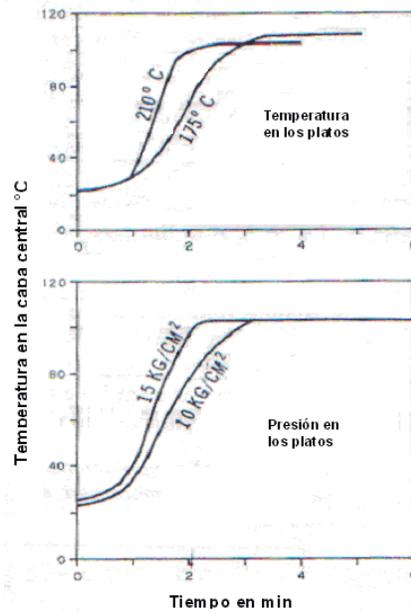


Figura 4.5 Relación Temperatura en la capa central y tiempo de prensado

Así mismo Kehr y Schoelzel (1968)(tomado de Moslemi,1974), estudiaron la variación de la temperatura de las superficies y de las capas centrales de la cama en función del tiempo dividido en cinco intervalos, los resultados se muestran esquemáticamente, en la Figura 4.6.

T₁.- Es el tiempo durante el cual la temperatura de las superficies aumenta rápidamente mientras la temperatura en la capa central permanece constante.

T₂.- Al inicio de este intervalo, la temperatura de la capa central empieza a aumentar y así continúa hasta la visible evaporación. El incremento de la temperatura en la capa central es considerable, mientras que la de la superficie es apenas perceptible.

T₃.- La evaporación comienza al inicio de este periodo y continúa hasta que el punto de ebullición del agua se alcanza en la capa central.

T₄.- Durante este tiempo, la temperatura permanece constante, mientras el agua se evapora y subsecuentemente, se expulsa de la cama prensada. La temperatura no se mantendrá constante si el vapor no se expulsa rápidamente.

T₅.- Como el suministro de calor continúa, se presenta un pequeño aumento de temperatura en la capa central hasta cerca del punto de ebullición del agua a la temperatura del plato en el final del prensado.

De forma general, se puede decir que el tiempo de prensado en la manufactura de los tableros de partícula se puede reducir, si: el incremento de la temperatura en el tiempo, T₂, se hace tan grande como sea posible y el correspondiente al tiempo, T₁, tan pequeño como sea factible.

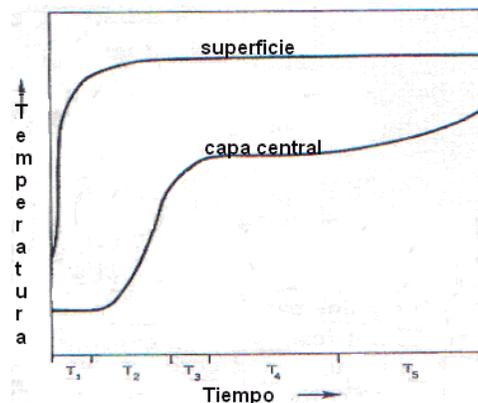


Figura 4.6 Relación temperatura-tiempo

La Figura 4.7 indica por una parte el efecto que produce el contenido de humedad en la presión, un decremento en la presión máxima requerida para la consolidación del material significa un incremento en el contenido de humedad y por otra parte, el efecto de la presión máxima sobre el espesor del tablero.

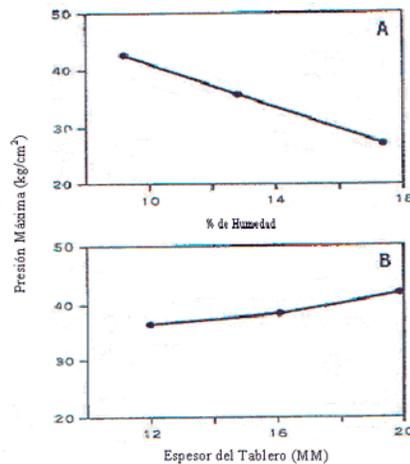


Figura 4.7 Relación espesor y presión máxima

La temperatura en el prensado resulta de la aplicación de calor para que los adhesivos termo sintéticos puedan ser rápidamente, polimerizados. El nivel de calor requerido depende del adhesivo utilizado, del material en bruto y de los parámetros de prensado. Para disminuir los tiempos de prensado e incrementar la producción, las nuevas resinas se utilizan a altas temperaturas de prensado.

4.1.2 Variables de salida

4.1.2.1 Humedad del tablero

El efecto del contenido de humedad en el tablero, para su elaboración y sus propiedades es altamente significativo. El contenido de humedad se origina de cuatro fuentes.

- Del agua inicialmente retenida en las partículas. La cantidad de humedad atribuida por este recurso varía de especie en especie, pero generalmente, el rango es de 3 a 6 por ciento en base seca.
- El agua introducida por el adhesivo. El adhesivo contiene de 35 a 60 por ciento de contenido de agua. Los sobrantes de agua por este recurso son capaces de elevar la humedad del tablero de 3 a 5 por ciento.

- La humedad añadida por la condensación del urea-formaldehído. La cantidad de agua añadida de esta manera no es significativa.
- El agua añadida por esprea en la superficie (práctica frecuente en Europa) para obtener un cierto terminado deseado tal como superficies más suaves y una más rápida transferencia de calor en la capa central del tablero (consecuentemente, permitiendo tiempos más breves de prensado). Este recurso no contribuye en gran medida a la humedad del tablero.

Cuando se tienen tanto altos como bajos niveles de humedad en el tablero se presentan problemas en la operación y se obtiene una mala calidad en el tablero. El contenido de humedad depende de muchos factores tales como la naturaleza del proceso, la geometría de la partícula, la densidad de la especie, entre otros, haciendo su generalización difícil (Mosleni, 1974).

Marian, J. E. (1958) (tomado de Mosleni, 1974), en sus estudios para tableros chapados, obtuvo con una resistencia máxima en el tablero cuando el contenido de humedad se encontraba entre 8 y 12 %.

Kehr, E. y Schoelsen, S. (1968) (tomado de Mosleni, 1974), experimentaron con tres capas y observaron que la mayor fuerza de inflexión y la mayor fuerza de unión interna se obtuvo cuando el contenido de humedad se encontraba en el rango entre 11 y 13.5 %.

Maku, T., et al, (1959) (tomado de Mosleni, 1974). usando tiempos de prensado de menos de 5 minutos, mostraron que la resistencia al cortado era mayor en un rango de humedad de 14 a 18.5 %. Generalmente, es recomendable que los tableros hechos con maderas de baja densidad posean relativamente bajo contenido de humedad comparados con los hechos de maderas densas

En la Tabla 4.1 se muestra algunas de las propiedades más importantes de un tablero de partícula a diferentes contenidos de humedad, estos datos se toman como referencia para comparar los resultados obtenidos en el capítulo.

Tabla 4.1 Propiedades de los tableros a diferentes contenidos de humedad

Propiedad	% de Contenido de Humedad				
	8.5	11.0	13.5	16.0	18.5
Espesor del tablero (mm)	20.3	20.3	20.6	21.0	21.2
Densidad (g/cm ³)	0.61	0.60	0.61	0.50	0.59
Módulo de ruptura (kg/cm ²)	236	264	248	244	190
Esfuerzo máximo (kg/cm ²)	3.8	5.5	6.5	3.4	1.7
Tiempo de Prensado (min)	1.7	1.7	1.4	1.4	1.3

Otros valores que se toman como referencia son los reportados en la norma Venezolana para tableros de partícula Covenin 897-91

Esfuerzo máximo (kg/cm ²)	3.5
Módulo de ruptura (kg/cm ²)	180
% de hinchamiento	15
% de absorción de agua	60

4.1.2.2 Densidad del tablero

La densidad del tablero es de suma importancia debido a la influencia que ésta ejerce en las características físicas, mecánicas e industriales resultantes del producto. Los tableros de alta densidad están asociados con la resistencia en el tablero, características mecánicas más fuertes, mayor grado de inestabilidad dimensional y mayor costo por unidad de volumen, por el contrario los tableros de baja densidad tienen mejores características de aislamiento, mayor estabilidad dimensional, menor resistencia y menor costo por unidad de volumen.

Los tableros de partículas de baja densidad tienen una producción limitada y son usualmente utilizados en aplicaciones donde se requieran características de aislamiento y peso ligero.

El espesor de los tableros de baja densidad se limitó a un máximo aproximado de 2.5 cm (una pulgada).

Los tableros de partícula de mediana densidad cumplen con la mayoría de los requerimientos y tienen más usos que cualquier otro grupo. La mayoría de los tableros que se producen se clasifican como tableros de densidad media, estos se producen de una sola capa o multi capas en paneles de 121.9 por 243.8 cm (4 por 8 pies) o más largos.

El tablero de media densidad se puede usar como material para: paneles de muebles, alinear puertas, paneles chapados para paredes y capas inferiores en pisos.

4.1.2.3 Módulo de ruptura, absorción de agua e hinchamiento del espesor

La evaluación de los tableros experimentales se realizó de acuerdo con la norma ASTM D 1037-99, la que además del módulo de ruptura y la absorción de agua e hinchamiento del espesor establece la metodología para evaluar las siguientes variables:

Tamaño de los tableros terminados.- Se determina por medio de la medición del ancho, al final y en la mitad de la longitud, con una precisión por lo menos de $\pm 0.3\%$ ó de 1/16 de pulgada (pulg.) (2mm).

Variación en el espesor.- El espesor de cada espécimen debe ser medido en cinco puntos, cerca de cada esquina y cerca del centro con una precisión por lo

menos del $\pm 0.3\%$, cuando sea posible. El espesor promedio es el espesor correspondiente.

Gravedad específica.- Se obtiene de sus dimensiones y de su masa.

Terminado de las superficies.- El terminado de ambas superficies debe ser descrito y la textura debe ser evidenciada por medio de una fotografía adecuadamente identificada.

Flexión estática.- La Prueba puede hacerse tanto con el espécimen mojado como seco. La mitad de las pruebas se prepara con las dimensiones de los especímenes paralelas al largo del tablero, la otra mitad con las dimensiones perpendiculares, para evaluar las propiedades direccionales.

Cada espécimen debe de tener: de ancho, 3 pulg. -si el espesor nominal es más grande que $\frac{1}{4}$ de pulg. (6 mm)- ó 2 pulg., -si es menor que éste- y; de largo, 2 pulg. más 24 veces el espesor nominal. El ancho y el largo de cada espécimen debe ser medido con una precisión de no menor a 0.3 %.

Fuerza de tensión perpendicular a la superficie.- Para determinar la cohesión en el tablero en dirección perpendicular al plano de éste, esta prueba debe hacerse en especímenes secos de 2 x 2 pulg. y el espesor del tablero acabado.

Absorción de agua e hinchamiento del espesor. El espécimen de prueba debe ser de 12 por 12 pulg. o de 6 por 6 pulg., con sus cuatro orillas bien delineadas y cortadas en ángulo recto. Esta prueba puede realizarse por medio de dos métodos, en ambos, la absorción de agua y el hinchamiento del espesor para cada espécimen se expresan en cantidad porcentual: en el método A, después de una sumersión inicial a corto plazo de 2 horas y posteriormente, a una de largo plazo de 22 horas; en el método B, la absorción de agua y el hinchamiento del espesor se indican después de una sola sumersión por un tiempo de 24 horas.

La medida del espesor se debe hacer con una precisión de 0.3% en los cuatro puntos medios a lo largo de cada lado y el promedio determina el hinchamiento del espesor.

Se calcula el contenido de humedad (con base en el peso seco de la probeta) y se reporta el hinchamiento del espesor como porcentaje del espesor original.

Para este trabajo, se usó el Método B, que consiste en los siguientes pasos: se sumerge el espécimen horizontalmente 1 pulgada por debajo de la superficie del agua destilada, manteniendo el agua a $20^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$. Después de 24 horas de sumersión, se suspende para desaguar por 10 ± 2 min. Se remueve el exceso de agua de la superficie e inmediatamente, se pesa el espécimen y se pasa a un secado a $(103\pm 2^{\circ}\text{C})$.

El producto fue diseñado con la finalidad de tener un material que pudiera presentar las características de un tablero de partículas de madera de uso común para la fabricación de muebles. Por ello se realizaron las pruebas físico mecánicas de la capa interna, flexión estática, hinchamiento y absorción de agua, de tal manera que se obtuvieran datos para evaluar la resistencia de los tableros de rastrojo de maíz.

Las pruebas físico mecánicas se realizaron en la Máquina Universal, tipo RH-10 T.V., No. 70133, fabricada en abril de 1975 en Kyoto Japón de marca Shimadzu Seisakusho ITD, la que se muestra en la Fotografía 4.1.



Fotografía 4.1

Para realizar las pruebas de manera que se pudiera aprovechar lo mejor posible el tablero de 35 x 35 cm, se dividió de la manera que se observa en la Figura 4.8

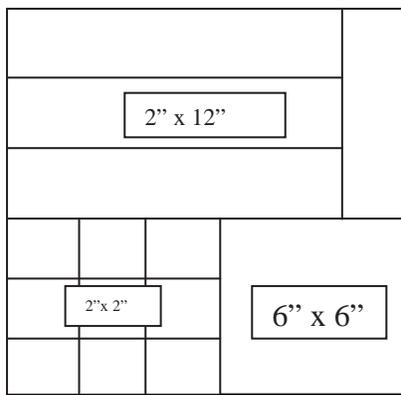


Figura 4.8 Cortes del panel experimental

Con esta distribución del tablero obtuvieron los siguientes cortes:

- Una pieza, de 6 por 6 pulg destinada a la prueba de absorción del agua e hinchamiento del espesor.
- Seis piezas, de 2 por 2 pulg para la prueba de fuerza de tensión perpendicular a la superficie.
- Tres piezas, de 2 por 12 pulg. para la prueba de flexión estática.

En el Figura 4.8 se observan más piezas de las que se describieron porque se pierden milímetros en los cortes, lo que provoca que algunas piezas se pierdan y no tengan las medidas necesarias.

4.1.3 Variables que se mantendrán constantes

4.1.3.1 Tamaño de partícula

En el trabajo de pre experimentación se llevó a acabo el tamizado, por diferentes mallas, de una muestra de hojas y de caña de maíz, en las Tablas 4.2 a 4.7 se presentan las dimensiones de diez partículas seleccionadas al azar de dicha muestra, así se muestran las dimensiones promedio para cada una de las mallas.

Tabla 4.2 Dimensiones de las partículas de astilla de caña que pasaron por la malla de ¼ de pulg.			
No. de Partícula	Ancho(mm)	Largo(mm)	Espesor(mm)
1	4.0	20.0	1.2
2	3.5	18.5	0.7
3	3.8	16.0	1.5
4	2.2	21.1	0.8
5	1.9	20.9	0.2
6	2.8	19.8	1.5
7	2.7	22.2	0.8
8	3.9	18.0	1.9
9	2.1	16.0	0.7
10	1.1	23.5	0.7
Promedio	2.8	19.6	1.0

Tabla 4.3 Dimensiones de las partículas de astilla de hoja que pasaron por la malla de ¼ de pulg.			
No. de Partícula	Ancho(mm)	Largo(mm)	Espesor(mm)
1	5.0	27.5	0.6
2	3.1	29.9	1.0

Tabla 4.3 Dimensiones de las partículas de astilla de hoja que pasaron por la malla de ¼ de pulg.

3	5.0	24.0	1.1
4	4.5	33.5	1.2
5	3.8	31.0	0.8
6	3.9	22.0	1.0
7	2.5	21.1	0.9
8	2.0	20.5	0.8
9	2.0	24.9	0.5
10	2.1	24.7	0.9
Promedio	3.4	25.9	0.9

Tabla 4.4 Dimensiones de las partículas de astilla de caña que se detuvieron en la malla de ¼ de pulg.

No. de Partícula	Ancho(mm)	Largo(mm)	Espesor(mm)
1	4.0	30.0	1.2
2	4.0	36.0	1.6
3	3.9	31.0	1.0
4	3.1	32.0	1.7
5	2.0	34.0	1.0
6	3.9	26.0	2.0
7	3.2	26.5	2.7
8	1.9	36.5	0.5
9	4.0	25.0	1.9
10	4.1	26.0	1.2
Promedio	3.4	30.3	1.5

Tabla 4.5 Dimensiones de las partículas de astilla de hoja que se detuvieron por la malla de ¼ de pulg.

No. de Partícula	Ancho(mm)	Largo(mm)	Espesor(mm)
1	4.2	25.0	1.9
2	6.5	21.7	0.5
3	3.0	30.2	0.9
4	5.5	25.8	1.0

Tabla 4.5 Dimensiones de las partículas de astilla de hoja que se detuvieron por la malla de ¼ de pulg.

5	3.0	22.8	1.2
6	4.0	35.5	1.9
7	3.2	28.5	1.0
8	4.1	21.0	0.9
9	4.9	25.5	1.3
10	4.7	23.7	1.1
Promedio	4.3	25.97	1.2

Tabla 4.6 Dimensiones de las partículas de astilla de caña que se detuvieron por la malla de 3/8 de pulg.

No. de Partícula	Ancho(mm)	Largo(mm)	Espesor(mm)
1	6.2	34.1	3.5
2	3.8	50.2	2.0
3	4.6	33.9	1.2
4	6.0	38.6	1.8
5	3.0	41.0	1.0
6	4.1	34.5	2.0
7	3.0	34.9	2.4
8	2.9	33.0	4.9
9	3.4	38.1	1.6
10	4.0	33.0	1.6
Promedio	4.1	37.1	2.2

Tabla 4.7 Dimensiones de las partículas de astilla de hoja que se detuvieron por la malla de 3/8 de pulg.

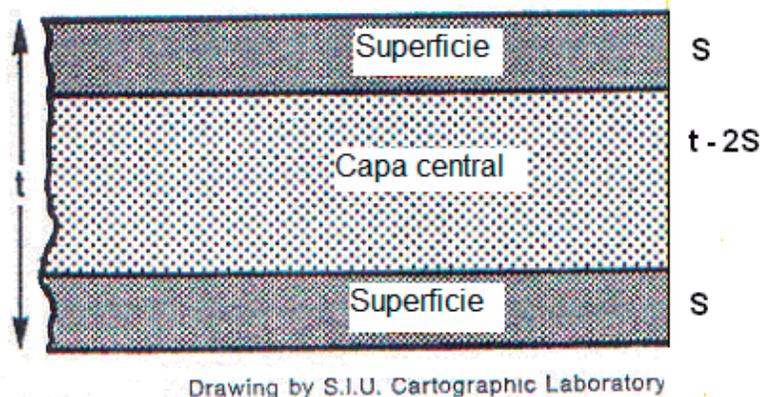
No. de Partícula	Ancho(mm)	Largo(mm)	Espesor(mm)
1	5.8	33.0	1.0
2	6.3	32.8	1.2
3	9.5	24.0	1.1
4	7.8	33.0	0.8
5	7.0	32.2	0.5
6	7.9	27.0	0.4
7	5.5	30.0	0.5

Tabla 4.7 Dimensiones de las partículas de astilla de hoja que se detuvieron por la malla de 3/8 de pulg.

8	6.0	21.0	1.8
9	3.9	35.0	0.2
10	5.0	23.2	0.8
Promedio	6.5	29.1	0.8

4.1.3.2 Número de capas

En la pre experimentación se propuso conformar un tablero de tres capas, en las capas superficiales se usó hoja, ya que se pensaba produciría una superficie suave y en la capa central se utilizó la partícula de mayor tamaño de caña.



Ante la dificultad que se presentó la selección de las diferentes partes del rastrojo de maíz; el molido por partes y; la selección del tamaño de partícula, se optó por cambiar esta parte del procedimiento, se buscó un molino apropiado en el cual se pudiera disminuir y homogenizar el tamaño de la partícula, el molino que se utilizó fue un molino agrícola. Esta decisión cambió en varios aspectos el producto:

1. El tablero no estaría formado de tres capas como se pretendía, se formaría de una sola capa.

2. El tablero no tendría tres capas con diferentes materiales, sería una sola capa de un solo material compuesto de hoja y de caña.
3. No se variará el tamaño de la partícula entre capas.

4.1.3.3 Tipo de partícula

La geometría de la partícula (forma y dimensiones) es una consideración primordial que afecta las propiedades del tablero, directamente en la apariencia de las superficies y de las orillas del panel.

La flexibilidad de la partícula no sólo tiene una influencia directa en la apariencia de la superficie y de las orillas, sino que también en el grado de contacto entre partícula partícula por lo que afecta en la resistencia del tablero.

A continuación se enlistan los principales tipos de partículas usados para la fabricación de tableros (Echenique *et al*, 1993).

1. Acepilladura (“shaving”). Partícula pequeña de madera de dimensiones variables producida cuando se cepilla la madera. Su grueso es variable y con frecuencia está retorcida.
2. Oblea (“wafer”) similar a las hojuelas en forma pero más grandes . Por lo regular su largo es mayor de 2.25 cm, su grueso mayor de 0.06 cm.
3. Hojuela (“Flacke”). Partícula pequeña de dimensiones predeterminadas fabricada con equipo especializado. Su grueso uniforme y tiene la orientación de las fibras paralelas a las caras.
4. Astilla (“chip”). Pieza astillada, de un fragmento de madera, mediante una cuchilla como las usadas para formar astillas para la producción de pulpa de papel.
5. Aserrín (“Sawdust”). Pequeñas pieza de madera producida al aserrar la madera.

6. Hebra (“Strand”). Una cepilladura de gran longitud, pero plana con superficies paralelas.
7. Tira (“Siver”). Piezas de sección transversal casi cuadrada con una longitud de por lo menos cuatro veces su grosor.
8. Lana de madera (“Wood Wool”). Tiras delgadas y largas, con frecuencia retorcidas, que se usan también como relleno para empacar artículos frágiles. También se le conocen como “Exelcior”

De acuerdo con el cribado (malla de 5 mm) que se realizó en la fase experimental de este trabajo el tipo de partícula corresponde a la Hojuela, tiene dimensiones predeterminadas, planas y delgadas, con espesor uniforme que varía entre 0.2032 y 0.4064 mm (0.008 y 0,016 pulgadas), una longitud que puede estar en el rango de menos 2.54cm (1 pulgada) o hasta cerca de 10.16 cm (4 pulg.) y un ancho desde una pequeña fracción de pulgada hasta $\frac{3}{4}$ de pulgada o más.

Heebink y trabajadores (tomado de Moslemi, 1974) encontraron que un valor cercano a lo óptimos que fue aproximadamente .38cm (0.015 pulgadas) de espesor por 2.54 (1 pulgada) de largo y todo el rango de ancho.

4.1.3.4 Densidad de la partícula

La densidad de la partícula fue proporcionada por los análisis fisicoquímicos realizados en el Centro de Estudios en Medio Ambiente (C.E.M.A.), el valor de esta fue de 0.102 g/cm³, el reporte de la determinación se presenta en el Anexo I.

4.1.3.5 Humedad de la partícula

La humedad de la partícula de rastrojo de 5.9% se obtuvo de la termo balanza OHAUS MB200 ubicada en el complejo E, Laboratorio 301 de la Universidad Autónoma de México, encontrando los siguientes resultados:

En la tabla 4.8 se presentan las condiciones a las que se determinó este parámetro.

Tabla 4.8 Condiciones para la determinación de la humedad

Tiempo de secado	20 minutos
Temperatura de secado	130°C
Peso de muestra humedad	2.03 g
Peso de muestra seca	1.91 g
% masa del sólido sin agua	94.1
% de Humedad	5.9

El resultado de este análisis se encuentra dentro del rango óptimo de humedad para el tablero establecido en el capítulo 4.1.2.1

4.1.3.6 Adhesivo

Para este trabajo se utilizó el fenol formaldehído como adhesivo, este adhesivo es el segundo más usado en la producción de tableros de partículas. Éste no contiene nitrógeno y tiene algunas diferencias en el desempeño comparado con la urea formaldehído. Las resinas fenólicas, a diferencia de la urea formaldehído, es durable, exhibe una resistencia a la desintegración en agua fría y caliente, es resistente a los ácidos débiles o bases y a los solventes orgánicos comunes, muestra una buena resistencia a altas temperaturas. Sin embargo, el fenol formaldehído tiene desventajas comparado con los adhesivos de urea como el contenido de sólidos, la poca vida de almacenamiento, la baja velocidad de secado, la baja resistencia a los clavos, la incompatibilidad con aditivos, su costo y su posible impacto en el color del tablero. Esto se traduce en tiempos de prensado prolongados, temperaturas de prensado altas y mayor costo del tablero.

Los dos compuestos químicos requeridos para la manufactura de los adhesivos fenolicos, son el fenol y el formaldehido.

El fenol formaldehido es el producto de la condensación del formaldehido y del fenol involucrando un proceso químico complejo. Hay muchas formas para combinar el fenol y el formaldehido en el proceso de condensación. La manera en que estos dos compuestos pueden ser combinados depende de varios factores tales como la cantidad y el tipo de catalizador, el pH de la reacción, la relación molar entre en fenol y el formaldehido, el tiempo y la temperatura de la reacción, y el uso de varios aditivos. El producto termo sintético de la reacción del fenol y el formaldehido es formado cuando el formaldehido se usa en un exceso molar en condiciones alcalinas.

El fenol formaldehido utilizado en la experimentación fue otorgado por la planta Rexcel complejo Lerma a través del Ing. Armando Vera, el certificado de calidad de la resina se presenta en el Anexo II.

5 DISEÑO DE PARÁMETROS

En esta parte se establecieron los parámetros del diseño del proceso de prensado para hacer el desempeño menos sensible a las causas de la variación

5.1. Descripción de proceso para la obtención de tableros de partícula obtenidos del rastrojo de maíz

El proceso de elaboración de tableros experimentales obtenidos de esquilmos agrícolas se llevó a cabo en dos fases, a la primera se le denominó pre experimental y a la segunda experimental, la primera permitió conocer los recursos materiales con los que se contaba y encontrar la forma de optimizarlos o complementarlos con otros, las etapas de ambas pruebas se muestran en el diagrama de bloques (Figura 5.1), las diferencias se mencionan en la descripción de cada una de éstas.

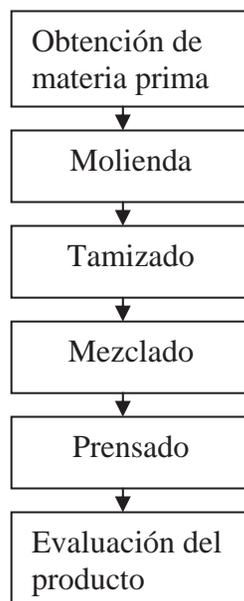


Figura 5.1. Diagrama de bloques del proceso

5.1.1. Obtención de la materia prima

Como se menciona en el capítulo 1 el rastrojo de maíz que se utilizó como materia prima en este trabajo se obtuvo de los residuos de la cosecha otoño- invierno 2007-2008 de la Comunidad El Zapote, Municipio de Álvaro Obregón.

5.1.2 Molienda

La molienda del rastrojo de maíz en la fase pre experimental se llevó a cabo en el molino de martillos del laboratorio pesado de la Facultad de Ingeniería Química de la UMSNH (Edificio M, Ciudad Universitaria), en esta fase se molió por separado la hoja del tallo al que se le llamó caña. En la fase experimental, con el propósito de disminuir el tiempo de molienda se buscó un molino que diera un tamaño de partícula similar al obtenido en el de martillos el que se sustituyó por un molino agrícola, la molienda se efectuó mezclando la hoja con la caña en el propio campo de cultivo.

5.1.3 Tamizado

Como se describió en el apartado 4.1.3.1 en la fase pre experimental la muestra de hojas y caña de maíz se pasaron en forma separada a través de dos tamaños diferentes de malla de 6.35 y 3.75mm (1/4 y 3/8 de pulgadas). En la fase experimental se cribó la muestra de esquilmos, solamente por la malla de 5 mm (0.197 pulgadas) con el único fin de retirar la tierra y polvos.



Fotografía 5.1

5.1.4. Mezclado

Ya que se tenía el material separado y libre de tierra y polvos, se procedió a pesar el adhesivo y el rastrojo, para todas las pruebas la masa de los materiales permaneció constante, ya que en la etapa de pre experimentación así se determinó.

En la fase de la pre experimentación ante el deseo de tener un mejor, que se tradujera en superficies más uniformes y mejor aglutinadas, era necesario que el adhesivo se calentara levemente, cuidando de que no hubiese pérdida de agua o de algún otro solvente, de tal manera que su viscosidad disminuyera y se facilitara la mezcla del adhesivo con el rastrojo.

El mezclado se hizo a mano, se intentó hacerlo con algunas máquinas desarrolladas para esto, pero se obtuvieron resultados fatales, por la naturaleza del adhesivo.



Fotografía 5.2

5.1.5. Prensado

El prensado con temperatura se llevó a cabo en la prensa del Laboratorio de Investigación de la Facultad de Ingeniería Química de la UMSNH (Edificio E, Ciudad Universitaria) (Fotografía 5.3)



Fotografía 5.3

En el momento de tener los materiales bien mezclados se vertieron en el dado que se encuentra en la prensa, para después, imprimirle la presión y la temperatura deseada (Fotografía 5.4).



Fotografía 5.4

Después del tiempo deseado, se retiró el espécimen y se pesó.

Aprovechamiento de los residuos agrícolas del municipio de Álvaro Obregón en la elaboración de paneles para la construcción

Como se analizó en el capítulo relacionado con el diseño del sistema, el prensado es la etapa principal del proceso de elaboración de tableros experimentales obtenidos de esquilmos agrícolas, en la Figura 4.1 se observan las variables de entrada (independientes), las constantes y las variables de salida (dependientes).

El diseño experimental que se siguió en este trabajo corresponde a un arreglo ortogonal L8 de acuerdo con la metodología de Taguchi.

5.1.5.1 Pre Experimentación

En este apartado se reportan solamente tres pruebas ya que son las que arrojaron datos contundentes para fijar los rangos de trabajo de las variables.

- Prueba1

Valores de variables	
Tiempo de prensado	8 min
Temperatura de prensado	160°C
Presión de prensado	30 kg/cm ²

Cantidades de materias primas	
Peso de materia prima	447.2 g
Peso de adhesivo	413.4 g

Observaciones:

Manufactura

Para esta prueba preliminar se usó una sola capa de material grueso de caña.

Aspecto

Para esta primera prueba se encontró que el aspecto fue áspero y de fibras quebradizas, los bordes y esquinas no tomaron la forma adecuada predeterminada en el molde.

Conclusiones de la pruebas

Con base en los resultados se puede concluir que es necesario un tamaño de partícula más fino para proporcionar una superficie más lisa así mismo como se hace necesario agregar más cantidad de adhesivo para proporcionar un aspecto menos áspero.

- Prueba 2

Valores de variables	
Tiempo de prensado	8 min
Temperatura de prensado	160°C
Presión de prensado	30 kg/cm ²

Cantidades de materias primas	
Peso de materia prima	447.2 g
Peso de adhesivo	500 g

Observaciones:

Manufactura

Para esta prueba se aumentó la cantidad de adhesivo para tratar de lograr superficies mas lisas, se conformó el tablero con 3 capas, la central fue de caña de un tamaño de partícula más grande y las dos exteriores de partículas más pequeñas, esto con la idea de generar resistencia en la parte central y tener superficies tersas.

Aspecto

Ante la dificultad de separar las tres capas y de mantener la distribución uniforme, se encontró que las superficies tenían un aspecto mucho más liso pero la distribución de los tamaños de partícula dejaba mucho que desear.

Conclusión

Se puede concluir que la idea de tener tres capas uniformes y bien distribuidas se hacía casi imposible de concretar en la prensa que se estaba utilizando, por lo que se determinó que el tamaño de la partícula debía de ser disminuido y que el número de capas fuese solamente una mezcla de caña y hoja. Por otro lado el aumento de adhesivo fue una de las claves para tener las superficies más lisas y sus orillas moldeadas con mayor uniformidad.

- Prueba 3

Valores de variables	
Tiempo de prensado	10 min
Temperatura de prensado	160°C
Presión de prensado	100 kg/cm ²

Cantidades de materias primas	
Peso de materia prima	447.2 g
Peso de adhesivo	600 g

Observaciones:

Manufactura.

Para esta prueba se usó una sola capa de material fino, revuelto hoja y caña, se aumentó la presión y el tiempo de prensado.

Aspecto

En esta ocasión se lograron superficies lisas completamente, pero se tuvo pérdidas de adhesivo en el momento del prensado y una ligera curvatura en el tablero, las orillas fueron moldeadas con éxito dando un aspecto uniforme y compacto.

Conclusiones

En el caso de la curvatura del tablero se concluyó que fue por la cantidad de humedad que no fue retirada del tablero, que hubo un pequeño exceso de adhesivo y que el tamaño de partícula fue el óptimo.

De estas pruebas se fijó la cantidad de masa de materia prima y de adhesivo, para todas la pruebas posteriores, las cuales tienen el mismo valor de 550 g. para el adhesivo y para la materia prima.

5.1.5.2 Experimentación

Del trabajo pre experimental y del arreglo ortogonal L8, se fijaron los valores para las diferentes variables de entrada para las ocho corridas, como se muestra en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2 Arreglo ortogonal L8

No. De Prueba	Tiempo de Prensado (min)	Presión de Prensado (kg/cm ²)	Temperatura de Prensado (°C)
1	15	60	160
2	15	60	180
3	15	80	160
4	15	80	180
5	18	60	160
6	18	60	180

Aprovechamiento de los residuos agrícolas del municipio de Álvaro Obregón en la elaboración de paneles para la construcción

No. De Prueba	Tiempo de Prensado (min)	Presión de Prensado (kg/cm ²)	Temperatura de Prensado (°C)
7	18	80	160
8	18	80	180

5.1.5.2.1 Densidad



Fotografía 5.5

Medidas de tableros		
No. de prueba	1	
Largo	35 cm	
Ancho	35 cm	
Espesor(mm)	12.05	Esquina
	12.40	Esquina
	12.00	Esquina
	11.50	Esquina
	12.20	Centro

Aprovechamiento de los residuos agrícolas del municipio de Álvaro Obregón en la elaboración de paneles para la construcción

Espesor promedio = 12.03 mm

Área de tablero = (35cm x 35cm)= 1 225 cm²

Volumen del tablero= Área del tablero x Espesor promedio = 1 225 cm² x 1.203 cm

Volumen del tablero = 1 473.674 cm³

Densidad del tablero = masa del tablero / volumen del tablero

Densidad del tablero = 860 g / 1 473.674 cm³ = 0.584 g/cm³



Fotografía 5.6

Medidas de tableros		
No. de prueba	2	
Largo	35 cm	
Ancho	35 cm	
Espesor(mm)	13.08	Esquina
	13.15	Esquina
	11.30	Esquina
	11.30	Esquina
	12.35	Centro

Espesor Promedio = 12.24 mm

Área de tablero = (35cm x 35cm)= 1 225 cm²

Volumen del tablero= área del tablero x espesor promedio = 1 225 cm² x 1.224 cm

Volumen del tablero = 1 498.788 cm³

Densidad del tablero = masa del tablero / volumen del tablero

Aprovechamiento de los residuos agrícolas del municipio de Álvaro Obregón en la elaboración de paneles para la construcción

Densidad del tablero = $814.5 \text{ g} / 1498.788 \text{ cm}^3 = 0.543 \text{ g/cm}^3$



Fotografía 5.7

Medidas de tableros		
No. de prueba	3	
Largo	35 cm	
Ancho	35 cm	
Espesor(mm)	11.10	Esquina
	10.40	Esquina
	12.45	Esquina
	12.05	Esquina
	12.20	Centro

Espesor promedio = 11.64mm

Área de tablero = $(35\text{cm} \times 35\text{cm}) = 1225 \text{ cm}^2$

Volumen del tablero = área del tablero x espesor promedio = $1225 \text{ cm}^2 \times 1.164 \text{ cm}$

Volumen del tablero = 1425.9 cm^3

Densidad del tablero = masa del tablero / volumen del tablero

Aprovechamiento de los residuos agrícolas del municipio de Álvaro Obregón en la elaboración de paneles para la construcción

Densidad del tablero = $842 \text{ g} / 1425.9 \text{ cm}^3 = 0.591 \text{ g/cm}^3$



Fotografía 5.8

Medidas de tableros		
No. de prueba	4	
Largo	35 cm	
Ancho	35 cm	
Espesor(mm)	11.35	Esquina
	10.30	Esquina
	10.50	Esquina
	11.30	Esquina
	12.20	Centro

Espesor promedio = 11.13mm

Área de tablero = $(35\text{cm} \times 35\text{cm}) = 1225 \text{ cm}^2$

Volumen del tablero = área del tablero x espesor promedio = $1225 \text{ cm}^2 \times 1.113 \text{ cm}$

Volumen del tablero = 1363.425 cm^3

Densidad del tablero = masa del tablero / volumen del tablero

Aprovechamiento de los residuos agrícolas del municipio de Álvaro Obregón en la elaboración de paneles para la construcción

$$\text{Densidad del tablero} = 787 \text{ g} / 1\,363.425 \text{ cm}^3 = 0.577 \text{ g/cm}^3$$



Fotografía 5.9

Medidas de tableros		
No. de prueba	5	
Largo	35 cm	
Ancho	35 cm	
Espesor(mm)	11.50	Esquina
	11.40	Esquina
	12.35	Esquina
	12.30	Esquina
	12.25	Centro

Espesor promedio = 11.96mm

Área de tablero = (35cm x 35cm)= 1 225 cm²

Volumen del tablero= área del tablero x espesor promedio = 1 225 cm² x 1.196 cm

Volumen del tablero = 1 465.1 cm³

Densidad del tablero = masa del tablero / volumen del tablero

Aprovechamiento de los residuos agrícolas del municipio de Álvaro Obregón en la elaboración de paneles para la construcción

$$\text{Densidad del Tablero} = 820 \text{ g} / 1465.1 \text{ cm}^3 = 0.560 \text{ g/cm}^3$$



Fotografía 5.10

Medidas de tableros		
No. de prueba	6	
Largo	35 cm	
Ancho	35 cm	
Espesor(mm)	13.13	Esquina
	12.15	Esquina
	11.05	Esquina
	12.23	Esquina
	12.10	Centro

Espesor promedio = 12.13mm

Área de tablero = (35cm x 35cm)= 1 225 cm²

Volumen del tablero= área del tablero x espesor promedio = 1 225 cm² x 1.213 cm

Volumen del Tablero = 1 485.925 cm³

Densidad del tablero = masa del tablero / volumen del tablero

Aprovechamiento de los residuos agrícolas del municipio de Álvaro Obregón en la elaboración de paneles para la construcción

Densidad del tablero = $805.5 \text{ gr} / 1\,485.925 \text{ cm}^3 = 0.541 \text{ g/cm}^3$



Fotografía 5.12

Medidas de tableros		
No. de prueba	7	
Largo	35 cm	
Ancho	35 cm	
Espesor(mm)	11.40	Esquina
	12.05	Esquina
	10.40	Esquina
	10.10	Esquina
	12.10	Centro

Espesor promedio = 11.21mm

Área de tablero = $(35\text{cm} \times 35\text{cm}) = 1\,225 \text{ cm}^2$

Volumen del tablero = Área del tablero x espesor promedio = $1\,225 \text{ cm}^2 \times 1.121 \text{ cm}$

Volumen del Tablero = $1\,373.225 \text{ cm}^3$

Densidad del tablero = masa del tablero / volumen del tablero

Densidad del tablero = $819.5 \text{ g} / 1\,373.225 \text{ cm}^3 = 0.597 \text{ g/cm}^3$

Aprovechamiento de los residuos agrícolas del municipio de Álvaro Obregón en la elaboración de paneles para la construcción



Fotografía 5.13

Medidas de tableros		
No. de prueba	8	
Largo	35 cm	
Ancho	35 cm	
Espesor(mm)	12.10	Esquina
	12.50	Esquina
	10.45	Esquina
	10.03	Esquina
	12.15	Centro

Espesor promedio = 11.45mm

Área de tablero = (35cm x 35cm)= 1 225 cm²

Volumen del tablero= área del tablero x espesor promedio = 1 225 cm² x 1.145 cm

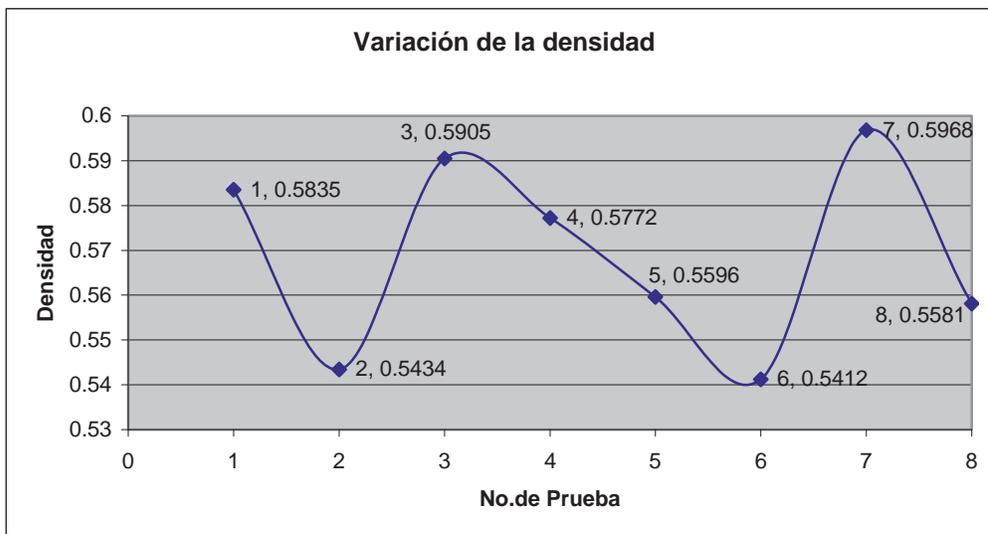
Volumen del tablero = 1 402.0125 cm³

Densidad del tablero = masa del tablero / volumen del tablero

Densidad del Tablero = 782.5 g /1 402.0125 cm³ = 0.558 g/cm³

Con al finalidad de mostrar el rango en el que varió la densidad de los tableros en las ocho pruebas en la Figura 5.2 se graficó el valor de este parámetro en cada una de las pruebas.

Figura 5.2 Densidad del tablero en las ocho pruebas experimentales



De la figura 5.2 se concluye que los tableros pueden ser catalogados como tableros de media densidad, ya que sus densidades se encuentran entre 0.4 y 0.69 g/cm³.

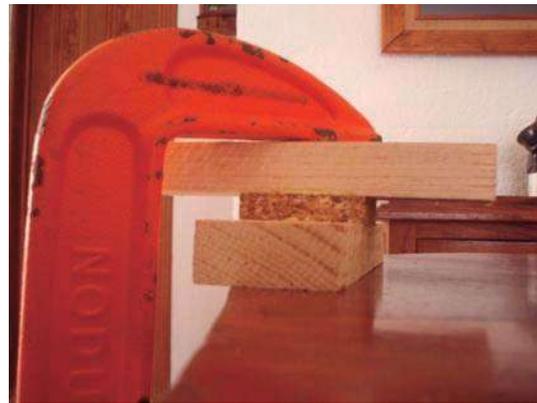
5.1.5.2.2 Prueba de fuerza de tensión perpendicular a la superficie o prueba de resistencia de la capa interna. Esfuerzo máximo

Esta prueba determina la calidad del adhesivo y la naturaleza de la adhesión del material, así como la eficiencia de la adhesión a través del esfuerzo máximo.

Para está prueba a las probetas de 2 por 2 pulg se les pegó en forma de cruz bien alineados dos trozos de madera de 2 por 6 pulgadas, el adhesivo utilizado para unir estos dos trozos de madera con las probetas es resistol profesional para

Aprovechamiento de los residuos agrícolas del municipio de Álvaro Obregón en la elaboración de paneles para la construcción

carpintero, se dejó secar , de 3 a 6 horas para asegurar una correcta adhesión.(Fotografía 5.14)



Fotografía 5.14

Las seis probetas de cada tablero se pusieron en la máquina universal ubicada en el edificio o perteneciente a la facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera de la U.M.S.N.H., como lo muestra la siguiente imagen (Fotografía 5.15).



Fotografía 5.15

El esfuerzo máximo se calculó con la fórmula establecida por la norma ASTM D1037-99.

Aprovechamiento de los residuos agrícolas del municipio de Álvaro Obregón en la elaboración de paneles para la construcción

Esfuerzo máximo = carga máxima/área resistiva

Los resultados se presentan en la Tabla 5.3

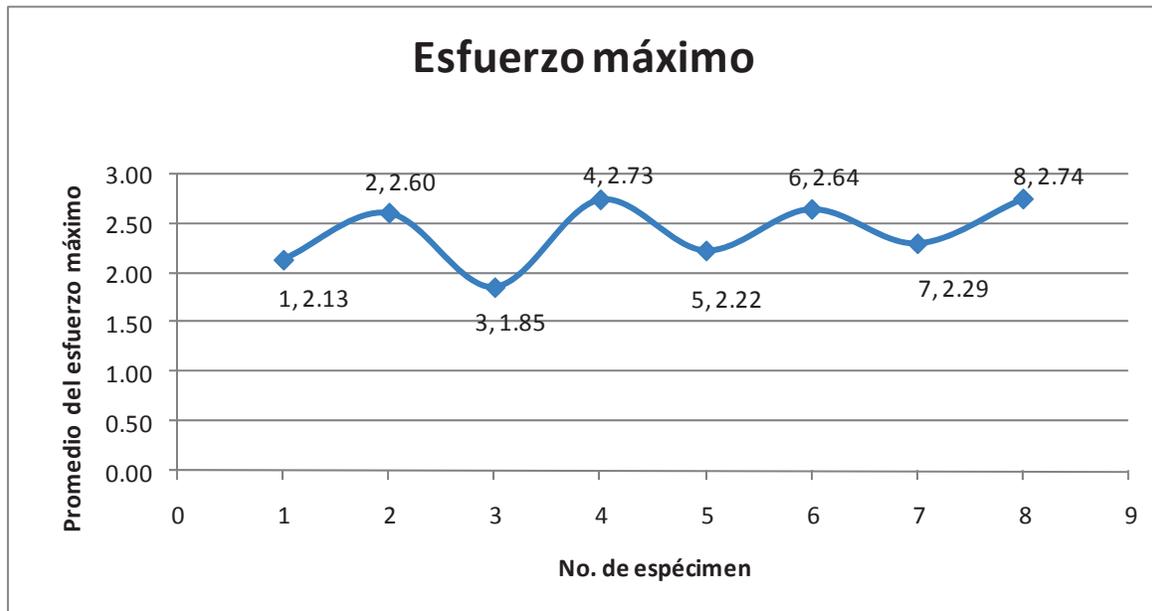
Tabla 5.3 Prueba de tensión perpendicular a la superficie. Esfuerzo máximo						
Probeta	Ancho (mm)	Largo (mm)	Carga (kg _r)	Área resistiva (cm ²)	Esfuerzo máximo (kg _r /cm ²)	Promedio del esfuerzo máximo
1	52.28	52.95	52.00	27.68	1.88	2.13
1'	52.85	52.73	69.50	27.87	2.49	
1''	53.64	52.73	60.50	28.28	2.14	
1'''	52.81	52.66	69.50	27.81	2.50	
1''''	52.05	52.82	45.00	27.49	1.64	
1''''''	52.51	52.80	59.00	27.73	2.13	
2	52.35	52.77	84.50	27.63	3.06	2.60
2'	52.52	52.87	66.00	27.77	2.38	
2''	52.42	53.29	66.00	27.93	2.36	
2'''	52.80	52.82	85.00	27.89	3.05	
2''''	52.90	52.75	81.00	27.90	2.90	
2''''''	52.25	52.71	51.00	27.54	1.85	
3	52.71	52.80	47.50	27.83	1.71	1.85
3'	52.80	52.90	51.50	27.93	1.84	
3''	52.45	52.74	57.00	27.66	2.06	
3'''	52.88	52.73	43.00	27.88	1.54	
3''''	52.24	52.97	70.00	27.67	2.53	
3''''''	52.94	52.41	40.00	27.75	1.44	
4	52.92	52.84	82.00	27.96	2.93	2.73
4'	52.89	53.03	52.00	28.05	1.85	
4''	52.89	52.42	79.50	27.72	2.87	
4'''	52.47	52.92	81.00	27.77	2.92	
4''''	52.83	52.62	80.00	27.80	2.88	
4''''''	53.00	52.71	82.50	27.94	2.95	
5	53.03	53.30	69.50	28.26	2.46	2.22

Aprovechamiento de los residuos agrícolas del municipio de Álvaro Obregón en la elaboración de paneles para la construcción

Tabla 5.3 Prueba de tensión perpendicular a la superficie. Esfuerzo máximo						
Probeta	Ancho (mm)	Largo (mm)	Carga (kg _f)	Área resistiva (cm ²)	Esfuerzo máximo (kg _f /cm ²)	Promedio del esfuerzo máximo
5'	52.45	52.99	70.50	27.79	2.54	
5''	52.90	53.88	64.50	28.50	2.26	
5'''	52.42	52.79	64.50	27.67	2.33	
5''''	52.84	52.99	52.00	28.00	1.86	
5'''''	53.08	52.01	52.00	27.61	1.88	
6	52.36	53.33	85.50	27.92	3.06	2.64
6'	52.30	52.72	66.50	27.57	2.41	
6''	52.83	52.29	60.00	27.62	2.17	
6'''	52.75	52.54	66.60	27.71	2.40	
6''''	52.97	53.04	86.00	28.10	3.06	
6'''''	52.86	52.61	75.50	27.81	2.71	
7	52.88	52.99	61.00	28.02	2.18	2.29
7'	52.43	52.83	69.50	27.70	2.51	
7''	51.60	52.93	56.00	27.31	2.05	
7'''	53.33	52.85	72.00	28.18	2.55	
7''''	52.71	53.29	73.00	28.09	2.60	
7'''''	53.21	52.79	52.50	28.09	1.87	
8	52.63	52.84	67.50	27.81	2.43	2.73
8'	52.79	53.03	73.50	27.99	2.63	
8''	53.00	52.92	88.00	28.05	3.14	

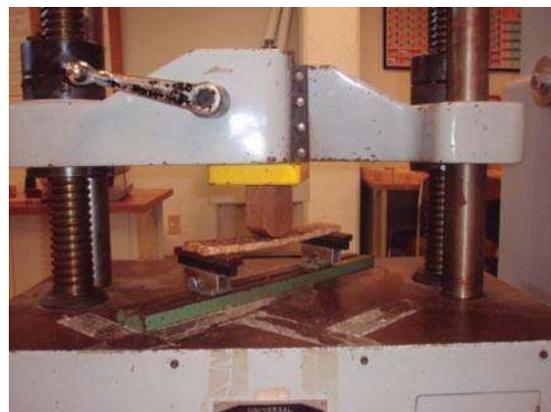
Los resultados de la prueba se observan en la Figura 5.3.

Figura 5.3



5.1.5.2.3 Prueba de flexión estática. Módulo de ruptura

Esta prueba determina la carga máxima y la elongación máxima que los tableros podrían soportar antes de su ruptura. La prueba se realizó en el laboratorio del edificio O perteneciente a la Facultad de Ingeniería en Tecnología de la Madera de la U.M.S.N.H., como se muestra en la Fotografía 5.16.



Fotografía 5.16

Aprovechamiento de los residuos agrícolas del municipio de Álvaro Obregón en la elaboración de paneles para la construcción

Los resultados obtenidos para las tres probetas de cada tablero se muestran en la tabla e.4:

El Modulo de Ruptura se calculó de acuerdo con la norma ASTM D1039-97.

$$R=(3PL)/(2bd^2)$$

De donde :

L= distancia de Claro (24 cm.)

P = carga máxima, (kg_f)

b = ancho, cm

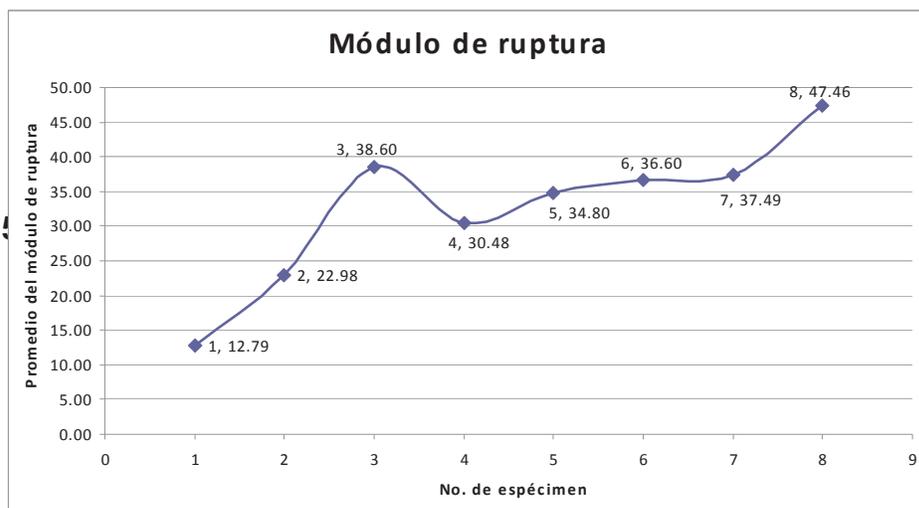
d = espesor, cm

Tabla 5.4 Prueba flexión estática. Módulo de ruptura						
Probeta	Ancho (mm)	Largo (mm)	Espesor (mm)	Carga máxima (kg _f)	Modulo de ruptura (kg _f /cm ²)	Promedio del módulo de ruptura (kg _f /cm ²)
1	52.70	304.20	12.27	4.50	20.42	12.79
1'	52.31	305.10	12.58	3.00	13.05	
1''	52.57	305.50	11.81	1.00	4.91	
2	52.57	304.60	12.11	4.70	21.95	22.98
2'	52.66	306.30	11.75	4.90	24.26	
2''	52.74	305.80	11.88	4.70	22.73	
3	52.33	304.60	10.42	6.50	41.18	38.60
3'	52.77	304.30	10.34	7.20	45.94	
3''	52.71	305.00	10.47	4.60	28.66	
4	52.93	304.00	10.65	6.60	39.58	30.48
4'	52.71	304.20	10.71	4.20	25.01	
4''	52.88	305.30	10.68	4.50	26.86	

Tabla 5.4 Prueba flexión estática. Módulo de ruptura						
Probeta	Ancho (mm)	Largo (mm)	Espesor (mm)	Carga máxima (kg _f)	Modulo de ruptura (kg _f /cm ²)	Promedio del módulo de ruptura (kg _f /cm ²)
5	52.67	305.00	11.63	6.70	33.86	34.80
5'	52.90	305.10	11.74	7.10	35.06	
5''	52.45	305.00	11.80	7.20	35.49	
6	52.49	305.20	10.91	9.00	51.86	36.60
6'	52.66	305.80	11.17	6.50	35.61	
6''	52.79	305.30	11.33	4.20	22.31	
7	52.86	305.00	10.05	5.00	33.71	37.49
7'	52.77	303.50	10.25	6.00	38.96	
7''	52.66	305.50	10.32	6.20	39.80	
8	52.83	305.40	10.25	7.00	45.40	47.46
8'	52.66	305.20	10.37	7.80	49.59	
8''	52.48	305.00	10.49	7.60	47.38	

El rango de variación del modulo de ruptura promedio de las ocho pruebas se observa en la figura 5.4.

Figura 5.4 Modulo de ruptura promedio de las ocho pruebas



Aprovechamiento de los residuos agrícolas del municipio de Álvaro Obregón en la elaboración de paneles para la construcción

Las humedades del tablero se calcularon con base en la masa seca, de acuerdo con la fórmula:

$$\text{Humedad} = (m_H - m_S) / m_S$$

De donde :

m_H = masa húmeda, g

m_S = masa seca, g

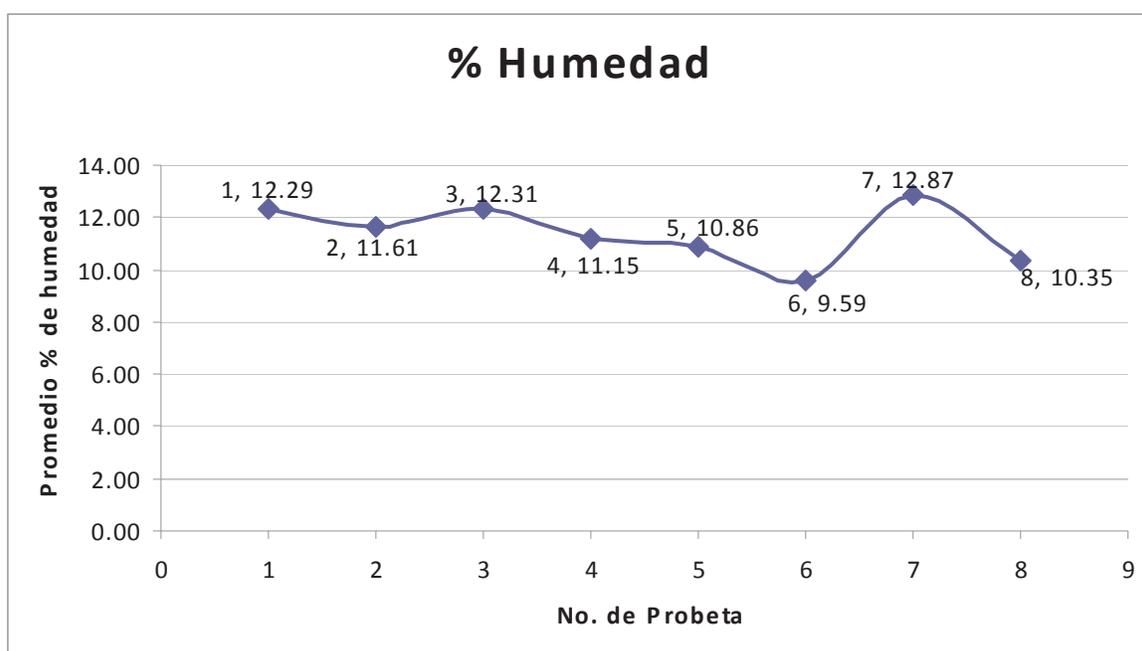
Tabla 5.5 Prueba de flexión estática. Humedad

Probeta	Masa humedad (g)	Masa seca(g)	% de humedad	Promedio % de humedad
1	108.70	96.90	12.18	12.29
1'	112.80	100.50	12.24	
1''	56.00	49.80	12.45	
2	111.50	100.00	11.50	11.61
2'	108.80	97.80	11.25	
2''	103.00	91.90	12.08	
3	105.10	94.10	11.69	12.31
3'	105.70	94.40	11.97	
3''	107.60	95.00	13.26	
4	112.60	101.10	11.37	11.15
4'	101.80	91.40	11.38	
4''	102.50	92.60	10.69	
5	107.70	96.90	11.15	10.86
5'	108.50	98.10	10.60	
5''	104.40	94.20	10.83	
6	109.60	100.00	9.60	9.59
6'	104.00	95.30	9.13	
6''	102.90	93.50	10.05	
7	104.80	92.60	13.17	12.87
7'	108.00	95.80	12.73	
7''	113.60	100.80	12.70	
8	101.30	92.20	9.87	10.35

Probeta	Masa humedad (g)	Masa seca(g)	% de humedad	Promedio % de humedad
8'	103.10	93.50	10.27	
8''	103.60	93.40	10.92	

Con el valor promedio de la humedad se encontró la siguiente gráfica: (Figura 5.5)

Figura 5.5 contenido de humedad promedio en cada una de las ocho pruebas



En la figura 5.5 se puede observar que el valor promedio de humedad para cada una de las pruebas se mantuvo dentro del rango que es de 8 a 18 %, recomendado por (A. A. Moslemi.1974).

5.1.5.2.5 Prueba de absorción de agua e hinchamiento del espesor.

Para la realización de esta prueba se sumergieron las probetas en agua destilada a una profundidad de 1 pulgada por 24 horas, como se observa en la fotografía 5.17.



Fotografía 5.17

Los resultados del hinchamiento del espesor se reportan en la tabla 5.6:

El porcentaje de hinchamiento del espesor se calculado con la siguiente fórmula:

$$\Delta e = ((e_2 - e_1) / e_1) \times 100$$

De donde:

Δe = Hinchamiento del espesor, %

e_1 = Espesor seco, mm

e_2 = Espesor después de la absorción, mm

Así mismo, en la Figura 5.5 se observa el rango de variación de hinchamiento del espesor para la ocho pruebas.

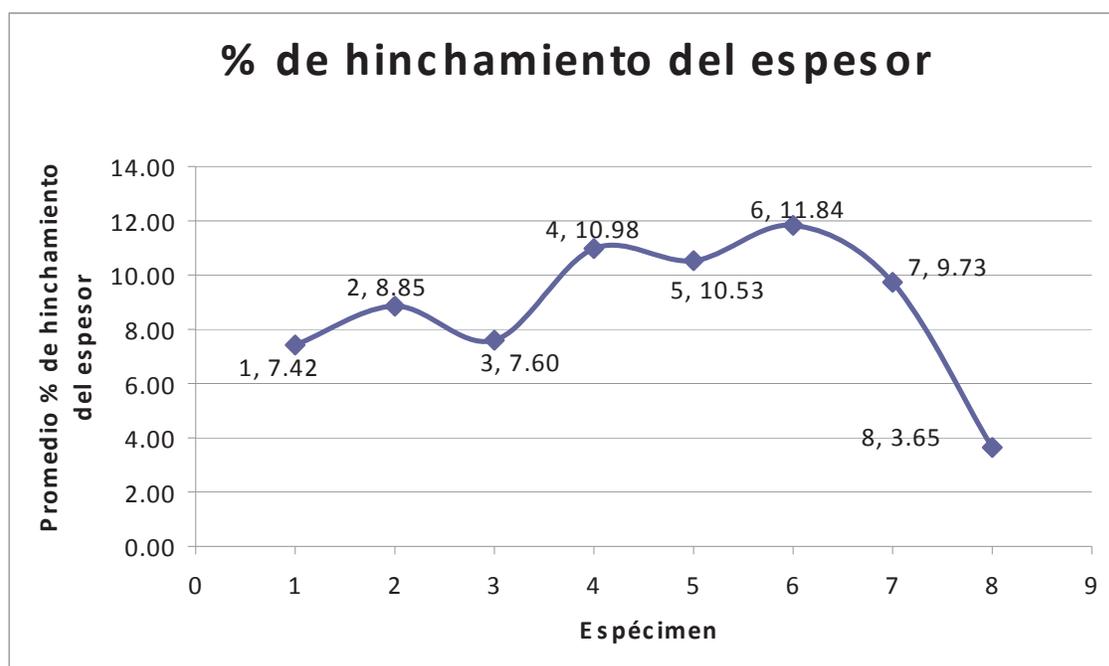
Aprovechamiento de los residuos agrícolas del municipio de Álvaro Obregón en la elaboración de paneles para la construcción

Tablas 5.6 Prueba de absorción de agua e hinchamiento del espesor

Lado	Espécimen 1			Espécimen 2			Espécimen 3			Espécimen 4		
	Largo:153.85 mm			Largo: 153.68 mm			Largo: 153.78 mm			Largo: 153.89 mm		
	Ancho:153.91 mm			Ancho: 153.84 mm			Ancho:153.97 mm			Ancho: 154.13 mm		
	e1 mm	e2 mm	Δe %	e1 mm	e2 mm	Δe %	e1 mm	e2 mm	Δe %	e1 mm	e2 mm	Δe %
1	12.09	12.66	4.71	13.38	14.53	8.59	13.38	14.53	9.22	10.16	11.24	10.63
2	11.79	12.85	8.99	12.48	13.75	10.18	12.48	13.75	7.89	10.45	11.65	11.48
3	11.62	12.61	8.52	11.96	13.24	10.70	11.96	13.24	5.89	10.49	11.60	10.58
4	11.91	12.80	7.47	12.84	13.60	5.92	12.84	13.60	7.40	10.16	11.30	11.22
Promedio			7.42			8.85			7.60			10.98

Lado	Espécimen 5			Espécimen 6			Espécimen 7			Espécimen 8		
	Largo: 153.7 mm			Largo: 1154.1 mm			Largo: 153.9 mm			Largo: 154.62 mm		
	Ancho: 153.79 mm			Ancho:153.88 mm			Ancho: 153.94 mm			Ancho: 154.78 mm		
	e1 mm	e2 mm	Δe %	e1 mm	e2 mm	Δe %	e1 mm	e2 mm	Δe %	e1 mm	e2 mm	Δe %
1	11.43	12.86	12.51	12.26	14.46	17.94	10.23	11.57	13.10	11.66	11.97	2.66
2	11.69	12.71	8.73	11.98	13.01	8.60	10.56	11.24	6.44	11.38	11.59	1.85
3	11.70	12.88	10.09	13.07	14.22	8.80	10.90	11.42	4.77	12.22	12.86	5.24
4	11.49	12.73	10.79	13.25	14.84	12.00	10.46	11.99	14.63	12.98	13.61	4.85
Promedio			10.53			11.84			9.73			3.65

Figura 5.5



La absorción de agua tabla 5.8, se calculó respecto a la masa seca y a la masa anhidra tabla 5.7, por medio de las siguientes fórmulas:

Respecto a la masa antes de sumergirlo

$$\% \text{ de Absorción de Agua} = (m_b - m_a)/m_a$$

De donde:

m_a = masa antes de sumergirlo, g

m_b = masa después de sumergirlo, g

Respecto de la masa anhidra

$$\% \text{ de Absorción de Agua} = (m_b - m_A)/m_A$$

De donde:

m_A = masa anhidra, g

m_b = masa después de sumergirlo, g

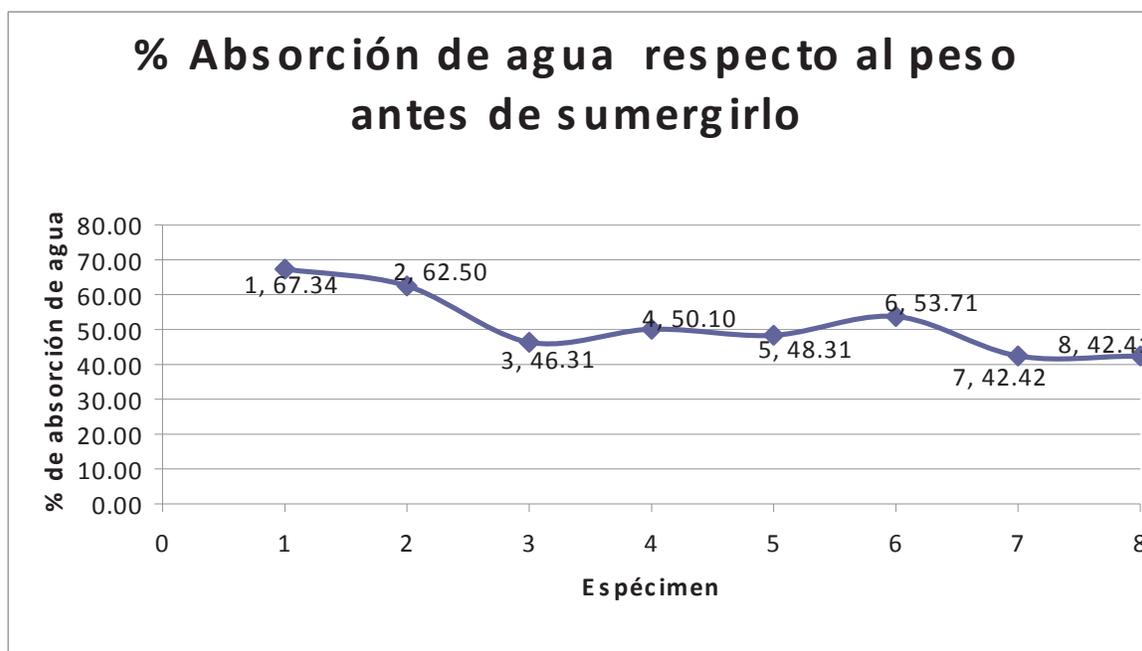
Tabla 5.7 Prueba de absorción de agua e hinchamiento del espesor			
Especimen	Masa antes de sumergirlo (g)	Masa después de sumergirlo (g)	Masa Anhidra (g)
1	143.3	239.8	118.2
2	158.4	257.4	131.7
3	162.8	238.2	136.0
4	148.1	222.3	126.0
5	160.2	237.6	145.8
6	169.8	261.0	138.7
7	162.2	231.0	139.3
8	167.9	239.1	146.7

Tabla 5.8 Prueba de absorción de agua de hinchamiento del espesor

Especimen	Absorción de Agua % Respecto al peso antes de sumergirlo	Absorción de Agua % Respecto al Peso Anhidro
1	67.34	102.88
2	62.50	95.44
3	46.31	75.15
4	50.10	76.43
5	48.31	62.96
6	53.71	88.18
7	42.42	65.83
8	42.41	62.99

Al igual que en las pruebas anteriores en la Figura 5.6, se observa el rango de variación del porcentaje de absorción de agua, respecto al peso antes de sumergirlo.

Figura 5.6



6 DISEÑO DE TOLERANCIAS

Los principales pasos que se llevan a cabo en la conducción y análisis por la metodología Taguchi son los siguientes:

- ✓ Selección de factores y/o interacciones a evaluarse.
- ✓ Selección del número de niveles para los factores.
- ✓ Selección del arreglo ortogonal (AO) apropiado.
- ✓ Asignación de factores y/o interacciones a las columnas.
- ✓ Conducción de las pruebas.
- ✓ Análisis de resultados.
- ✓ Experimento de confirmación.

6.1 Selección de factores y/o interacciones a evaluarse.

La determinación de cuáles factores se van a investigar depende de la medida de desempeño a la respuesta de interés de un producto o un proceso. El cliente, quien finalmente usa un producto, espera o necesita cierta función del mismo. Si durante las etapas iniciales de desarrollo de un producto no se proporciona la función o no se provee consistentemente, la medida de desempeño tendrá que mejorarse.

Los factores que en este trabajo se investigaron son la temperatura de prensado, la presión de prensado y el tiempo de prensado, ya que en la prensa usada son los factores que pueden controlarse y son los que tienen más importancia en el proceso. Como medida de desempeño se usó el esfuerzo máximo que da una idea de la resistencia del tablero.

Los factores de ruido que se detectaron son los siguientes:

- ✓ Tamaño de partícula
- ✓ Orientación de las partículas

- ✓ Pureza de la astilla

6.2 Selección del número de niveles

Las rondas iniciales de experimentación deben incluir muchos factores en pocos niveles; se recomiendan dos para minimizar al tamaño del experimento inicial. El grado de libertad para un factor es el número de niveles menos uno; si se incrementa el número de niveles para un factor se incrementa el número total de grados de libertad en el experimento, lo cual es una función directa del número total de pruebas.

Existen dos tipos de parámetros que pueden influir en la respuesta de un producto, parámetros continuos y discretos. Los parámetros continuos se pueden medir en una escala, desde un valor muy pequeño hasta un valor muy grande, y pueden asumir cualquier valor en medio de éstos, dependiendo de la precisión del instrumento de medición. Algunos ejemplos son la temperatura, la velocidad, la presión y el tiempo. Los parámetros directos pueden asumir solamente valores particulares, “tales como apagado y encendido” y “material A, B o C”. Si se utilizan parámetros continuos entonces el experimento inicial debe ser solamente de dos niveles.

Como los factores seleccionados para este trabajo son parámetros continuos, se utilizan dos niveles de variación. Los cuales se establecen en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1 Factores seleccionados con dos niveles de variación

Factor	Nivel Bajo	Nivel Alto
Tiempo de prensado (min)	15	18
Presión de prensado (kg/cm ²)	60	80
Temperatura de prensado (°C)	160	180

6.3 Selección del arreglo ortogonal

La selección del arreglo ortogonal a utilizarse depende:

- ✓ El número de factores e interacciones de interés.
- ✓ El número de niveles para los factores de interés.

Estas dos consideraciones determinan el total de grados de libertad requeridos para el experimento entero.

Los arreglos ortogonales para dos niveles son los siguientes:

L4 , L8 , L12 , L16 , L32

Los arreglos ortogonales de tres niveles son los siguientes:

L9 , L18 , L27

Para este trabajo se utilizó un arreglo ortogonal L8, ya que se tiene dos niveles y tres factores.

Una vez que se ha seleccionado el arreglo ortogonal apropiado, los factores y las interacciones se pueden asignar a las diferentes columnas.

6.4 Asignación de factores e interacciones

Los arreglos ortogonales tienen varias columnas disponibles para la asignación de factores y algunas columnas subsecuentemente pueden estimar el efecto de las interacciones de dichos factores.

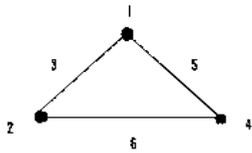
Taguchi ha proporcionado dos herramientas como apoyo en la asignación de factores e interacciones a los arreglos.

- ✓ Graficas lineales

✓ Tablas triangulares

Cada arreglo ortogonal tiene un grupo particular de gráficas lineales y una tabla triangular asociada a él. Las gráficas lineales indican varias columnas a las cuales los factores se pueden asignar, y las columnas posteriormente, evalúan la interacción de estos factores.

Para el arreglo ortogonal L8 se tiene la siguiente figura:



En las gráficas lineales el punto representa una columna disponible para un factor de dos niveles que tiene un grado de libertad. La línea representa una columna que evaluará la interacción de los factores asignados a los puntos respectivos.

Por lo que el arreglo ortogonal L8 quedaría de la siguiente manera:

Tabla 6.2 Asignación de factores e interacciones.

Corrida	Columna No.						
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

De las gráficas lineales se concluye que: para la columna 1, le corresponde el factor A que es el tiempo de prensado; para la columna 2, el factor B, para la presión de prensado; la columna 3 es equivalente a la interacción de los factores A y B; la columna 4 representa el factor C ya su vez la temperatura de prensado; así mismo las columnas 5 y 6 corresponden las interacciones entre los factores A y C y; B y C respectivamente y; por último, en la columna 7 es la correspondiente al error.

6.5 Conducción del experimento

Una vez que: se han asignado los factores a una columna particular del arreglo ortogonal seleccionado, se ha establecido la estrategia de prueba y se ha llevado a cabo la preparación física para el desarrollo, la prueba puede comenzar. Las pruebas deben hacerse de forma aleatoria, esto protege al analista de cualquier factor desconocido e incontrolable que pueda variar durante el experimento entero e influir en los resultados.

Por tanto, las corridas del experimento quedaron de la manera que se muestra en la Tabla 6.3.

Tabla 6.3 Arreglo Ortogonal L8			
No. de Prueba	Tiempo de Prensado(min)	Presión de prensado (kg/cm ²)	Temperatura de Prensado (°C)
1	15	60	160
2	15	60	180
3	15	80	160
4	15	80	180
5	18	60	160
6	18	60	180
7	18	80	160
8	18	80	180

6.6 Análisis de los resultados experimentales

La figura 5.3 muestra los resultados de las pruebas de fuerza de tensión perpendicular a la superficie se observa que:

1. Los valores puntuales más altos para el esfuerzo máximo se encuentran en las pruebas 2, 6 y 8.
2. Que los valores más altos para los promedios del esfuerzo máximo se sitúan en las pruebas 4 y 8.

6.6.1 Análisis de la Varianza del proceso.

Para el análisis de la varianza se utilizaron las siguientes formulas.

$$T = \sum_{i=1}^n Y_i$$

De donde:

Y_i = esfuerzo máximo

$$S_m = \frac{T^2}{n}$$

S_m = factor de correlación

n = número de mediciones

$$V_m = \frac{|\sum_{i=1}^n Y_i^2 - S_m|}{n - 1}$$

V_m = varianza

$$SN = 10 * \log_{10} \left| \frac{S_m - V_m}{n * V_m} \right|$$

SN = índice Señal-Ruido

Los resultados de los primeros cálculos se muestran en la siguiente tabla:

Aprovechamiento de los residuos agrícolas del municipio de Álvaro Obregón en la elaboración de paneles para la construcción

Tabla 6.4 Variancia

Corrida No.	Esfuerzos Máximos						T	Sm	Vm	SN
1	1.88	2.49	2.14	2.50	1.64	2.13	12.78	27.20	0.12	15.94
2	3.06	2.38	2.36	3.05	2.90	1.85	15.60	40.56	0.23	14.59
3	1.71	1.84	2.06	1.54	2.53	1.44	11.12	20.63	0.16	13.35
4	2.93	1.85	2.87	2.92	2.88	2.95	16.40	44.84	0.19	16.00
5	2.46	2.54	2.26	2.33	1.86	1.88	13.33	29.61	0.08	17.72
6	3.06	2.41	2.17	2.40	3.06	2.71	15.82	41.74	0.14	17.02
7	2.18	2.51	2.05	2.55	2.60	1.87	13.76	31.55	0.09	17.55
8	2.43	2.63	3.14	2.88	2.71	2.55	16.34	44.49	0.06	20.62

Después se busca para cada factor y para cada interacción la suma de sus SN, a niveles máximos y mínimos. Por ejemplo.

$$A1 = (15.94 + 14.59 + 13.35 + 16.00)$$

$$A2 = (17.72 + 17.02 + 17.55 + 20.62)$$

Con A1 y A2 se calcula la suma de los cuadrados.

$$SS_A = \frac{(A1 - A2)^2}{8}$$

Tabla 6.5 Niveles para suma de cuadrados

Factor	Niveles	
	1	2
A	59.88	72.907
B	65.265	67.523
AB	68.691	64.096
C	64.557	68.23
AC	66.927	65.86
BC	70.274	62.513
e	66.514	66.274

Los grados de libertad (GL) por factor, son iguales al número de niveles menos 1.

La Columna Ms, se calcula de dividir la Columna SS entre los grados de libertad por factor e interacción.

La Columna Fo, es el resultado de la relación del valor de la columna Ms entre el de Ms para el error.

Los resultados se muestran en la siguiente Tabla 6.6 a la que se llama Anova del agrupamiento de la varianza del error.

Tabla 6.6 Anova del agrupamiento de la varianza del error

Factor	SS	GL	Ms	Fo	FT
A	21.21	1.00	21.21	2943.79	2.00
B	0.64	1.00	0.64	88.46	
AB	2.64	1.00	2.64	366.36	
C	1.69	1.00	1.69	233.99	
AC	0.14	1.00	0.14	19.77	
BC	7.53	1.00	7.53	1044.98	
e	0.01	1.00	0.01	1.00	

Los factores e interacciones entre factores que afectan la variabilidad del proceso son los que en sus valores de Fo superan el valor de FT, que de 2, para este caso todos los factores e interacciones superan el valor de FT. Por lo tanto se tienen que corregir los datos de la siguiente manera:

Los valores de SS, son relativamente pequeños, se suman al error, sin que la suma de sus grados de libertad sea un número mayor a la mitad del total de los grados de libertad.

En este caso se sumaron los valores de SS para el factor B y la interacción AC, por lo que la Anova corregida queda de la siguiente manera:

Tabla 6.7 Anova corregida

Factor	SS 2	GI	Ms	Fo	%
A	21.21	1.00	21.21	80.85	63.63
AB	2.64	1.00	2.64	10.06	7.92
C	1.69	1.00	1.69	6.43	5.07
BC	7.53	1.00	7.53	28.70	22.59
e	0.79	3.00	0.26	1.00	0.78

De los porcentajes de variabilidad se puede concluir que el factor A que representa al tiempo de prensado afecta por si solo el 63.63 %, a la variabilidad del proceso.

La interacción entre el tiempo de prensado y la presión de prensado interacción AB afecta en un 7.92 % a la variabilidad del proceso.

La temperatura de prensado (C) por si sola afecta el 7.92 % a la variabilidad del proceso.

Por último la interacción entre la presión de prensado y la temperatura (BC) afecta en un 22.59 % a la variabilidad del proceso.

Como se desea resolver la variabilidad del proceso entonces se tiene que maximizar SN, por lo que se obtiene los valores de SN para todas las combinaciones de AB y BC, de ahí, se seleccionan las que sumados sus SN den los valores mayores, las combinaciones son las siguientes:

Combinación	SN
A1B1	30.52
A1 B2	29.36
A2B1	34.74
A2B2	38.17

La combinación coloreada corresponde a los valores máximos de SN para las posibles combinaciones entre A y B.

Combinación	SN
B1C1	29.29
B1C2	30.59
B2C1	35.27
B2C2	37.64

La combinación coloreada corresponde a los valores máximos de SN para las posibles combinaciones entre B y C.

De los valores de SN, se puede concluir que la combinación de A, B y C que maximiza SN y que da por consiguiente la menor variabilidad en el proceso es cuando A, B y C están en los niveles máximos. Los valores máximos de los tres factores se presentaron en la corrida 8, en la cual se observa que los resultados de los esfuerzos máximos son los más altos.

6.6.2 Análisis de la varianza de la media

Para el análisis de la varianza de la media, se usa los valores promedio, como los valores de SN, repitiendo el procedimiento que se usó para el análisis de la varianza.

Aprovechamiento de los residuos agrícolas del municipio de Álvaro Obregón en la elaboración de paneles para la construcción

Los valores promedios de los esfuerzos máximos son los siguientes:

SN(promedio)
2.13
2.60
1.85
2.73
2.22
2.64
2.29
2.72

Los resultados obtenidos para la suma de cuadrados son los siguientes:

Factor	Nivel		SS	GL	Fo
	1	2			
A	9.32	9.88	0.04	1.00	2.00
B	9.59	9.60	0.00	1.00	0.00
AB	9.75	9.45	0.01	1.00	0.57
C	8.50	10.69	0.60	1.00	30.96
AC	9.34	9.85	0.03	1.00	1.64
BC	9.81	9.38	0.02	1.00	1.15
e	9.79	9.40	0.02	1.00	1.00

De los resultados de la columna Fo se observa que el factor A y C al error de 2, lo que indica lo siguiente:

La temperatura de prensado y el tiempo de prensado afectan a la varianza de la media.

Como se desea maximizar la resistencia, se encuentran los valores para los que SN sean más grandes, para los factores A y C, los cuales son los siguientes.

Factor	Σ	SN
A1	9.32	2.33
A2	9.88	2.47
C1	8.50	2.12
C2	10.69	2.67

Por tanto, los valores más grandes son los valores máximos para A y C.

6.7 Decisión final

De acuerdo con los resultados del diseño de tolerancias se determina trabajar a los niveles máximos de los factores A, B y C para garantizar la máxima resistencia y la mínima variabilidad del proceso.

La corrida que cumple con estos requisitos corresponde a prueba número 8.

6.8 Experimento de confirmación

El experimento de confirmación es el paso final en la verificación de las conclusiones de la ronda previa a la experimentación. Se establecen las condiciones óptimas para los factores y niveles significativos, y se hacen varias pruebas bajo condiciones constantes.

7 VALORACIÓN ECONÓMICA

En esta parte de la investigación se realizó el cálculo simple y preliminar del costo total del producto, con el objetivo de compararlo con el costo de un tablero comercial de astilla de madera.

7.1 Determinación del número de tableros experimentales equivalentes a un tablero de tamaño comercial.

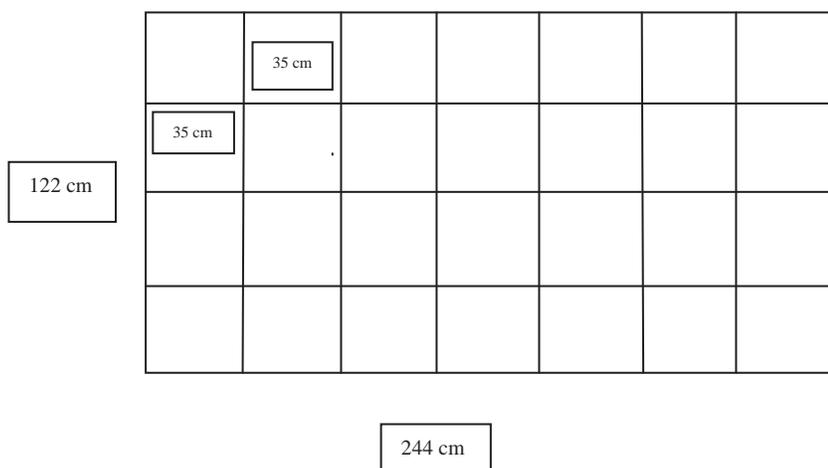
Si un tablero experimental mide 35 x 35 cm y un comercial 122 x 244 cm (4 x 8 pies), las medidas nominales de un tablero comercial pueden ser de acuerdo con la tabla 1.3.

Entonces el número de tableros experimentales por lado del tablero comercial es:

No. de tableros experimentales por lado ancho = $122 \text{ cm} / 35 \text{ cm} = 3.4857 \approx 4$

No. de tableros experimentales por lado largo = $244 \text{ cm} / 35 \text{ cm} = 6.9714 \approx 7$

No total de tableros = $4 \times 7 = 28$ tableros experimentales / tablero comercial



7.2 Masa de rastrojo de maíz y de adhesivo para un tablero de tamaño comercial.

La materia prima necesaria para cada tablero de tamaño comercial es:

Peso de astilla de rastrojo = no. de tableros experimentales x peso de astilla

Peso de astilla de rastrojo = $28 \times 550 \text{ g} = 15\,400 \text{ g} = 15.40 \text{ kg}$

Peso de adhesivo = no. de tableros experimentales x peso de adh. en tablero exp.

Peso de adhesivo = $28 \times 550 \text{ g} = 15\,400 \text{ g} = 15.40 \text{ kg}$

7.3 Costo de la materia prima de un tablero de astilla de rastrojo de maíz de tamaño comercial.

Los precios de la materia prima son los siguientes:

Precio del Rastrojo molido.

\$1.20/ kg

Hay que aclarar que este precio es el que se maneja en el Valle de Álvaro Obregón.

Precio del adhesivo (Fenol Formaldehido).

\$11.50/kg

El costo del adhesivo fue proporcionado por el Ingeniero Armando Vera de la planta Rexcel complejo Lerma.

Costo total de materias primas = $(\$1.20/\text{kg} \times 15.40 \text{ kg}) + (\$11.50/\text{kg} \times 15.40 \text{ kg})$

Costo total de materias primas = \$195.58

7.4 Costo total de un tablero de rastrojo de maíz d tamaño comercial.

Si se considera que se producen 50 tableros diarios y que la planta trabaja 300 días al año encontramos la producción anual.

No. total de tableros al año = No. de días laborables por año * No. de tableros por día

No. total de tableros al año = 300 días/año * 50 tableros / día

No. total de tableros al año = 15 000 tableros/año

Costo de materia prima por año = No. total de Tableros al año * \$ de materia prima

Costo de materia prima por año = 15 000 tableros/año * \$ 195.58/ tablero

Costo de materia prima por año = \$ 2 933 700/ año

En la industria, uno de los costos mayores en la operación es el costo de las materias primas. En la industria, el costo de las materias primas esta usualmente entre el 10 y el 50% de costo del producto total (Peters, *et al.*,1968).

Para este trabajo se tomó el 50% por ser una planta pequeña y que su operación es poco compleja, por lo tanto se tiene lo siguiente:

Costo total del producto = Costo de materia prima por año/0.50

Costo total del producto = \$ 2 933 700/ año / 0.50 = \$ 5 867 400 / año

Costo total del producto / unidad = Costo total del producto / No. total de tableros al año

Costo total del producto / unidad = \$ 5 867 400 / año / 15 000 tableros/año

Costo total del producto / unidad = **\$ 391.16 / unidad**

7.5 Comparación entre el costo de un tablero de rastrojo de maíz tamaño comercial y uno equivalente de astilla de madera.

Si se considera que el costo de los tableros comerciales es de \$ 135.00/ unidad , de medidas de 122 cm x 144 cm (4 x 8 pies) y un espesor de 12 mm.

Se observa que el costo del tablero de rastrojo de maíz tamaño comercial es aproximadamente tres veces mayor el costo de tablero comercial de astilla de madera.

El costo del adhesivo, incrementa considerablemente el costo del producto, por tanto, se requiere realizar otras investigaciones considerando otros tipos de adhesivos más económicos

8 CONCLUSIONES

Durante la experimentación nos enfrentamos con problemas propios de la manera en operar el equipo, la forma de llegar a un mezclado del adhesivo y de la partícula uniforme y un imposible acomodo de las partículas, aun así con estos problemas llegamos a estabilizar el proceso y a encontrar características físicas positivas de los tableros.

Al realizar las pruebas Físico Mecánicas en los tableros nos percatamos que los esfuerzos máximos y las cargas máximas no son tan altas como se desearía, alejándonos del uso para el que fue pensado nuestro tablero.

Las principales causas por la que se provoca estos bajos resultados en las pruebas son las siguientes:

- De la prueba Físico Mecánica de Resistencia de la Capa Interna se observa que en los puntos donde se partía el tablero, siempre encontrábamos deficiencias en la adhesión entre partícula y partícula, y en partículas de caña. Con esto se concluye que los problemas en la adhesión sean provocados por la incompatibilidad entre el adhesivo y las superficies cerosas propias de la caña.



- De la Prueba de Flexión Estática se puede observar la gran elongación del tablero y de la baja carga Máxima que tiene y que la ruptura de la probeta que casi nunca se daba en el centro que es el lugar donde se aplica la carga y que coincidentemente en la mayoría de las probetas se daba en lugares donde se encontraban pedazos de nudo de caña. Los nudos de la caña de maíz son partes duras que son difícilmente reducidas de su tamaño y que afectan de manera importante la resistencia de los tableros.



- Otro factor importante que afecta en la adherencia es el polvo que proviene del bagazo de la caña de maíz, que se mezcla con la partícula durante su molienda, así como los pocos restos de tierra que se puedan quedar en las pacas de rastrojo.

La mezcla de todos estos factores ha creado una baja sensible en la resistencia del tablero, desviándonos del uso para el que fue creado.

El tablero tiene una apariencia rústica pero difícilmente utilizable para muebles, por otro lado podemos decir que el tablero podría tener usos alternos, como por ejemplo aquellos que no estén ligados a la industria mueblera, ni a la industria de la construcción.

Por otra parte se observa que de las pruebas físico mecánicas podemos expresar las siguientes observaciones.

- El esfuerzo máximo que se obtuvo de la prueba de Fuerza de Tensión Perpendicular a la superficie, tabulados en la tabla 5.3, se ve que el valor promedio mas alto es para la pruebas 8, que es la prueba que usa valores máximos para las tres variables en nuestro proceso.
- Los resultados de la prueba de Flexión estática en la cual se midió el Módulo de Ruptura, que se representa en la figura 5.4, se observa que el valor máximo se encuentra en la prueba 8.
- De la figura 5.5 y 5.6 se observa que la prueba 8 tiene el menor % de absorción de agua y el menor % de hinchamiento del espesor.

De manera general podemos concluir que la prueba 8 es la que presenta mejores propiedades tanto físicas como mecánicas.

De los resultados de las pruebas físico-mecánicas que se realizaron a los tableros de partículas de rastrojo de maíz, propias de los paneles de partículas de madera se desprende que:

- ✓ en cuatro (densidad, humedad, % del hinchamiento del espesor y % de absorción de agua) de las seis pruebas, los valores promedio de los parámetros medidos se encuentran dentro de los rangos establecidos como referencia,
- ✓ los valores promedio correspondientes al esfuerzo máximo y al módulo de ruptura se ubican por debajo de los mínimos de referencia.

Lo que significa que la eficiencia de la adhesión del material en experimentación no corresponde a la que se requiere en un tablero, que se someterá a las cargas que soporta un panel de partículas de madera.

Por tanto, se demuestra que técnicamente es factible aprovechar los esquilmos del maíz, en la elaboración de tableros que no estén sujetos a carga, su utilidad puede estar dirigida al mercado de los aislantes, empaques, cubiertas y aparentes, por citar algunos.

Así mismo, los resultados de este trabajo cumplen con la pretensión planteada inicialmente, en el sentido de dar la pauta para continuar con investigaciones relacionadas con el aprovechamiento de residuos, contribuyendo a la conservación de los recursos naturales y a la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero. De esta manera, los beneficios ambientales que se consideran en este trabajo, podrían verse reflejados, en un futuro, en proyectos de Mecanismo de Desarrollo Limpio.

Del resultado de la valoración económica, el costo total del producto por unidad del tablero experimental tamaño comercial sobrepasa de manera importante el costo de los tableros que se encuentran en el mercado, esto se debe a la gran cantidad de adhesivo que se necesita para proveer características físicas y mecánicas aceptables, si bien se había comentado que el rastrojo de maíz es una material sumamente barato, de manera contraria el fenol formaldehído es un adhesivo costoso por lo que encárese de forma importante el producto, por lo que se hace necesario en futuras investigaciones realizar el diseño de experimentos para minimizar esta variable.

9 BIBLIOGRAFÍA

- ✓ ASTM D1037-97, Estándar Test Methods for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials.
- ✓ Clames Michael D. Lucie Ozanne y Walter L. Laureasen "Patient's Perceptios of Service Quality Simentions : An Empirical Examination of Health care in Niew Zeland " Health Marketing Quarterly, Vol. 19, No. 1, 2001, pp. 3 y ss.
- ✓ Ealy Lance ."The Methods of a quality master: An interview with Genichi Taguchi, father of quality Engineering" The McKinsey Journal,No.4, 1992. pp. 3-17
- ✓ Echenique, R. Manrique y F. Robles F. "Ciencia y Tecnología de la madera II",Textos Universitarios, Universidad Veracruzana, Xalapa Veracruz. 1993.
- ✓ Hernández Jasso Alejandrina, Técnicas de Taguchi Para la Ingeniería , Instituto Tecnológico De Morelia, 2000.
- ✓ I.N.E.G.I. Inventario de Agricultura para el estado de Michoacán, 2006.
- ✓ Manterola H., D. Cerda y J. Mira, Los residuos agricolas y su uso en la alimentación de rumiantes, Fundación para la Innovación Agraria del Ministerio de Agricultura. Santiago, Chile,1999, p. 222
- ✓ Montgomery y C. Douglas. Design and analysis of Experiments, John Wileyt & Sons, Inc., New York. 1976.

- ✓ Moslemi A. A., Particleboard, Southern Illinois University Press, Vol. 1,2, 1974.
- ✓ Peters Max S., Plant Design and Economics for Chemical Engineers. MacGraw-Hill, Ed. 2, 1968, p 128.
- ✓ Saad Antonio Miguel. Redacción, Ed. C.E.C.S.A., Quinta Impresión, 1985.
- ✓ Sámano Sánchez. Fabricación de Tableros Aglomerados de Fibra de Coco y Aserrín. Tesis de Licenciatura. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.1988.
- ✓ Taguchi, A. Genichi Elsayed , Y Thomas C. Hsiang .Quality Engienering in Production Systems. Mc Graw Hill,1989.
- ✓ Zizumbo Cortes Felipe. Estudio de Factibilidad del Proceso del Bagazo de Caña en la Fabricación de Paneles para casa Habitación. Tesis de Licenciatura. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.1990.

ANEXO I

 **CENTRO DE ESTUDIOS EN MEDIO AMBIENTE, S.C.**

INFORME DE ENSAYO

TONATIUH TENORIO FERNANDEZ
Italia No. 313
Col. Villa Universidad
Morelia, Mich

I.E. No. 756
MUESTRA No. 02

MONITOREO: La muestra de Rastrojo de Maiz fue tomada por el cliente en Diciembre del 2007.

TIPO DE MUESTRA: Rastrojo de Maiz
FECHA DE RECEPCIÓN: 21 de Julio del 2008
PERIODO DE PRUEBA: Del 21 al 25 de Julio del 2008

ANÁLISIS FISICOQUIMICO

PARÁMETROS DE LABORATORIO	U	CONCENTRACIÓN	METODOLOGÍA
DENSIDAD	g / cm ³	0.102	METODO GRAVIMETRICO
CARBONO	%	34.8	METODO VOLUMETRICO

RESPONSABLE.


Q.F.B. LUZ DE LA E. TORRES ROSAS
COORDINADOR DE LABORATORIO
CED. PROF. 1033929



LOS RESULTADOS REPRESENTAN LAS CARACTERISTICAS DE LA MUESTRA ANALIZADA. ESTE INFORME NO PODRA SER REPRODUCIDO PARCIALMENTE SIN LA AUTORIZACION PREVIA DE ESTE LABORATORIO. 324-41-72
Fax (443) 315-77-84 E-mail: cemasc@hotmail.com Morelia, Mich 1 de 1

ANEXO II

Rexcel COMPLEJO LERMA
tableros y laminados decorativos

**CERTIFICADO DE CALIDAD
RESINAS**

FECHA: 09/ABRIL / 2008
PRODUCTO: R - 5581
CLIENTE: ARMANDO VERA

BARCADA: 1000815
CANTIDAD: 15.0 kg
No. DE SELLOS: N.A.

PROPIEDAD	UNIDAD	ESPECIFICACION	RESULTADO	METODO DE PRUEBA
Apariencia	N.A.	Líquido café oscuro, libre de impurezas en suspensión	Conforme	LER-ASCAL-MA-20
Contenido de sólidos	%	45.0 - 50.0	47.5	LER-ASCAL-MA-128
Viscosidad Brookfield @ 25°C	poises	N.A.	N.A.	N.A.
Viscosidad Din @ 25°C	seg.	N.A.	N.A.	N.A.
Viscosidad Gardner Holt @ 25°C	tipo	P - R	Q	LER-ASCAL-MA-123
Densidad Relativa 25°C/25°C	tipo	1.200 - 1.250	1.220	LER-ASCAL-MA-49
pH @ 25°C	tipo	11.2 - 12.0	11.6	LER-ASCAL-MA-23
Tolerancia al agua @ 25°C	%	N.A.	N.A.	N.A.
Formaldehído Libre	%	N.A.	N.A.	N.A.
Prueba de Acelerador @ 25°C	min.	N.A.	N.A.	N.A.
Gel Time	seg.	N.A.	N.A.	N.A.
Reactividad	seg.	N.A.	N.A.	N.A.
Punto de Reblandecimiento	°C	N.A.	N.A.	N.A.
Índice de refracción @ 25°C	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.

Garantizamos que el producto ha sido analizado y aprobado por nuestro departamento de Aseguramiento de Calidad y cumple de acuerdo a nuestros métodos con las especificaciones señaladas.

JAVIER GARCIA S
ASEGURAMIENTO DE CALIDAD

Este certificado no es válido si presenta tachaduras o enmendaduras

LER-ASCA-FORT-010