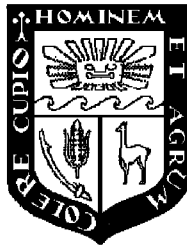


UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

Facultad de Ciencias Forestales



**INFLUENCIA DE LA PRESIÓN EN LA
ELABORACIÓN DE TABLEROS DE
FIBRAS OBTENIDOS A PARTIR DE
PAJA DE ARROZ (*Oriza sativa L.*)**

Tesis para optar el Título de
INGENIERO FORESTAL

Martín Alaín Retamoso Inuma

Lima – Perú

2005

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Los Miembros del Jurado que suscriben, reunidos para calificar la sustentación del Trabajo de Tesis, presentado por el ex-alumno de la Facultad de Ciencias Forestales, Bach. MARTÍN ALAÍN RETAMOSO INUMA, intitulado “INFLUENCIA DE LA PRESIÓN EN LA ELABORACIÓN DE TABLEROS DE FIBRAS OBTENIDOS A PARTIR DE PAJA DE ARROZ (*ORIZA SATIVA* L.)”.

Oídas las respuestas a las observaciones formuladas, lo declaramos:

.....

con el calificativo de

En consecuencia queda en condición de ser considerado APTO y recibir el título de INGENIERO FORESTAL.

La Molina, 20 Noviembre de 2005.

.....
Ing. Miguel Meléndez Cárdenas
Presidente

.....
Ing. Florencio Trujillo Cuellar
Miembro

.....
Ing. Graciela Egoavil Cueva Gálvez
Miembro

.....
Ing. Héctor Gonzáles Mora
Patrocinador

.....
Ing. Moisés Acevedo Mallque
Copatrocinador

RESUMEN

Se elaboraron tableros de fibras duros empleando pulpa de paja de arroz (*Oryza sativa* L), y distintos niveles de presión y tiempo durante el prensado en caliente. La pulpa fue obtenida mediante el proceso químico-mecánico a la soda en frío al 5%, con un rendimiento de 81,4 %. Los tableros, de 4,8 mm de espesor, se elaboraron con colofonia y sulfato de alúmina, como aditivos.

El manto fibroso (MAT), fue sometido a 4,2 kg/cm² de prensado en frío por 2 min, luego prensado en caliente en un esquema de 3 niveles de presión inicial (28,1 , 37,5 y 46,9 kg/cm²) y 3 de presión final (11,7 , 17,6 y 23,5 kg/cm²) con 3, 5 y 7 minutos como tiempo final de prensado.

Los mejores resultados de blancura (29%), incremento en volumen por hinchamiento (50%), incremento en masa por absorción de agua (62%), densidad (0.84 gr/cm³), módulo de ruptura o MOR (280 kg/cm²), módulo de elasticidad o MOE (24 miles kg/cm²), tracción perpendicular al grano o TPG (3,2 kg/cm²) y dureza (200 kg/cm²) se obtienen con paneles fabricados en condiciones medias de presión en caliente, presión inicial de 37,5 kg/cm², presión final de 17,6 kg/cm² y un tiempo final de prensado de 3 min.

ÍNDICE

	Página
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	IV
RESUMEN	V
ÍNDICE	VI
LISTA DE CUADROS	VIII
LISTA DE FIGURAS	X
1. INTRODUCCIÓN	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1 DESCRIPCIÓN DE LA MATERIA PRIMA.....	3
2.1.1 <i>DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA Y PRODUCCIÓN D LARROZ</i>	3
2.2 FIBRAS DE PLANTAS NO MADERABLES.....	5
2.3 PULPAS MECÁNICAS, DE ALTO RENDIMIENTO.....	7
2.4 LAS FIBRAS NO MADERABLES EN LA INDUSTRIA DE PANELES.....	9
2.5 FABRICACIÓN DE TABLEROS	10
2.5.1 <i>CLASIFICACIÓN</i>	10
2.5.2 <i>RESINAS PARA TABLEROS</i>	11
2.6 TABLEROS DE FIBRAS.....	12
2.6.1 <i>DEFINICIÓN</i>	12
2.6.2 <i>CLASIFICACIÓN DE LOS TABLEROS DE FIBRAS</i>	12
2.6.3 <i>FABRICACIÓN DE TABLEROS DE FIBRA</i>	14
2.6.4 <i>REQUISITOS DE TABLEROS PRENSADOS</i>	21
2.7 INFLUENCIA DE LAS VARIABLES DEL PRENSADO DURANTE LA ELABORACIÓN DE PANELES	21
2.8 TABLEROS PRENSADOS A PARTIR DE FIBRAS VEGETALES NO MADERABLES	25
2.9 PRODUCCIÓN MUNDIAL DE LA INDUSTRIA DE LOS TABLEROS.....	26
2.10 COMERCIALIZACIÓN Y USOS DE LOS TABLEROS DE FIBRAS EN EL PERÚ.....	28
3. MATERIALES Y MÉTODOS	30
3.1 LUGAR DE EJECUCIÓN	30
3.2 MATERIALES Y EQUIPOS.....	30
3.2.1 <i>MATERIA PRIMA</i>	30
3.2.2 <i>EQUIPOS</i>	30
3.2.3 <i>MATERIALES DE LABORATORIO</i>	31
3.2.4 <i>INSUMOS</i>	31
3.3 MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS.....	32
3.3.1 <i>PREPARACIÓN DE LA MATERIA PRIMA</i>	32
3.3.2 <i>ANÁLISIS QUÍMICO DE LA PAJA DE ARROZ</i>	32
3.3.3 <i>ENSAYOS PRELIMINARES PARA LA OBTENCIÓN DE PULPA DE ALTO RENDIMIENTO</i>	32
3.3.4 <i>CONDICIONES FINALES DE PULPEO</i>	33
3.3.5 <i>DRENABILIDAD</i>	33
3.3.6 <i>DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO</i>	33
3.3.7 <i>EVALUACIÓN DE LA PULPA OBTENIDA</i>	33
3.3.8 <i>ELABORACIÓN DE LOS TABLEROS DE FIBRAS</i>	34
3.4 DISEÑO ESTADÍSTICO EXPERIMENTAL	37
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	39
4.1 ANÁLISIS QUÍMICO DE LA PAJA DE ARROZ.....	39
4.2 RESULTADOS FINALES DE LA OBTENCIÓN DE PULPA DE ALTO RENDIMIENTO.....	40
4.3 EVALUACIÓN DE LA PULPA DE PAJA DE ARROZ.....	42

4.3.1	<i>Solubilidad de la Pulpa de Paja de Arroz en NaOH (1%)</i>	42
4.3.2	<i>Clasificación de Fibras</i>	42
4.3.3	<i>Longitud de Fibras</i>	43
4.4	EVALUACIÓN FÍSICO MECÁNICA DE LOS TABLEROS DE FIBRAS	44
4.4.1	<i>ESPESOR</i>	44
4.4.2	<i>CONTENIDO DE HUMEDAD</i>	46
4.4.3	<i>BLANCURA</i>	48
4.4.4	<i>INCREMENTO EN VOLUMEN POR HINCHAMIENTO</i>	50
4.4.5	<i>INCREMENTO EN MASA POR ABSORCIÓN DE AGUA</i>	53
4.4.6	<i>DENSIDAD</i>	57
4.4.7	<i>MÓDULO DE RUPTURA</i>	59
4.4.8	<i>MÓDULO DE ELASTICIDAD</i>	61
4.4.9	<i>TRACCIÓN PERPENDICULAR AL GRANO</i>	63
4.4.10	<i>DUREZA</i>	65
5.	CONCLUSIONES	68
6.	RECOMENDACIONES	69
	BIBLIOGRAFÍA	70
	ANEXO 1	74
	VALORES ORIGINALES DE ENSAYOS FÍSICOS MECÁNICOS	74
	ANEXO 2	75
	ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL ESPESOR	75
	ANEXO 3	76
	ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL CONTENIDO DE HUMEDAD	76
	ANEXO 4	77
	ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA BLANCURA	77
	ANEXO 5	78
	ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL INCREMENTO EN VOLUMEN POR HINCHAMIENTO.....	78
	ANEXO 6	79
	ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL INCREMENTO EN MASA POR ABSORCIÓN DE AGUA	79
	ANEXO 7	80
	ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA DENSIDAD.....	80
	ANEXO 8	81
	ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL MÓDULO DE RUPTURA.....	81
	ANEXO 9	82
	ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD	82
	ANEXO 10	83
	ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA TRACCIÓN PERPENDICULAR AL GRANO.....	83
	ANEXO 11	84
	ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA DUREZA.....	84

Lista de cuadros

	Página
CUADRO 1	SUPERFICIE COSECHADA, PRODUCCIÓN DE ARROZ CÁSCARA Y DISPONIBILIDAD DE PAJA DE ARROZ EN EL DEPARTAMENTO DE LAMBAYEQUE, DURANTE EL PERIODO 1995 – 2001.5
CUADRO 2	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DE ALGUNAS FIBRAS NO MADERABLES COMPARADAS CON FIBRAS DE MADERA.7
CUADRO 3	CLASIFICACIÓN DE LAS PULPA MECÁNICAS DE ALTO RENDIMIENTO9
CUADRO 4	EVOLUCIÓN DE LA PRODUCCIÓN MUNDIAL DE PULPA DE MADERA Y DE OTRAS FIBRAS NO MADERABLES DURANTE EL PERIODO 1980 – 2000.....10
CUADRO 5	USO DE RESINAS SINTÉTICAS EN LA INDUSTRIA DE LOS PANELES.11
CUADRO 6	CLASIFICACIÓN DE LOS TABLEROS DE FIBRAS EN BASE A SU DENSIDAD.....13
CUADRO 7	REQUERIMIENTOS FÍSICOS Y MECÁNICOS DE LOS TABLEROS DE FIBRAS. ...13
CUADRO 8	VALORES DE ALGUNAS PROPIEDADES MECÁNICAS REQUERIDOS PARA PANELES PENSADOS.21
CUADRO 9	INFLUENCIA DEL TRATAMIENTO QUÍMICO* DE PULPEO Y DE LA PRESIÓN FINAL DE PENSADO SOBRE LAS PROPIEDADES DE TABLEROS DE FIBRAS DUROS OBTENIDOS A PARTIR DE LA MADERA DE PASHACO (PARKIA NITIDA).23
CUADRO 10	INFLUENCIA DEL TIEMPO DE PENSADO, A 165 °C, SOBRE LOS VALORES DE DOS PROPIEDADES DE TABLEROS DE FIBRAS OBTENIDOS A PARTIR DE KENAF (HIBISCUS CANNABINUS).23
CUADRO 11	INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DE PENSADO EN LAMINAS* DE ABETO BLANCO (PICEA GLAUCA).24
CUADRO 12	VALORES DE RESISTENCIA FÍSICO – MECÁNICA DE TABLEROS DE FIBRAS DUROS OBTENIDOS POR VÍA HÚMEDA DE UNA MEZCLA DE FIBRAS DE TALLOS DE MAÍZ Y MADERA25
CUADRO 13	VALOR DE IMPORTACIÓN DE TABLEROS DE FIBRAS DUROS QUE NO POSEEN TRABAJO MECÁNICO NI RECUBRIMIENTO SUPERFICIAL (DENSIDAD>0.8G/CM ³).29
CUADRO 14	ENSAYOS PRELIMINARES PARA LA OBTENCIÓN DE PULPA PARA LA ELABORACIÓN DE TABLEROS DE FIBRA.33
CUADRO 15	TIEMPOS PARA CADA ETAPA DE PENSADO EN CALIENTE, DEL PRESENTE ESTUDIO.36
CUADRO 16	VALORES DE LOS NIVELES DE LAS VARIABLES UTILIZADAS EN LA ELABORACIÓN DE TABLEROS DE FIBRAS DUROS A PARTIR DE PAJA DE ARROZ (ORIZA SATIVA L.).....38
CUADRO 17	RESULTADOS DEL ANÁLISIS QUÍMICO DE LA PAJA DE ARROZ.39
CUADRO 18	RESULTADOS PROMEDIO DE PULPA DE ALTO RENDIMIENTO DE PAJA DE ARROZ.....41
CUADRO 19	EFFECTO DE LA CANTIDAD DE HIDRÓXIDO DE SODIO Y LA DRENABILIDAD DE PULPA DE ALTO RENDIMIENTO DE PAJA DE ARROZ (ORYZA SATIVA).....41
CUADRO 20	SOLUBILIDAD DE LA PULPA DE PAJA DE ARROZ EN UNA SOLUCIÓN DE HIDRÓXIDO DE SODIO (1%).....42

CUADRO 21	CLASIFICACIÓN DE FIBRAS MEDIANTE EL FRACCIONADOR BAUER – MCNETT DE 10 G (BMS) DE PULPA DE PAJA DE ARROZ	43
CUADRO 22	INFLUENCIA DE LA PRESIÓN SOBRE ALGUNAS PROPIEDADES DE TABLEROS LVL* DE ÁLAMO (POPULUS SP).....	58

Lista de figuras

	Página
FIGURA 1 SUPERFICIE COSECHADA Y PRODUCCIÓN NACIONAL DE ARROZ CÁSCARA EN EL PERIODO 1990 – 2001.....	4
FIGURA 2 ESTRUCTURA ANATÓMICA DE LA PAJA DE ARROZ.....	6
FIGURA 3 PRODUCCIÓN MUNDIAL DE PULPA MECÁNICA Y QUÍMICA DURANTE EL PERIODO 1980-2000.	8
FIGURA 4 DISEÑOS TÍPICOS DE PLACAS DE REFINADOR. FUENTE: KURDIN (1990)	16
FIGURA 5 DIAGRAMAS DE PENSADO EN CALIENTE EN LA PRODUCCIÓN DE TABLEROS DE FIBRAS. FUENTE: KOLLMAN (1975) Y GARCÍA ET AL (2002).....	19
FIGURA 6 INFLUENCIA DEL CONTENIDO DE PAJA DE ARROZ EN LA ELABORACIÓN DE TABLEROS DE PARTÍCULAS. FUENTE: YANG ET AL (2003)	26
FIGURA 7 PROYECCIÓN DE LA DEMANDA REGIONAL DE TABLEROS PENSADOS DURANTE EL PERIODO 1994 – 2010.....	26
FIGURA 8 VALOR PROYECTADO DE LA DEMANDA MUNDIAL, AL 2010, DE TRES TIPOS DE TABLEROS PENSADOS; AÑO BASE1996.	27
FIGURA 9 EVOLUCIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE TABLEROS DE FIBRAS DUROS OBTENIDOS POR VÍA HÚMEDA DURANTE EL PERIODO 1995 – 2002. FUENTE: FAO (2004)	28
FIGURA 10 DIAGRAMA DE PROCESO DE ELABORACIÓN DE LOS TABLEROS DE FIBRAS.	34
FIGURA 11 ESQUEMA DE PENSADO EN CALIENTE PARA LA OBTENCIÓN DE LOS TABLEROS DE FIBRAS.	36
FIGURA 12 HISTOGRAMA Y POLÍGONO DE FRECUENCIA DE LAS FIBRAS RETENIDAS SOBRE LA MALLA # 30.	43
FIGURA 13 HISTOGRAMA Y POLÍGONO DE FRECUENCIA DE FIBRAS RETENIDAS EN LA MALLA # 50.....	44
FIGURA 14 SUPERFICIE DE RESPUESTA DE LAS VARIACIONES DEL ESPESOR DE LOS TABLEROS DE FIBRAS EN FUNCIÓN DE LAS VARIACIONES DE LOS VALORES DE PRESIÓN INICIAL Y FINAL.....	45
FIGURA 15 SUPERFICIE DE RESPUESTA DE LAS VARIACIONES DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE LOS TABLEROS DE FIBRAS EN FUNCIÓN DE LAS VARIACIONES DE LOS VALORES DE PRESIÓN INICIAL Y FINAL.	47
FIGURA 16 INFLUENCIA DE LA PRESIÓN Y LA TEMPERATURA DURANTE EL PENSADO EN CALIENTE SOBRE EL CONTENIDO DE HUMEDAD EN LÁMINAS DE ABETO BLANCO. FUENTE: TABARSA Y CHUI (1997)	48
FIGURA 17 SUPERFICIE DE RESPUESTA DE LAS VARIACIONES DE LA BLANCURO DE LOS TABLEROS DE FIBRAS EN FUNCIÓN DE LOS VALORES DE PRESIÓN INICIAL Y FINAL.	49
FIGURA 18 SUPERFICIE DE RESPUESTA DE LAS VARIACIONES DEL INCREMENTO DEL VOLUMEN DE LOS TABLEROS DE FIBRAS EN FUNCIÓN DE LAS VARIACIONES DE LOS VALORES DE PRESIÓN FINAL Y TIEMPO.....	50
FIGURA 19 INFLUENCIA DE LA PRESIÓN Y LA TEMPERATURA DURANTE EL PENSADO EN CALIENTE DE LÁMINAS DE ABETO BLANCO. FUENTE: TABARSA Y CHUI (1997).....	52

FIGURA 20	SUPERFICIE DE RESPUESTA DE LAS VARIACIONES DEL AUMENTO DE MASA POR ABSORCIÓN DE AGUA DE LOS TABLEROS DE FIBRAS EN FUNCIÓN DE LAS VARIACIONES DE LOS VALORES DE PRESIÓN INICIAL Y FINAL.....	53
FIGURA 21	INFLUENCIA DE LA DENSIDAD EN EL INCREMENTO EN MASA DE ESTRATOS DE MDF SUMERGIDOS EN AGUA POR 8 HORAS.	55
FIGURA 22	SUPERFICIE DE RESPUESTA DE LAS VARIACIONES DEL INCREMENTO EN MASA POR ADSORCIÓN DE AGUA DE LOS TABLEROS DE FIBRAS EN FUNCIÓN DE LAS VARIACIONES DE LOS VALORES DE PRESIÓN INICIAL Y TIEMPO.....	56
FIGURA 23	SUPERFICIE DE RESPUESTA DE LAS VARIACIONES DE LA DENSIDAD DE LOS TABLEROS DE FIBRAS EN FUNCIÓN DE LAS VARIACIONES DE LOS VALORES DE PRESIÓN INICIAL Y FINAL.....	57
FIGURA 24	SUPERFICIE DE RESPUESTA DE LAS VARIACIONES DEL MODULO DE RUPTURA DE LOS TABLEROS DE FIBRAS EN FUNCIÓN DE LOS VALORES DE PRESIÓN INICIAL Y PRESIÓN FINAL.	60
FIGURA 25	SUPERFICIE DE RESPUESTA DE LAS VARIACIONES DEL MODULO DE ELASTICIDAD DE LOS TABLEROS DE FIBRAS EN FUNCIÓN DE LOS VALORES DE PRESIÓN INICIAL Y PRESIÓN FINAL.	61
FIGURA 26	SUPERFICIE DE RESPUESTA DE LAS VARIACIONES DE LA TRACCIÓN PERPENDICULAR AL GRANO DE LOS TABLEROS DE FIBRAS EN FUNCIÓN DE LOS VALORES DE PRESIÓN INICIAL Y PRESIÓN FINAL.....	63
FIGURA 27	SUPERFICIE DE RESPUESTA DE LAS VARIACIONES DE LA DUREZA DE LOS TABLEROS DE FIBRAS EN FUNCIÓN DE LAS VARIACIONES DE LOS VALORES DE PRESIÓN INICIAL Y PRESIÓN FINAL.	65

1. INTRODUCCIÓN

Las pulpas celulósicas son productos de gran demanda para la producción de papeles, cartones, tableros y derivados celulósicos. En el Perú, no existe suministro de madera para la obtención de pulpas celulósicas, influenciado, aparentemente, por la falta de planificación para el desarrollo de plantaciones forestales con fines industriales. Una alternativa de solución es la de utilizar especies forestales apropiadas para este tipo de industria; sin embargo en el país la política forestal en ese sentido no ha sido exitosa. Por otro lado, el reciclado de fibras es una opción interesante, pero su uso no garantiza una buena calidad del material debido a la gradual degeneración de las propiedades de las fibras en cada ciclo de uso.

Uno de los productos obtenidos a partir de las pulpas celulósicas son los tableros de fibras; ellos se utilizan como complemento en la elaboración de muebles, paneles divisores de ambiente, cielos rasos, y recubrimiento interno de carrocerías. Para su fabricación se emplean las pulpas de alto rendimiento, debido a que estas poseen un alto grado de lignina residual. La plastificación de la lignina va a permitir la cohesión entre fibras y la consolidación final del tablero; evitándose de esta forma, el uso de adhesivos sintéticos. Además de esta ventaja, las pulpas de alto rendimiento permiten un aprovechamiento integral de la materia prima, superior al 80 %. A pesar de su importancia económica, los tableros de fibras duros no se elaboran en el Perú, recurriéndose a la importación para satisfacer la demanda local. Actualmente, en el mercado nacional, el consumo de tableros de fibras ha mostrado un aumento, evaluado a través de sus importaciones. Según información estadística de la SUNAT (2005), dentro del periodo 1999 – 2003 las importaciones de tableros de fibras duros aumentaron de 2,0 millones a 3,3 millones \$US, demostrando así la creciente demanda que existe para estos tipos de paneles.

Entre los métodos de producción de pulpas celulósicas, muchos países han optado por la utilización de nuevas tecnologías que permitan un mejor aprovechamiento del recurso y así reducir o evitar la contaminación del medio ambiente. Las pulpas de alto rendimiento cumplen con estas expectativas, ya que, por su alta productividad, se reduce los costos de pulpeo además de disminuir la cantidad de efluentes. De otro lado, como alternativa a la escasez de recursos maderables, se plantea la posibilidad de aprovechar nuevas fuentes de fibras a partir de recursos vegetales no madereros dentro de las que destacan los residuos de cultivos agrícolas. Por lo

general estas materias primas fibrosas son de ciclo anual, se encuentran disponibles en grandes cantidades, su costo de generación es mínimo y son de fácil procesamiento, por ser materiales muy reactivos.

Dentro de los residuos de cultivos agrícolas de mayor distribución y abundancia que posee el Perú, se encuentra la paja de arroz, cereal caracterizado por tener un alto contenido de sílice, de hasta 16%, según Monterola et al (1999). En la última década el área nacional destinada para este cultivo se ha duplicado; solo en el departamento de Lambayeque se generaron 650 mil toneladas de paja de arroz para el año 2001 según los datos estadísticos del Ministerio de Agricultura (2005); cantidad más que suficiente como para producir la misma cantidad de tableros que actualmente se importa.

De otro lado, para la producción de tableros de fibras, es necesario conocer las variables óptimas del proceso por lo que es necesario conocer, por ejemplo, el contenido de humedad del manto de fibroso antes del prensado, la influencia de la presión, tiempo y temperatura de prensado. El control de estas variables permitiría optimizar el proceso además de influir sobre la calidad de los tableros producidos, sobre todo si se desea estudiar nuevas materias primas.

En el presente trabajo se evaluó el comportamiento de la paja de arroz a un pulpeo de alto rendimiento así como las propiedades físicas y mecánicas de los tableros de fibras elaborados en distintos niveles de presión y tiempo de prensado. Con la información que se obtenga en el presente trabajo de investigación, se espera contribuir al conocimiento existente en el tema, así como servir de base a futuras investigaciones para un desarrollo tecnológico y un aprovechamiento de la paja de arroz utilizando tecnologías limpias

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 DESCRIPCIÓN DE LA MATERIA PRIMA

Tinarelli (1989), identifica al arroz de la siguiente manera:

Clase: Monocotiledónea

Orden: Glumiflorales

Familia: Gramineae

Sub familia: Poaceae

Tribu: Oryzeae

Género: Oryza

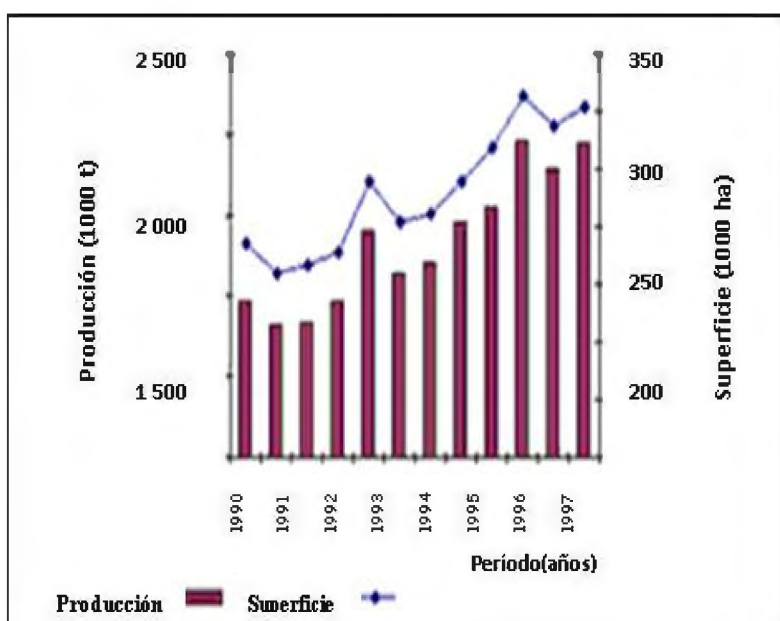
Especie: Oryza sativa L.

Grist (1975), señala que el arroz es una gramínea que pertenece al género *Oryza*, cuyo tallo es de forma cilíndrica, derecho, hueco, nudoso con médula esponjosa, veloso, débil hacia la espiga, muy semejante a la del trigo. La altura de los tallos varía desde los 0,75 m hasta los 2,00 m; las hojas son largas, lineales y puntiagudas, ásperas al tacto, alternas y lanceoladas. Las flores son hermafroditas dispuestas en espiguillas, cuyo conjunto constituye una panoja, el fruto es un grano oblongo, aovado, inodoro y algo azucarado, despojado de la cascarilla o del pericarpio que lo envuelve, el grano de arroz aparece dotado de cierta transparencia.

2.1.1 DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA Y PRODUCCIÓN DEL ARROZ

Chandler (1984), manifiesta que el arroz es un cultivo tropical y subtropical, ampliamente difundido en todos los continentes con excepción de la Antártida. La siembra de este cultivo se extiende desde la línea del Ecuador hasta los 53° de latitud norte y 40° de latitud sur, desde el

nivel del mar hasta los 2 400 msnm. Según el Ministerio de Agricultura (2005), el cultivo del arroz se encuentra ampliamente difundido en costa norte y sur, selva alta y baja, siendo las principales zonas arroceras del país los departamentos de Lambayeque, La Libertad y San Martín, que representan el 52 % de la producción nacional. En la figura 1 se observa que la producción de arroz cáscara, durante el período 1990 - 2001 aumentó progresivamente, alcanzando cerca de los dos millones t en el año 2001. Asimismo los rendimientos de arroz cáscara aumentaron de 5,2 a 6,4 t/ha en el periodo antes mencionado, hasta el 2001 este cultivo ocupa una superficie plantada de más de 300 mil ha. La producción elevada está vinculada a la abundancia del recurso hídrico de la zona de plantación y de sus condiciones climáticas.



Fuente: Ministerio de agricultura (2005).

Figura 1 Superficie Cosechada y Producción Nacional de Arroz Cáscara en el Periodo 1990 – 2001.

En la actualidad el departamento de Lambayeque es el mayor productor de arroz cáscara en el Perú, abarcando el 23 % de la producción nacional, por lo tanto, es el departamento que posee la mayor cantidad de paja de arroz. Seguidamente en el cuadro 2 se muestra la producción de arroz cáscara y la disponibilidad de paja de arroz que posee este departamento.

Cuadro 1 Superficie Cosechada, Producción de Arroz Cáscara y Disponibilidad de Paja de Arroz en el Departamento de Lambayeque, durante el periodo 1995 – 2001.

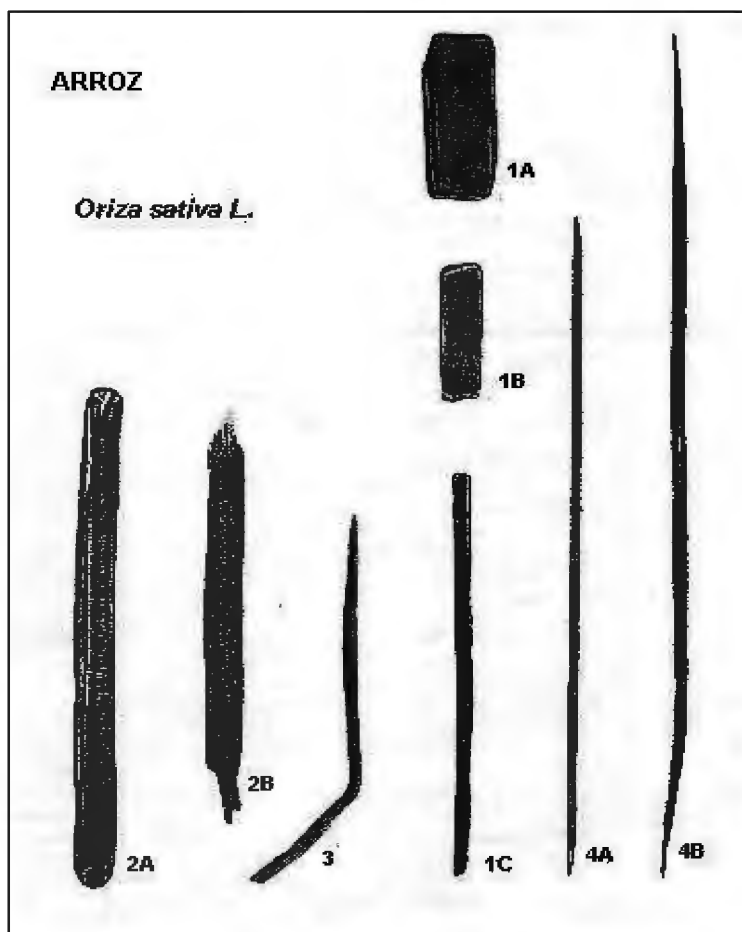
Años	Superficie Cosechada (ha)	Producción de arroz cáscara (tn)	*Cantidad de paja de arroz (tn)	*Rendimiento de paja de arroz (tn/ha)
1995	41 804	273 445	410 168	12.812
1996	41 193	235 445	353 168	8.562
1997	29 682	157 363	263 045	7.953
1998	45 726	293 594	440 391	9.632
1999	54 588	436 971	655 457	12.008
2000	49 654	417 171	625 757	12.603
2001	51 195	435 160	652 740	12.750

* Valor que resulta de multiplicar la producción de arroz cáscara por el factor 1,5 según FAO, citado por Rosales (1992).

Fuente: Ministerio de Agricultura (2005)

2.2 FIBRAS DE PLANTAS NO MADERABLES

Libby (1974), menciona que las fibras vegetales son células fusiformes de paredes más o menos gruesas con extremos reducidos, que en la pulpa va acompañado por otras partes constitutivas como son las células de parénquima, vasos, pelos, epidermis, etc. Los cuales en algunos casos sirven para caracterizar la clase de vegetal de donde proceden. Al mismo tiempo tienen lugar disposiciones de materias inorgánicas (incrustaciones) en forma de carbonato, oxalato de calcio y ácido silícico, que se encuentran especialmente en la epidermis de plantas herbáceas. En la figura 2 (Coté 1980), se presenta la estructura anatómica que conforma a la paja de arroz: células de parénquima, vasos, traqueidas y fibras.



Leyenda: 1A, 1B y 1C: Células de Parénquima (185x); 2A y 2B: Vasos (185x); 3: Traqueida (185x); 4A y 4B: Fibras (185x y 15x).

Fuente: Coté (1980)

Figura 2 Estructura Anatómica de la Paja de Arroz.

Han (1998), indica que las plantas no maderables o de residuos agrícolas poseen una gran variación en sus características anatómicas y químicas si se las compara con fibras de plantas maderables, tal como se aprecia en el cuadro 2. Estas propiedades están influenciadas por la edad de la planta, la parte botánica analizada (tallo, raíces, hojas) y de las distintas secciones del tallo (la base o el tope del tallo).

Cuadro 2 Características Físicas y Químicas de Algunas fibras No Maderables Comparadas con Fibras de Madera.

Grupo	Longitud de Fibras (µm)	Diámetro de Fibras (µm)	Celulosa (%)	Lignina (%)	HC (%)	Cenizas (%)	Sílice (%)
Paja de Arroz	400 – 3 400	4 - 16	28 - 48	12 - 16	23 - 28	15 - 20	9 - 14
Paja de Trigo	400 – 3 200	8 – 34	29 - 51	16 - 21	26 - 32	4,5 - 9	3 - 7
Paja de Cebada	600 – 3 100 a	7 – 24 a	31 - 45	14 - 15	24 - 29	5 - 7	3 - 6
Paja de Avena	600 – 3 100 a	7 – 24 a	31 - 48	14 - 19	27 - 38	6 - 8	4 - 6,5
Paja de Centeno	600 – 3 100 a	7 – 24 a	33 - 50	14 - 19	27 - 30	2 - 5	0,5 - 4
Caña de Azúcar	800 – 2 800	10 – 34	32 - 48	19 - 24	27 - 32	1,5 - 5	0,7 - 3,5
Tallo de maíz	500 – 2 900	14 – 24	32 – 35 b	16 – 27 b	-	-	-
Bambú	1 500 – 4 400	7 – 27	26 – 43	21 – 31	15 - 26	1,7 - 5	0,7
Kenaf	2 000 – 6 000	14 – 33	44 – 57	15 – 19	22 - 23	2 - 5	-
Cáñamo	5 000 – 5 500	10 – 51	57 – 77	9 – 13	14 - 17	0,8	-
Maderas de Coníferas	2 700 – 4 600 a	32 – 43 a	40 – 45	26 – 34	7 - 14	< 1	-
Maderas de latifoliadas	300 – 2 500 b	10 – 45 b	38 – 49	23 – 30	19 - 26	< 1	-

Leyenda: HC: hemicelulosas.

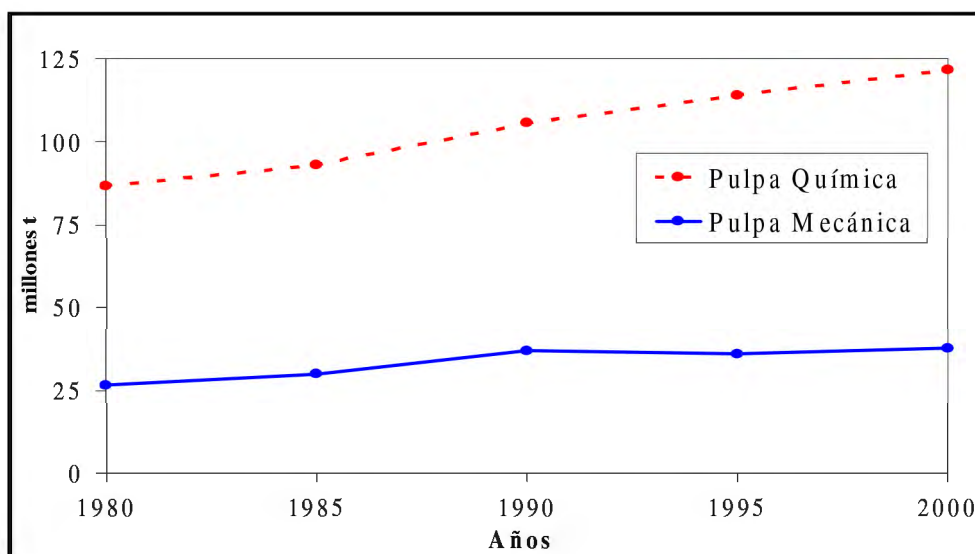
Fuente: Hang (1998), Misra (1990) a, Rowell (2001) b

Asimismo Misra (1990), menciona que los tallos que forman la paja de arroz son elásticos, tubulares y están conectados a intervalos mediante nudos. Las fibras de paja de arroz son mucho más heterogéneas que las fibras de madera, cuyas dimensiones en cuanto a longitud varían de 650 µm a 3 480 µm y en diámetro de 5 µm a 14 µm. Además agrega que la paja de arroz posee un bajo contenido de celulosa y lignina pero un alto porcentaje de pentosanos (hemicelulosas), en comparación con la madera, mientras que el contenido de ceniza y sílice de la paja de arroz es más elevado que el de plantas maderables.

2.3 PULPAS MECÁNICAS, DE ALTO RENDIMIENTO

Respecto a las pulpas de alto rendimiento, Valade et al (1999), mencionan que desde los años 60, se fabrica, a escala comercial, pulpas refinadas que corresponden a un nuevo tipo de pulpas mecánicas. Estas pulpas conforman las llamadas pulpas de alto rendimiento, con un valor

superior al 85 % de rendimiento comparado con un 45 a 50 % de rendimiento promedio de las pulpas químicas. Las características comunes de las pulpas de alto rendimiento son su elevado contenido de lignina y la mezcla de diferentes fracciones fibrosas, que incluyen fibras largas, cortas, finos y paquetes de fibras no separadas o shives. Por otro lado, según FAO (2004), la producción de pulpa mecánica ha mostrado un crecimiento constante en las dos últimas décadas, aumentando su producción de 27 millones de t para el año 1980 a 38 millones de t para el año 2000. En la actualidad la producción de pulpa mecánica abarca el 23 % de la producción mundial de pulpa. En la figura 3 se muestra la evolución de la producción mundial de pulpas química y mecánica durante el periodo 1980 – 2000.



Fuente: FAO (2004)

Figura 3 Producción Mundial de Pulpa Mecánica y Química durante el Periodo 1980-2000.

Por otro lado Cooper (1987), en el cuadro 3, clasifica a las pulpas de alto rendimiento en dos grandes grupos: Pulpas puramente mecánicas y pulpas químico mecánicas.

Cuadro 3 Clasificación de las Pulpa Mecánicas de Alto Rendimiento

Tipo de Pulpa	R (%)	Características Generales
Pulpas puramente mecánicas		
SGW	93-98	Solo usa desfibrador de piedra.
PGW	>95	Usa desfibrador de piedra presurizado.
RMP	90-95	Solo usa desfibrador de disco.
TMP	85-90	Las astillas son tratadas en vapor por encima de 100 OC antes del desfibrado.
Pulpas químico mecánicas (CTMP)		
Pulpas de suave tratamiento químico	90-93	Las astillas son tratadas en una solución de hidróxido de sodio a una temperatura < 80 OC (medio alcalino), sulfito o bisulfito de sodio (sulfonación) a altas temperaturas.
Pulpas químicamente modificadas	>90	Aplica un tratamiento químico de sulfonación intermedio, entre dos etapas de refinado.
Pulpas de una alta modificación química	85-90	Astillas tratadas en medio alcalino o en una solución de sulfito o bisulfito de sodio a altas temperaturas.

Leyenda: R: rendimiento; SGW: stone ground wood; PGW: pressure ground wood; RMP: refiner mechanical pulp; TMP: thermomechanical pulp; CTMP: chemical thermomechanical pulp.

Fuente: Cooper (1987)

2.4 LAS FIBRAS NO MADERABLES EN LA INDUSTRIA DE PANELES

Bublitz (1990), indica que si bien la mayor parte de la pulpa se obtiene de la madera, en los lugares con un recurso limitado de madera la pulpa se produce comercialmente en base a plantas anuales. Dentro de estas plantas anuales se encuentran los residuos agrícolas, algunos de las cuales constituyen una fuente excelente de fibras para la industria de pulpa. La paja de diferentes cereales, como el arroz, el trigo, el centeno y la cebada forman parte de éstos residuos agrícolas, cuyos rendimientos oscilan entre 2,2 t/ha hasta 22,0 t/ha. En general, los residuos agrícolas se pueden cosechar después de un año, lo que se compara con los 10 a 20 años que necesitan las especies maderables para ser cosechadas. Asimismo FAO (2001), menciona que la pulpa de materiales fibrosos distintos a la madera se utiliza tanto en la fabricación de papeles, cartones y tableros de fibras. Dentro de estas pulpas se encuentran las pajas de cereales, bambú, esparto, bejuco, fibras de algodón, lino, cáñamo, trapos, y desechos textiles; excluyéndose la pulpa de papel recuperado. FAO (2004), agrega que durante el periodo 1980 – 2000 la producción de pulpa de plantas no maderables se incrementó de 6 % a 11 % tal como se observa en el cuadro 4.

Cuadro 4 Evolución de la Producción Mundial de Pulpa de Madera y de otras Fibras No Maderables durante el periodo 1980 – 2000.

Años	Pulpa de Madera		Pulpa No Maderable		Total
	10 ⁶ t	%	10 ⁶ t	%	%
1980	125	94	7	6	100
1985	135	92	10	8	100
1990	155	91	15	9	100
1995	161	86	25	14	100
2000	171	89	19	11	100

Fuente: FAO (2004)

Según Misra (1990), el aumento en la utilización de paja para la producción de pulpa se puede explicar debido a que en los países de Europa, donde el suministro de madera es limitado y la compra de pulpa de madera es demasiado costosa, la paja de distintos cereales ha surgido como alternativa de materia prima para la industria de pulpa. Asimismo el desarrollo en la utilización de las pajas de cereales ha tenido lugar en muchos países en desarrollo, entre los que destacan la China y la India, que según FAO (2004), abarcaron el 73 % y el 7 % respectivamente de la producción mundial de pulpa de plantas no maderables para el año 2000.

2.5 FABRICACIÓN DE TABLEROS

2.5.1 CLASIFICACIÓN

Youngquist (1999), clasifica a los tableros de acuerdo al tipo de material utilizado:

- Láminas :Tableros contraplacados (Triplay), LVL (Laminated veneer lumber)
- Partículas :Tableros de partículas, OSB (oriented strandboard)
- Fibras : Tableros aislantes, tableros de densidad media (MDF), tableros de fibras duros

2.5.2 RESINAS PARA TABLEROS

A) RESINAS SINTÉTICAS

Maloney (1977) y Youngquist (1999), mencionan que son cuatro tipos de resinas sintéticas las que se usan en la industria de los paneles. En el cuadro 5 se muestra los tipos de resinas sintéticas que se utilizan en la industria de los paneles.

Cuadro 5 Uso de Resinas Sintéticas en la Industria de los Paneles.

Tipo de Resina	Temperatura de polimerización	Usos de las resinas en la industria de tableros
urea formaldehído (UF)	140 °C -165 °C	contraplacados, partículas, MDF
Melamina formaldehído (MF)	160 °C -180 °C	tableros melamínicos y decorativos
Fenol formaldehído (PF)	180 °C -190 °C	contraplacados, LVL, OSB
difenil metano de isocianato (MDI)	177 °C - 204 °C	OSB

Fuente: Maloney (1977), Youngquist (1999), Sellers (2001)

Los mismos autores afirman que el 90 % de los paneles lignocelulósicos son manufacturados con resina de urea formaldehído debido a que es más económica, polimeriza más rápido, y le otorga al panel una superficie suave y brillante que las otras resinas. Los tableros fabricados en base a esta resina están diseñados para ser utilizados en interiores. La resina de fenol formaldehído es usada en la manufactura de productos que requieren regular grado de durabilidad en exteriores. Esta resina requiere un mayor tiempo de prensado y elevados niveles de temperatura, aumentando de esta forma, el consumo de energía y encareciendo su costo. Por otro lado la resina de melamina formaldehído posee características intermedias tanto en su costo como en su performance que las resinas antes mencionadas. Las resinas de isocianato son las más elevadas en costo pero son excelentes ligantes, otorgando a los tableros características superiores en cuanto a durabilidad en ambientes externos que tableros prensados con fenol formaldehído.

B) RESINAS NATURALES

Maloney (1977) y Youngquist (1999), indican que existen algunas opciones para utilizar resinas naturales, provenientes de la caseína, harina de soya, taninos y de la lignina. Los taninos presentan grupos fenólicos naturales los cuales pueden ser modificados al reaccionar con formaldehído y producir una buena resina. La resina proveniente de taninos es usado comercialmente en la fabricación de tableros contraplacados y de partículas, en países como

Australia, Argentina y Finlandia. Para el caso de tableros obtenidos por vía húmeda la lignina presente en las fibras es considerada como el agente ligante que consolida a las fibras. Otro tipo de resina natural son los lignosulfonatos, obtenida en los licores residuales provenientes de las fábricas de pulpa que utilizan como reactivo sulfito o bisulfito de sodio. El licor residual de sulfito o SSL (spent sulfite liquor), requiere una acidificación previa debido a que se trata de una sustancia hidrofílica que necesita ser convertida a una sustancia insoluble en agua para poder usarla como pegamento durante el prensado en caliente.

2.6 TABLEROS DE FIBRAS

2.6.1 DEFINICIÓN

La American Hardboard Association (AHA) (2002), define a los tableros de fibras como aquellos paneles formados por medio del interfeltrado de fibras lignocelulósicas, las cuales se mantienen unidas a través de la plastificación de la lignina, consolidados bajo la acción de calor y presión. Durante su fabricación se pueden añadir sustancias que mejoren ciertas propiedades mecánicas como la rigidez, dureza y cualidades de acabado como la resistencia a la humedad y abrasión.

Maloney (1977), menciona que los tableros de fibras son manufacturados a partir de fibras lignocelulósicas refinadas o parcialmente refinadas, reagrupadas bajo la forma de un panel rígido, donde las fibras se mantienen unidas y entrecruzadas gracias a su propia capacidad de enlace. En el caso que se quiera obtener paneles de mayor densidad, la unión entre las fibras se consigue por medio de la plastificación de la lignina, consolidada bajo la acción de calor y presión. Durante su fabricación se pueden añadir ciertos aditivos como colofonia, parafinas, aceites y resinas sintéticas, con la finalidad de mejorar sus propiedades físicas y mecánicas.

2.6.2 CLASIFICACIÓN DE LOS TABLEROS DE FIBRAS

Youngquist (1999), menciona que los tableros fabricados por medio de fibras pueden ser obtenidos mediante tres procesos; por vía húmeda, vía semiseca y por vía seca. El primero difiere del segundo y del tercero por que el proceso de vía húmeda aprovecha la capacidad de entrecruzamiento que tienen las fibras en medio acuoso, reacomodándose bajo la forma de un

colchón o manto fibroso. Asimismo, los tableros obtenidos por vía húmeda no utilizan adhesivos sintéticos, debido a que las fibras que utiliza, proveniente de pulpas mecánicas, contienen suficiente lignina después del refinado: la lignina actúa como el ligante que necesita el panel para su consolidación final. Kollman (1975), clasifica los tableros de fibras de acuerdo a su densidad, ver cuadro 6

Cuadro 6 Clasificación de los Tableros de Fibras en base a su densidad.

Tipo de Tablero de Fibras	Densidad (g/cm ³)
No Prensados	
Tablero aislante semi rígido	0,02 – 0,15
Tablero aislante rígido	0,15 – 0,40
Prensados	
Tablero de densidad media	0,40 – 0,80
Tablero de fibras duro	0,80 – 1,20
Tablero de fibras extra duro	1,20 – 1,45

Fuente: Kollman (1975)

La Dirección General de Normas de México NMX (1976), menciona los requerimientos físicos y mecánicos que deben tener algunos tipos de tableros de fibras, en cuanto a espesor, módulo de ruptura, resistencia a la tracción perpendicular al grano, incremento porcentual en masa y volumen; ver cuadro 07.

Cuadro 7 Requerimientos Físicos y Mecánicos de los Tableros de Fibras.

Clasificación	Límites de espesor (mm)	MOR (kg/cm ²)	TPG (kg/cm ²)	Incremento en masa por absorción de agua (%)	Incremento en volumen por hinchamiento (%)
Extra duro	2,92 – 3,94	-	8	22	16
Extra duro	4,31 – 5,20	490	8	18	15
Extra duro	5,50 – 6,50	-	8	18	12
Duro	2,48 – 2,79	215	5	37	30
Duro	2,92 – 3,94	350	5	30	24
Duro	4,31 – 5,20	350	5	25	20
Duro	5,50 – 6,50	350	5	25	18
Semiduro	5,40 – 5,60	215	3,5	37	30

Leyenda: MOR: módulo de ruptura; TPG: tracción perpendicular al grano.

Fuente: NMX (1976)

2.6.3 FABRICACIÓN DE TABLEROS DE FIBRA

A) *MATERIA PRIMA FIBROSA*

Haygreen y Bowyer (1982), hacen una distinción entre los tableros de fibras duros y otros tipos de paneles: mencionan que en este tipo de panel la lignina desempeña la función del ligante que mantiene unidas entre sí a las fibras. Dentro del tablero, la lignina es la principal fuerza de cohesión que permite la consolidación del producto final, por consiguiente la única pulpa recomendable para la elaboración de tableros de fibras duros, es la producida por un proceso mecánico (pudiendo ser pulpas termomecánicas o pulpas mecánicas con algún pretratamiento de las astillas) en el cual la lignina es retenida hasta el final del proceso.

B) *OBTENCIÓN DE FIBRAS: PROCESO DE PULPEO*

a) Pretratamiento Químico

- (A) Pretratamiento en Medio Alcalino

Kurdin (1990), menciona que el remojo de astillas en una solución de hidróxido de sodio (NaOH), antes del desfibrado para la producción de pulpa, es uno de los pretratamientos químicos más antiguos. No debe esperarse que se produzca alguna reacción con la lignina, durante el pretratamiento químico, puesto que el hidróxido de sodio reacciona con las hemicelulosas, extractivos y las regiones amorfas de las fibras, debilitando sus paredes tanto dentro de la lámina intermedia como dentro de la pared secundaria, ayudando de esa forma a la fibrilación de las capas S1 y S2. Cuanto mayor es la cantidad de álcali absorbido, es menor la energía de desfibrado, la pulpa tendrá fibras con una longitud media mayor y por lo tanto menor cantidad de finos. Por otro lado un aumento de la intensidad del pretratamiento químico reduciría el rendimiento de pulpeo.

- (B) Pretratamiento al Sulfito de Sodio

Kurdin (1990), menciona que la utilización de bisulfito de sodio (Na_2SO_3), tiene como propósito hacer reaccionar el reactivo a altas temperatura con la lignina llegándose a producir lignosulfonatos, este proceso químico, conocido como sulfonación, convierte la lignina hidrofóbica nativa en ácidos lignosulfónicos más hidrofílicos, de manera que la fibra aumenta su capacidad de hincharse y absorber agua. Mientras mayor sea el grado de sulfonación, menor

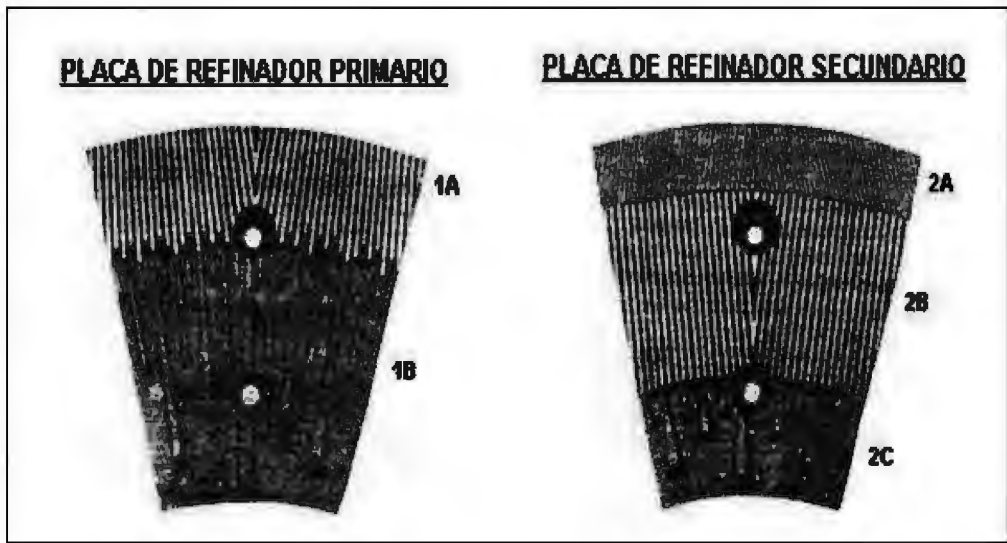
será el consumo de energía durante el refinado y mayor el contenido de pulpa que se asemeje a las pulpas químicas, (pulpas con fibras más largas)

b) Desfibrado Mecánico

Kurdin (1990), señala que la producción de pulpa mecánica con refinador mecánico implica la reducción mecánica de las astillas de materiales lignocelulósicos mediante un molino de discos de fricción construido con precisión. El diámetro de los discos ha aumentado hasta llegar a 137 cm, con capacidad impulsora instalada de 10 500 kW (14 000 HP) y velocidades del disco de 1 200 a 1 800 rpm. Algunos refinadores típicos son unidades de doble disco, las cuales giran en direcciones opuestas, otros diseños utilizan un disco giratorio opuesto a un disco estacionario y otros un disco giratorio de doble cara entre dos discos estacionarios.

Sanjuán (1997), indica que el proceso mecánico consiste en desmenuzar y separar astillas de materiales lignocelulósicos entre los discos giratorios de un refinador. El proceso mecánico generalmente necesita de dos etapas de refinado. La primera etapa llamada desfibrado, convierte la estructura original de los materiales lignocelulósicos en mazos de fibras simples y largas con un mínimo de desperdicio y una segunda etapa denominada fibrilación, que incluye la conversión de una parte de las fibras enteras en fibrillas y fragmentos de pared celular.

Con relación a los discos de desfibrado, Kurdin (1990), menciona que el diseño de la placa refinadora del disco es muy importante, tal como se puede apreciar en la figura 04. Por lo general, la placa consta de tres secciones: La primera sección, de barra rompedora, cuenta con barras anchas, surcos profundos y sirve para romper y fraccionar las astillas. La segunda sección, de barra refinadora intermedia, cuenta con barras angostas y ranuras de poco fondo, esta sección permite deshacer las astillas hasta el tamaño de un cerillo. Por último está la tercera sección, de barras más finas, es la zona de la placa refinadora donde se lleva a cabo la fibrilación. Finalmente el mismo autor menciona que la refinación con disco se lleva a cabo a temperaturas elevadas (165 °C – 185 °C), lo que trae como consecuencia un ablandamiento térmico de la lignina, que pasa de un estado vítreo a un estado plástico, facilitando así la separación de las fibras durante el proceso de refinado, para posteriormente quedar recubiertas con una delgada capa de lignina.



Legenda: 1A: Barras refinadoras; 1B: Barras rompedoras; 2A: Sección de barras finas; 2B: Barras intermedias; 2C: Barras rompedoras.

Figura 4 Diseños Típicos de Placas de Refinador. Fuente: Kurdin (1990)

C) ADITIVOS PARA TABLEROS DE FIBRA

Maloney (1977) y Youngquist (1999), mencionan que existen distintos tipos de aditivos que se utilizan en la industria de los paneles de fibra, entre los que se encuentran: las resinas o ceras, parafinas, preservantes y retardantes de fuego. De los cuales, el que más destaca por su uso, son las resinas, llamadas también agentes encolantes. La principal necesidad de aplicar un agente encolante en los tableros es la de elevar su resistencia a la penetración de agua y mejorar su estabilidad dimensional.

Pacheco (1988), afirma que el encolado es una propiedad que hace que los productos celulósicos (papeles, cartones y tableros de fibras) sean más o menos resistentes a la penetración de los fluidos. Para la manufactura de tableros de fibras, se utiliza el encolado en masa; este método consiste en colocar en una tina de mezcla los agentes encolantes junto con la pulpa. Estos agentes van a precipitar sobre las fibras disminuyendo así la humectación por el agua y limitando o suprimiendo los conductos capilares de las fibras. Asimismo Keavney y Kulick (1990), indican que la colofonia y el alumbre son los agentes encolantes de uso más generalizado que se utiliza en la industria de los paneles. Aún cuando la colofonia puede precipitarse sola sobre las fibras, su efectividad, cuando se utiliza de esta manera es muy baja.

El alumbre funciona como un precipitante, como ayuda a la retención y como una parte importante del propio agente encolador.

D) FORMACIÓN DEL MANTO FIBROSO

a) Formación por Vía Húmeda

García et al (2002), mencionan que para la formación del manto fibroso se utiliza una variante de la formadora Fourdrinier, con origen en la fabricación de papel. En la formadora Fourdrinier el proceso de formación de la hoja húmeda consiste en hacer pasar la suspensión de fibras a una banda continua permeable, en cuyo fondo se realiza un vacío que ayuda a eliminar rápidamente el agua en la que están suspendidas las fibras. De esta manera las fibras quedan retenidas y entrecruzadas, produciéndose un colchón o capa de fibras que posee una distribución homogénea, a lo largo y ancho del manto húmedo.

b) Formación por Vía Seca

Youngquist (1999) y García et al (2002), mencionan que el proceso de vía seca utiliza aire como medio de formación del manto fibroso. Posterior a la producción de pulpa mecánica, las fibras son llevadas a un filtro de espesado, con la finalidad de eliminar la mayor cantidad de agua, luego las fibras son secadas hasta alcanzar una humedad entre 6 % y 9 % (bms). La formación del manto fibroso se compone de un sistema de proyección vertical de aire, donde se consigue una separación homogénea de las fibras, para después pasar a una mesa de formación, generalmente como una banda continua y permeable que posee un sistema de vacío en su parte inferior, que ayuda a la formación del manto fibroso. Finalmente, los mismos autores indican que las distintas resinas y otros aditivos pueden ser aplicados después del refinado mecánico o durante el secado de las fibras, siendo la cantidad de resina aplicada de 6 % a 9 % (bms).

c) Formación por Vía Semi Seca

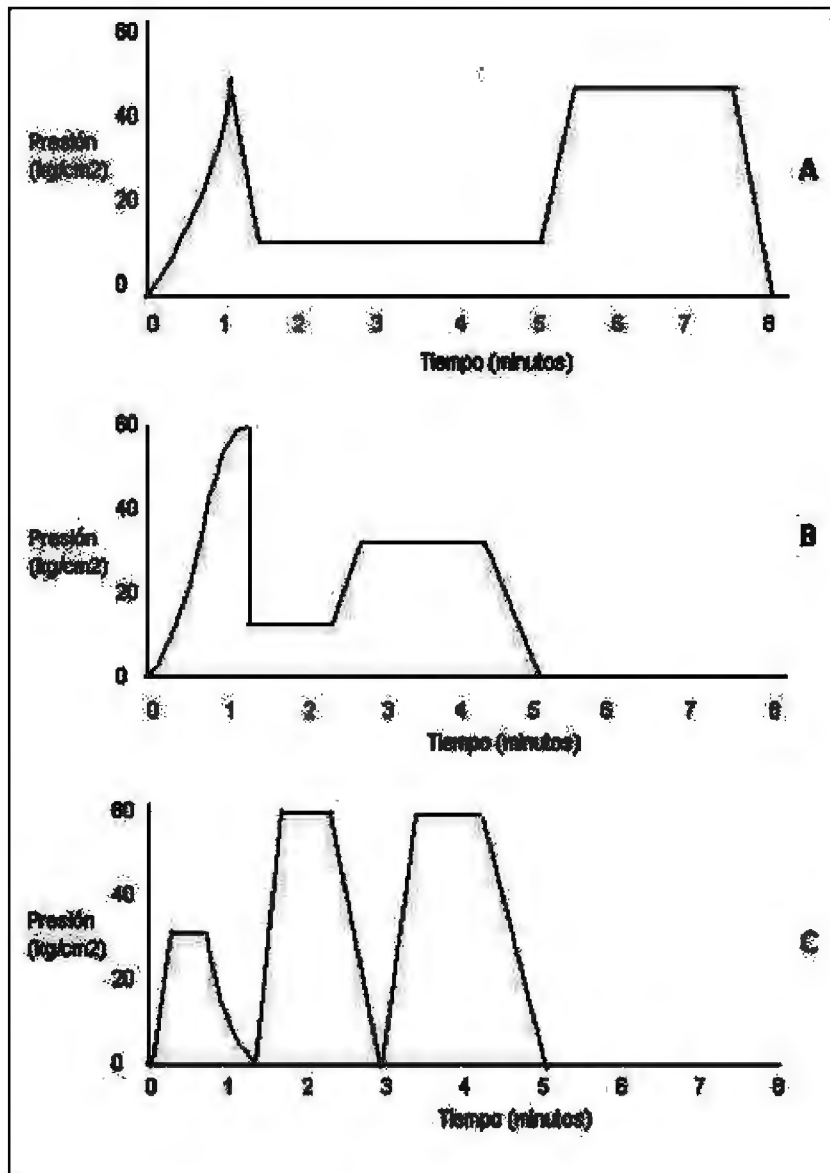
Kollman (1975), el proceso por vía semi seca es una variante del proceso seco, con la diferencia de que las fibras son secadas a una humedad superior a la de un proceso por vía seca, esta humedad varía entre 18 % a 26 %, además, el contenido de adhesivo sintético es menor, de 1 % a 3 % (bms).

E) PRE PRENSADO

Haygreen y Bowyer (1982), señalan que la operación del pre prensado es una parte importante dentro del proceso de fabricación de los tableros de fibras, debido a que el exceso de agua del manto húmedo es eliminado, se reduce el espesor y se mejora la conformación del manto fibroso. La omisión de esta operación implicaría un aumento innecesario en el consumo de energía durante el prensado en caliente, puesto que, se tendría que vaporizar mayor cantidad de agua. García et al (2002), para el caso de tableros formados por vía seca, menciona que esta operación es especialmente importante porque permite la salida de aire que favorece el entrecruzamiento eficiente de las fibras, difícilmente obtenido en sistemas de vía seca sin pre-prensado, además de reducir el espesor del manto fibroso.

F) PRENSADO EN CALIENTE

Youngquist (1999), menciona que esta operación se lleva a cabo en prensas de aberturas múltiples, calentadas con vapor de agua o agua caliente. Antes del prensado, el manto húmedo reposa sobre una malla metálica, que permite el drenaje del agua libre y del vapor de agua que escapa a medida de que se produce el proceso de prensado en caliente. El ciclo de prensado está compuesto por tres fases que tienen una duración total de 6 a 15 minutos. La primera fase utiliza una presión máxima de 50 kg/cm² y una temperatura superior a los 210 °C, estos valores se justifican debido a que es necesario eliminar rápidamente la mayor cantidad de agua libre y alcanzar el espesor deseado. El principal propósito de la segunda fase o de presión baja es la de remover toda el agua restante, pero en forma de vapor, a través de la malla metálica, y por último, una tercera fase que utiliza temperaturas superiores a los 140 °C. En estas condiciones se aprovecha la característica termoplástica de la lignina, que se comporta como una resina natural, que se ablanda, se moldea y polimeriza, uniendo a las fibras nuevamente y formando así, una unidad tridimensional como una red entretejida en todo el tablero. En la figura 05 se muestran los típicos diagramas de prensado en caliente de tableros de fibras de acuerdo a la vía de formación del manto fibroso; Kollman (1975) y García et al (2002)



Leyenda: A: Tableros formados por vía húmeda; B: Tableros formados por vía semi seca; C: Tableros formados por vía seca.

Figura 5 Diagramas de Prensado en Caliente en la Producción de Tableros de Fibras.
 Fuente: Kollman (1975) y García et al (2002).

Por otro lado Moreno (1980) y Park et al (1999), indican que cuando los platos de la prensa entran en contacto con el manto húmedo, se identifican tres etapas:

- Primero, el flujo de calor comienza a penetrar por medio de conducción, desde los platos de la prensa hacia las superficies del manto fibroso, y de ahí hacia el centro del tablero, a su vez se inicia un proceso mecánico, que consiste en la disminución del volumen de los poros y el aumento de los puntos de contacto entre las fibras, debido a las fuerzas de flexión y compresión ejercidas por la presión de los platos de la prensa.
- Segundo, las moléculas de agua presentes en el manto húmedo, se transforman en vapor, mejorando la conducción del calor en todo el tablero y facilitando también, al proceso mecánico.
- Por último, un proceso químico, en el cual la lignina por acción de la temperatura pasa de un estado rígido a un estado plástico (condición termoplástica), actuando como un adhesivo que mantiene unidas a las fibras.

G) TRATAMIENTOS POSTERIORES AL PRENSADO

- Tratamiento Térmico: Maloney (1977) y Youngquist (1999), mencionan que el tratamiento térmico consiste en colocar los tableros de fibras en cámaras especialmente diseñadas para templarlos con una corriente de aire caliente (150 °C a 165 °C), con la finalidad de aumentar la resistencia mecánica y su estabilidad dimensional.
- Temperado: los mismos autores manifiestan que el temperado consiste en llevar a los tableros de fibras a un baño de inmersión en aceite caliente a una temperatura entre 160°C y 170°C. La finalidad de este procedimiento es la de otorgar a los paneles una mayor resistencia a la penetración de agua y al desgaste superficial (abrasión). Los aceites más usados son el aceite de linaza y aceite de tung, este último del género Aleurites, originario de China.
- Humidificación: los mismos autores indican que los tableros que han sido tratados térmicamente o temperados se encuentran en un estado anhidro, por lo que necesitan pasar por una etapa de humidificación. Esta etapa consiste en aplicar una corriente de aire húmedo a través de las pilas de tableros de fibras con la finalidad de forzar al panel a que alcance un contenido de humedad que se encuentre entre 3 y 7 %. Este procedimiento se realiza con el propósito de evitar de que el tablero absorba irregularmente humedad del medio ambiente, lo que altera sus dimensiones y propiedades mecánicas.

2.6.4 REQUISITOS DE TABLEROS PRENSADOS

En el cuadro 08 se muestran los valores requeridos para algunas propiedades mecánicas de los principales tableros producidos a nivel industrial. Las propiedades varían de acuerdo a la densidad y al tipo de panel y al espesor del mismo.

Cuadro 8 Valores de Algunas Propiedades Mecánicas requeridos para Paneles Prensados.

Tipo de tablero	MOR (kg/cm ²)	MOE (miles kg/cm ²)	TPG (kg/cm ²)	IV (%)	IM (%)
Tableros contraplacados	211 – 492	70 – 133	-	-	-
OSB	210 - 281	49 – 85	-	-	-
Tableros de partículas					
densidad (>0.8 gr/cm ³)	168 - 239	24 – 27	9.1-10.2	-	-
densidad (0.6 - 0.8 gr/cm ³)	112 - 168	17 – 27	4.1-5.4	-	-
densidad (< 0.6 gr/cm ³)	49 - 51	5.5 – 10	1.1-1.6	-	-
MDF					
Interiores	142 - 351	14 – 35	3.1-7.6	-	-
exteriores	315 -351	31 – 35	7.1-9.2	-	-
Tableros de fibras duros a					
temperado	438	56 b	9.5	20	25
estándar	328	40 b	6.6	25	35
servicio	219	24 b	3.6	35	40
Industrial	146	-	1,82	30	50
Tableros aislantes ^b (densidad 0.17 – 0.4 gr/cm ³)	9.9 - 26	0.8 – 4	-	-	-
Tableros de fibro cemento	17 - 55	6 – 12	-	-	-

Leyenda: MOR: módulo de ruptura; MOE: módulo de elasticidad; TPG: tracción perpendicular al grano; IV: incremento en volumen por hinchamiento; IM: incremento en masa por absorción de agua.

Fuente: Youngquist (1999), American Hardboard Association AHA (2000) a, Kollman (1975) b

2.7 INFLUENCIA DE LAS VARIABLES DEL PRENSADO DURANTE LA ELABORACIÓN DE PANELES

Zavala (1994), afirma que el prensado en caliente es la fase de producción donde interaccionan las características de las fibras, partículas o láminas con las propiedades del adhesivo (resinas sintéticas o naturales); mediante la acción de la temperatura y la presión de los platos de la prensa. La función de la temperatura es acelerar la polimerización de adhesivo y, a través de la

presión de los platos, facilitar el contacto entre los componentes del manto formado y el adhesivo. Por otro lado Park et al (1999), mencionan que el prensado en caliente es una de las operaciones más importantes y costosas dentro de la industria de paneles, por lo que es necesario conocer la influencia que tienen las variables del prensado (temperatura, tiempo y presión) con la formación de los tableros prensados. La manipulación de estos parámetros va a alterar la distribución de la densidad a través del espesor del tablero y de este modo sus propiedades físicas y mecánicas.

Stiener y Dai (1993), manifiestan que la respuesta que pueda tener la estructura del “mat” (manto fibroso) en la forma de partículas, hojuelas (flakes), o fibras a una fuerza de compresión transversal, es crítica en la fabricación de tableros compuestos de hojuelas (flakeboards). Ellos observaron cambios en la estructura interna de paneles compuestos; como la reducción del volumen y la densificación del “mat”; alterando considerablemente la transferencia de calor durante el prensado en caliente. Finalmente mencionan que las interacciones físicas, químicas y mecánicas entre el manto de fibras comprimido, la temperatura, el contenido de humedad y la cantidad de adhesivo, puede dar como resultado una densificación no uniforme entre los estratos del panel (caras y centro).

Quintana (2002), realizó un estudio sobre la elaboración de tableros de fibras duros obtenidos por vía húmeda, utilizando como materia prima al pashaco (*Parkia nitida*). Antes del desfibrado, procedió a remojar las astillas de madera en agua y en una solución de hidróxido de sodio (NaOH) al 5% (bms), para posteriormente utilizar distintos niveles de presión final durante el prensado en caliente. La influencia del hidróxido de sodio, explicada en el punto 2.6.3.2.1, demuestra que los tableros tratados con este reactivo aumenten su resistencia a la penetración de agua, disminuyendo de esta forma su incremento porcentual de masa (IM), debido a la solubilidad de las hemicelulosas. Estos heteropolisacáridos, polímeros que tienen una fuerte afinidad por el agua, son solubles en un medio alcalino y los tableros que fueron tratados con hidróxido de sodio al 5 % (bms), mostraron menor porcentaje de incremento en masa por absorción de agua que los tratados únicamente con agua. Como resultado de la influencia de la presión final, se observó que en general el incremento en masa y el espesor, disminuyen a medida que se incrementan los valores de presión final. Asimismo, los valores de ensayos como la densidad, MOR, MOE, y la tracción perpendicular al grano (TPG)

aumentaban a medida que se elevaban los niveles de presión final, mostrando una relación directamente proporcional, tal como se aprecia en el cuadro 09.

Cuadro 9 Influencia del Tratamiento Químico* de Pulpeo y de la Presión Final de Prensado sobre las Propiedades de Tableros de Fibras Duros obtenidos a partir de la madera de Pashaco (*Parkia nitida*).

Presión final (kg/cm ²)	Espesor (mm)		IM (%)		Densidad (g/cm ³)		MOR (kg/cm ²)		MOE (miles kg/cm ²)		TPG (kg/cm ²)	
	NaOH	Agua	NaOH	Agua	NaOH	Agua	NaOH	Agua	NaOH	Agua	NaOH	Agua
9,40	4,55	4,48	55,20	53,80	0,71	0,83	279,21	189,32	32,76	31,38	1,39	0,68
18,8	4,41	3,96	57,44	58,93	0,73	0,80	260,14	152,54	36,71	25,23	2,46	1,89
28,2	5,07	3,74	53,64	58,74	0,72	0,79	287,38	216,56	44,59	23,48	3,18	1,63

* Tratamiento químico con NaOH al 5 % (bms).

Leyenda: IM: incremento en masa por absorción de agua; MOR: módulo de ruptura; MOE: módulo de elasticidad; TPG: tracción perpendicular al grano.

Fuente: Quintana (2002)

Bagby y Clark (1977), realizaron un estudio sobre la producción de tableros de fibras con tallos de kenaf (*Hibiscus cannabinus*), y encontraron que la resistencia a la tensión paralela a las caras es directamente proporcional a la densidad de los tableros. Asimismo se elaboró una serie de tableros utilizando una presión de 43,86 kg/cm², una temperatura de 165 °C y distintos tiempos de prensado, cuyos resultados se muestran en el cuadro 10. En el se puede apreciar que cuando los tableros están expuestos a un prolongado tiempo de prensado en caliente, los valores de densidad y tracción paralela a las caras disminuyen.

Cuadro 10 Influencia del Tiempo de Prensado, a 165 °C, sobre los Valores de dos propiedades de Tableros de Fibras obtenidos a partir de Kenaf (*Hibiscus cannabinus*).

Tiempo total de prensado (minutos)	Densidad (g/cm ³)	Tracción paralela a las caras (kg/cm ²)
15	0,83	240,50
20	0,91	322,74
30	0,83	222,96

Fuente: Bagby y Clark (1977)

Tabarsa y Chui (1997), manifiestan que cuando un material celular es sometido a una fuerza de compresión transversal, generalmente ocurre un colapso en su estructura celular. Este efecto

negativo del prensado en caliente, produce la pérdida de pequeños volúmenes de material. Además señalan que por efecto de la temperatura se producen cambios en algunos polímeros de las fibras, como la lignina, que pasan de un estado vídrioso a uno elástico. Esto se pone de manifiesto cuando las propiedades de los tableros cambian rápidamente entre 100°C y 150°C de temperatura de prensado, pero no entre los 150°C y 200°C, indicando así, que más allá de los 150 °C, no ocurren cambios favorables en las propiedades físico mecánicas de los paneles, tal y como se aprecia en el cuadro 11.

Cuadro 11 Influencia de la Temperatura de Prensado en laminas* de Abeto Blanco (*Picea glauca*).

Temperatura de Prensado (°C)	MOR (kg/cm ²)	MOE (miles kg/cm ²)	Densidad (gr/cm ³)	Contenido de Humedad (%)
100	784,55	100,15	0,530	10,4
150	923,45	117,06	0,581	7,5
200	906,21	116,48	0,563	6,4

*laminas de 250 x 70 x 12 mm de largo, ancho y espesor respectivamente. Leyenda: MOR: módulo de ruptura; MOE: módulo de elasticidad.

Fuente: Tabarsa y Chui (1997)

Finalmente Wolcott et al (1994), mencionan que durante el proceso de elaboración de paneles de fibras se utilizan distintos tiempos de prensado y elevados niveles de temperatura y presión. La aplicabilidad de estos factores va a producir la densificación del tablero de fibras cuyos componentes se deforman, plegándose y comprimiéndose. La densificación, producto de esta compresión, puede alterar las propiedades físicas y mecánicas de los paneles de fibras. A su vez señalan que en tiempos cortos de prensado, bajas temperaturas y bajo contenido de humedad, los polímeros de las fibras exhiben un estado vídrioso, las cuales se caracterizan por ser tiesas y quebradizas. En cambio, en prolongados tiempos de prensado, elevados niveles de temperatura y un elevado contenido de humedad los polímeros muestran un comportamiento elástico, las cuales se caracterizan por ser deformables.

2.8 TABLEROS PRENSADOS A PARTIR DE FIBRAS VEGETALES NO MADERABLES

Kuo et al (1998), fabricaron tableros de fibra duros por vía húmeda de fibras proveniente de tallos de maíz. Como se puede apreciar en el cuadro 12, las propiedades físico mecánicas se ven fuertemente influenciadas por el tipo de fibra; los resultados muestran que paneles fabricados con 100 % de fibras de maíz muestran los valores más bajos de MOR, MOE, TPG y un aumento en el incremento porcentual del volumen. Pero con una mezcla de 50 % de fibras de maíz + 50 % fibras de madera, los valores de resistencia físico mecánica son similares a la de los tableros fabricados con 100 % fibras de madera. Una posible explicación del porqué los tableros fabricados con 100 % de fibras de tallo de maíz resentan la menor resistencia físico mecánica es que las fibras proveniente de esta gramínea, al igual que la paja de arroz, poseen una menor proporción de fibras largas y menor cantidad de lignina que las fibras proveniente de madera.

Cuadro 12 Valores de Resistencia Físico – Mecánica de Tableros de Fibras Duros Obtenidos por Vía Húmeda de una Mezcla de Fibras de Tallos de Maíz y Madera.

Propiedades físico - mecánicas	Composición de fibras (madera / maíz) %				
	100 / 0 %	75 / 25 %	50 / 50 %	25 / 75 %	0 / 100 %
MOR (kg/cm ²)	283	276	282	285	267
MOE (miles kg/cm ²)	26	25,5	26	25,8	24
TPG (kg/cm ²)	5.8	5,5	5,6	4,8	4,23
Incremento en volumen (%)	21	19	20	37	31

Legenda: MOR: módulo de ruptura; MOE: módulo de elasticidad; TPG: Tracción Perpendicular al grano.

Fuente: Kuo et al (1998)

Yang et al (2003), mencionan que las fibras lignocelulósicas que provienen de residuos de cultivos agrícolas, como la paja de arroz y la paja de trigo, pueden ser fácilmente trituradas hasta convertirse en chips o partículas, las cuales son similares a las partículas de la madera. Estas materias primas no maderables podrían sustituir parcialmente a las partículas de madera en la manufactura de tableros prensados. Ellos elaboraron tableros de partículas a partir de paja de arroz y demostraron que los paneles elaborados con mezclas menores al 20 % de fibras de paja de arroz poseen una resistencia mecánica similar en cuanto al módulo de ruptura que tableros producidos con 100 % de fibras de madera, tal como se observa en la Figura 06.

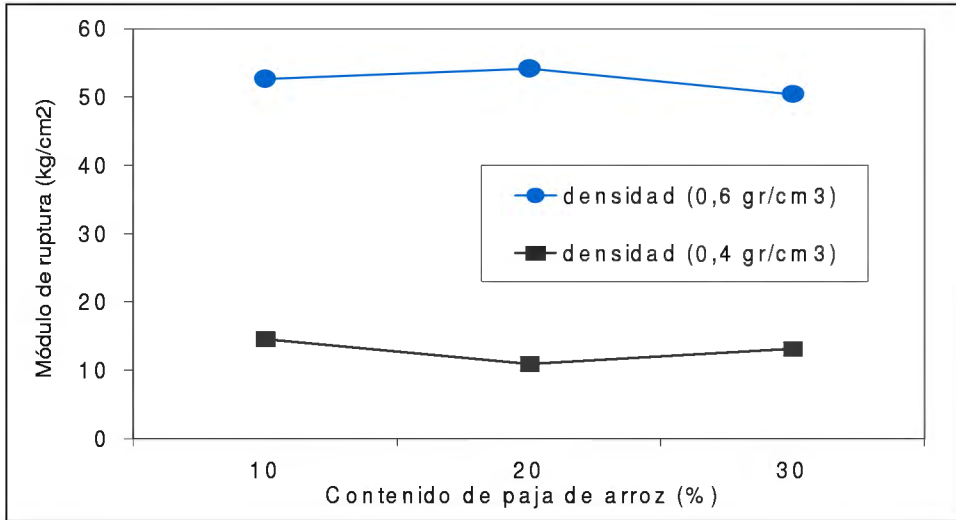


Figura 6 Influencia del Contenido de Paja de Arroz en la elaboración de Tableros de Partículas. Fuente: Yang et al (2003)

2.9 PRODUCCIÓN MUNDIAL DE LA INDUSTRIA DE LOS TABLEROS

Bowyer y Stockmann (2001), afirman que el consumo de paneles estructurales o de uso exclusivo para exteriores (OSB, contraplacados, LVL) y no estructurales o de uso en interiores (contraplacados, partículas, MDF, tableros de fibras duros y tableros aislantes) ha mostrado un aumento considerable, tanto en el continente europeo como en Norte- América y China, que en otras partes del mundo, durante el periodo 1994 – 2000, esperándose para el año 2010 se mantenga esta tendencia tal como se aprecia en la figura 07.

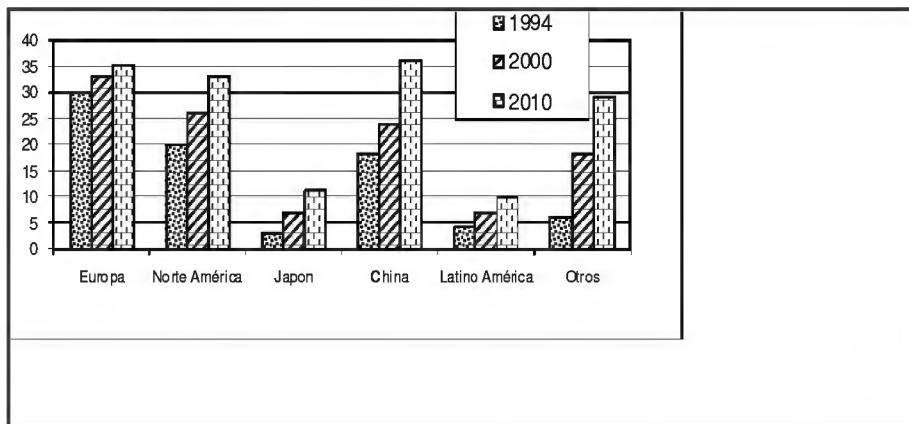


Figura 7 Proyección de la Demanda Regional de Tableros Prensados durante el Periodo 1994 – 2010.

Fuente: Bowyer y Stockmann (2001)

Los mismos autores afirman que entre los tableros que presentarán una mayor aceptación entre los consumidores se encuentran el MDF (medium density fiberboard) y el OSB (oriented strandboard), cuyo consumo se espera se triplique y se duplique respectivamente, durante el periodo 1996 - 2010, tal como se observa en la Figura 08. De igual forma se espera que los tableros de partículas también muestren un crecimiento constante durante ese mismo periodo. Este aumento se debe a que los paneles de partículas y MDF son los preferidos, hoy en día, para la elaboración de todo tipo de muebles, mientras que el OSB es el tablero preferido para las construcciones estructurales, sustituyendo parcialmente, desde 1980, a algunos tipos de tableros contraplacados.

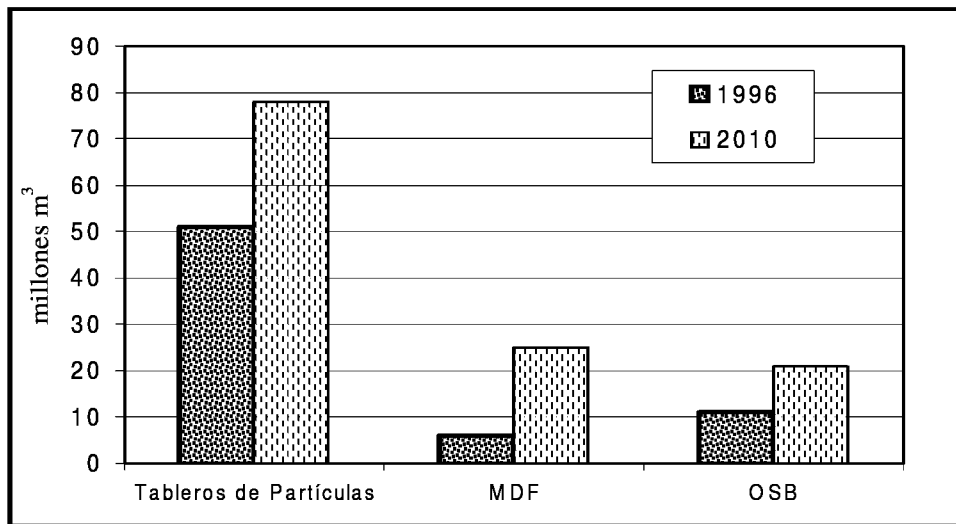


Figura 8 Valor Proyectado de la Demanda Mundial, al 2010, de Tres Tipos de Tableros Prensados; año base 1996.

Fuente: Bowyer y Stockmann (2001)

Asimismo Granum y Eustis (1999), manifiestan que los tableros de fibras duros originados por vía húmeda, favorece tanto a fibras individualizadas como a paquetes de fibras (shives). Entre las características que posee este tipo de tableros se encuentra la excelente lisura que presenta la superficie del panel, siendo apta para recibir cualquier recubrimiento exterior, además posee una resistencia superior al impacto debido a su gran flexibilidad comparadas con tableros de fibras fabricados por medio de otros procesos.

Por otro lado la tendencia mundial de la industria de tableros de fibras duros obtenidos por vía húmeda presentaron un crecimiento constante, durante el periodo 1995 - 2002, aumentando su producción de 6,9 a 10,3 millones m³, demostrando así la vigencia que todavía posee este producto. En la figura 09 se puede apreciar la evolución de la producción de tableros de fibras duros a nivel mundial durante ese mismo periodo. Asia y Europa son los continentes que más han aumentado la producción de tableros de fibras duros durante ese periodo, abarcando el 45% y 30% de la producción mundial respectivamente.

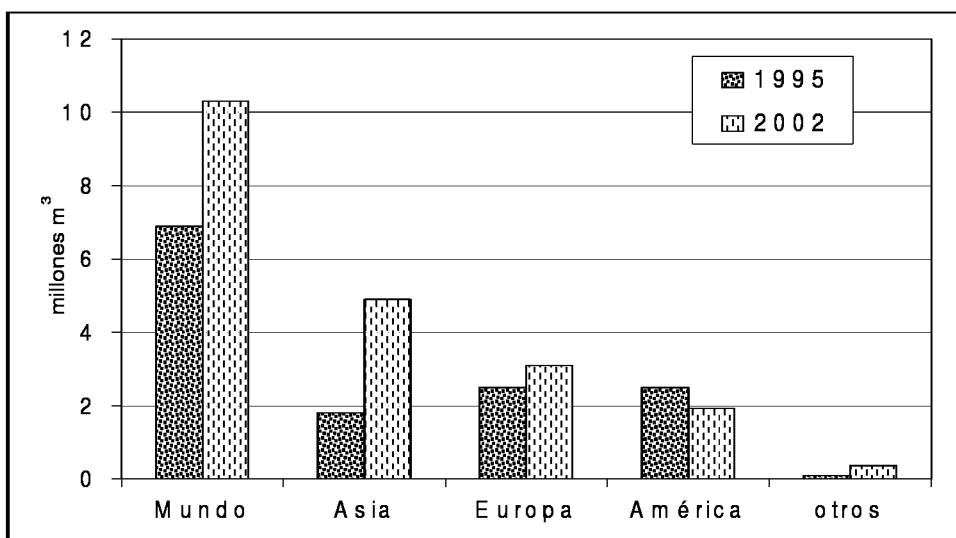


Figura 9 Evolución de la Producción de Tableros de Fibras Duros obtenidos por Vía Húmeda durante el periodo 1995 – 2002. Fuente: FAO (2004)

2.10 COMERCIALIZACIÓN Y USOS DE LOS TABLEROS DE FIBRAS EN EL PERÚ

Como se aprecia en el Cuadro 13 la demanda de tableros de fibra ha ido aumentando en los últimos años, demostrando así un incremento en la utilización de este tipo de panel, siendo Chile el principal proveedor de este producto, según la SUNAT (2005). Los tableros de fibras duros importados se utilizan para la elaboración de partes de muebles (respaldares y fondo de cajones), puertas contraplacadas, tabiquería (paneles divisores de ambiente), cielos rasos,

paneles de exhibición, revestimiento interno de carrocerías de transporte y en general en toda aplicación que requiera una superficie estructural.

Cuadro 13 Valor de Importación de Tableros de Fibras duros que no Poseen Trabajo Mecánico ni Recubrimiento Superficial (densidad $>0.8\text{g/cm}^3$).

País de Origen	Marca	Valor FOB de la Importación (x 1000 US\$)				
		1999	2000	2001	2002	2003
Chile	Arauco	1 051	1 441	1 507	1 983	2 543
Bolivia	-	729	382	508	483	484
Total		1 780	1 823	2 015	2 466	3 027

Fuente: SUNAT (2005)

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 LUGAR DE EJECUCIÓN

La elaboración de los tableros de fibras y evaluación química de la paja de arroz, se llevó a cabo en el Laboratorio de Pulpa y Papel, Área de Transformación Química, de la Universidad Nacional Agraria la Molina. Los ensayos mecánicos se realizaron en el Laboratorio de Tecnología de la Madera, Área de Transformación Mecánica y en el Laboratorio de Control de Calidad de la Empresa Fibrforte S.A, Cercado - Lima.

3.2 MATERIALES Y EQUIPOS

3.2.1 MATERIA PRIMA

Para la realización el presente estudio se utilizó paja de arroz proveniente del departamento de Lambayeque, provincia de Lambayeque, distrito de Mochumí, perteneciente al valle del río La Leche. La paja provino de la cosecha de arroz del año 2001, de los meses de Julio y Agosto. La colección se realizó en Enero del 2002, en forma manual tratando de acopiar paja seca; una vez escogida la materia prima, se la guardó en sacos de polietileno, para su envío a Lima. La cantidad total de materia prima colectada fue de aproximadamente 30 kg.

3.2.2 EQUIPOS

- Desfibrador de Discos Bauer de 12 pulg y 30 HP de potencia instalada
- Desintegrador de 2 L
- Agitador portátil
- Bomba de Vacío, Embudo Buchner con malla No 140 y kitasato
- Balanza analítica de 0,1 g de precisión
- Horno de secado
- Medidor de grados Schopper-Riegler

- Clasificador de fibras Bauer McNett
- Prensa de platos fríos
- Prensa de platos calientes
- Mufla eléctrica de 1 200 °C

3.2.3 MATERIALES DE LABORATORIO

- Probetas
- Pipetas
- Vasos pyrex de 50, 100, 250 ml
- Cronómetro
- Campanas desecadoras
- Pinzas
- Termómetro
- Filtros de tela
- Discos metálicos
- Mallas metálicas
- Papel metálico

3.2.4 INSUMOS

- Agua
- Colofonia
- Sulfato de alumina
- Hidróxido de sodio

3.3 MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

3.3.1 PREPARACIÓN DE LA MATERIA PRIMA

La paja de arroz fue picada en trozos de 5 cm de longitud y posteriormente fueron cernidas para eliminar materiales extraños, siendo el total de paja picada de 10 kg. Asimismo se procedió a determinar el contenido de humedad, utilizándose una muestra de 10 g de paja picada por duplicado. Para la determinación del contenido de humedad; se utilizó el método gravimétrico, según la norma técnica peruana NTP.251.010

3.3.2 ANÁLISIS QUÍMICO DE LA PAJA DE ARROZ

Para el análisis químico de la paja de arroz se aplicaron las siguientes normas y métodos:

Extractivos en alcohol benceno	: norma TAPPI T6 OS-59
Solubilidad en agua caliente	: método Sovard
Solubilidad en agua fría	: método de la U. Santander
Cenizas	: norma ISO R-1762
Lignina	: método Klason, método G.8 TAPPI
Celulosa	: método Kurschmer y Hoffner.
Sílice	: método del ácido clorhídrico, norma TAPPI T-11m

3.3.3 ENSAYOS PRELIMINARES PARA LA OBTENCIÓN DE PULPA DE ALTO RENDIMIENTO

Se realizó con el objetivo de evaluar el comportamiento de la materia prima sometida a un proceso de pulpeo de alto rendimiento y a su vez determinar las condiciones finales de pulpeo. El pulpeo se realizó empleando muestras de 200 gr. de paja de arroz tratadas en diferentes soluciones de hidróxido de sodio, de 1 a 5 % (bms). Cabe mencionar que hubo dificultad para obtener pulpa en una sola etapa, por lo que se optó, añadir una segunda etapa, facilitando de esta forma el proceso de pulpeo. Los valores promedios obtenidos durante los ensayos preliminares se observan en el Cuadro 14.

Cuadro 14 Ensayos Preliminares para la Obtención de Pulpa para la Elaboración de Tableros de Fibra.

	Vacío	1 ^{era} Etapa	2 ^{da} Etapa
lectura media de amperaje (A)	11	14	30
distancia entre discos (mm)	-	0,62	0,10
tiempo de desfibrado (minutos)	-	6	2
drenabilidad (°SR)	-	-	33
rendimiento (%)	-	-	85,5

3.3.4 CONDICIONES FINALES DE PULPEO

Se trataron 2 kg de paja de arroz en una solución de hidróxido de sodio al 5 % (bms) con una relación licor/paja de 20:1, a temperatura ambiente (20 °C) por 24 h. Posteriormente se lavó la materia prima para luego ser sometida a un tratamiento mecánico en un desfibrador de discos de 30 HP. La paja picada fue desfibrada en dos etapas: la primera etapa se efectuó a una distancia entre los discos de 0,62 mm y en la segunda etapa fue a 0,10 mm.

3.3.5 DRENABILIDAD

Se determinó la drenabilidad de la pulpa de paja de arroz según la norma SCAN M3-65, utilizando como equipo de medición el medidor de grados Schopper Riegler (°SR).

3.3.6 DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO

Se tomaron muestras de pulpa para determinar su peso húmedo, contenido de humedad y peso seco y con estos valores, el rendimiento de la pulpa (R %), según la fórmula que se presenta:

$$\text{Rendimiento (R \%)} = \frac{\text{Peso seco de pulpa}}{\text{Peso seco de la materia prima}} \times 100$$

3.3.7 EVALUACIÓN DE LA PULPA OBTENIDA

Para la evaluación de la pulpa obtenida se utilizó la siguientes norma y método

solubilidad en NaOH (1 %) : norma TAPPI T212 m-54
 Clasificación de fibras en el clasificador de
 fibras Bauer-McNett : norma TAPPI 233

Longitud de fibras

: método del Laboratorio de Pulpa y Papel
de la Universidad Nacional Agraria la
Molina

3.3.8 ELABORACIÓN DE LOS TABLEROS DE FIBRAS

Para la fabricación de los tableros de fibra, se realizarán las siguientes etapas, resumidas en la Figura 10.

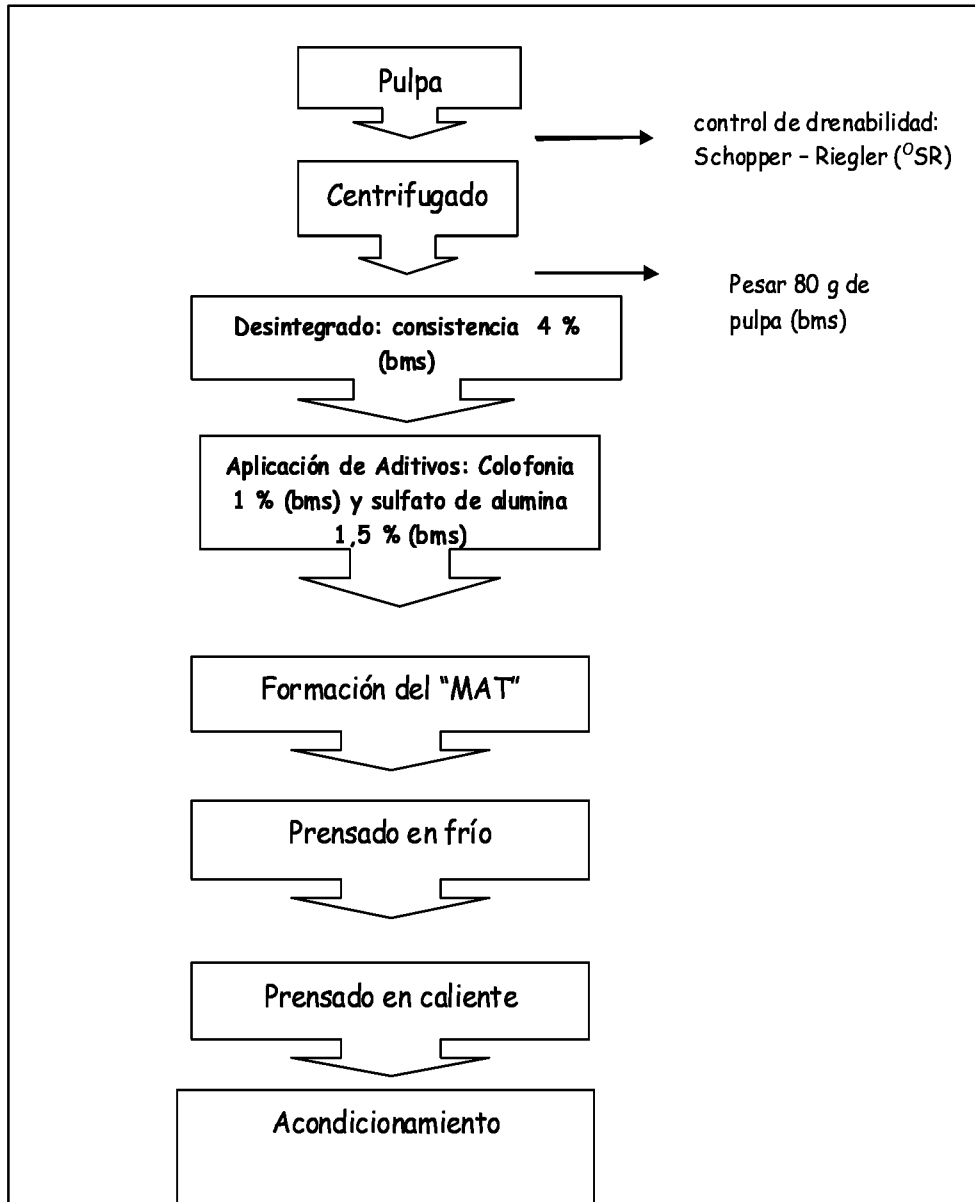


Figura 10 Diagrama de Proceso de Elaboración de los Tableros de Fibras.

A) DESINTEGRADO DE LA PULPA

Una vez obtenida la pulpa en el desfibrador de discos, se procedió a pesar 80 g de pulpa (bms) para luego ser llevada a un desintegrador de 2 L por un tiempo de 15 minutos (aprox.) a una consistencia de 4 % (bms). El objetivo de esta operación fue llegar a la individualización de las fibras en medio acuoso.

B) APLICACIÓN DE ADITIVOS

Después del desintegrado, la pulpa se transfirió a un balde de 5 L con la finalidad de agregar 2 L de agua y alcanzar a una consistencia de 2 % (bms), permitiendo de esta forma una buena dispersión de los aditivos en la pulpa mediante un agitador portátil. Los aditivos utilizados fueron: colofonia al 1 % (bms) y sulfato de alumina al 1,5 % (bms).

C) FORMACIÓN DEL MANTO FIBROSO (MAT)

El manto fibroso se formó en el embudo buchner con malla N° 150, conectado a un kitasato y a una bomba de vacío. Al momento de verter la pulpa en suspensión acuosa en el embudo buchner, se procuró de que este procedimiento se realice en forma lenta y continua, con la finalidad de evitar la formación de capas o estratos que alteren la distribución homogénea de las fibras a través del espesor del manto fibroso (mat).

D) PRENSADO EN FRÍO

Una vez formado el manto fibroso, este se colocó sobre dos fieltros de tela y encima del “mat” un disco metálico. Posteriormente todo este conjunto fue llevado a una prensa de platos fríos, donde se aplicó una presión de 4,2 kg/cm² por un tiempo de 2 minutos.

E) PRENSADO EN CALIENTE

Para este proceso se siguió la secuencia de la figura 11 cuyos valores de presión y tiempo de prensado de las distintas etapas se aprecian en el cuadro 15.

Cuadro 15 Tiempos para cada Etapa de Prensado en Caliente, del presente estudio.

Etapas	Tiempo (minutos)	Presión Manométrica (lb)	Presión Específica (kg/cm ²)
A	2	20 000	46,90
B	10	2 000	4,69
C	3	10 000	23,57

Etapa A: Es la etapa de presión máxima donde la temperatura inicial de los platos es de 180 °C. Aquí se definió el espesor del tablero, se eliminó toda el agua libre, se inició el calentamiento del manto fibroso y comenzó la precipitación de la colofonia sobre las fibras.

Etapa B: Es la etapa de secado del tablero y de presión baja. Se eliminó el agua restante en forma de vapor a través de los espacios entre la malla metálica y el tablero. La temperatura interna del tablero se considera que es igual o menor a 100 °C.

Etapa C: Es la etapa de solidificación del tablero, debido a que toda del agua del tablero se encuentra evacuada, permitiendo que la temperatura interna del panel aumente hasta superar los 140 °C, permitiendo de esta forma la polimerización de la lignina y la consolidación del panel.

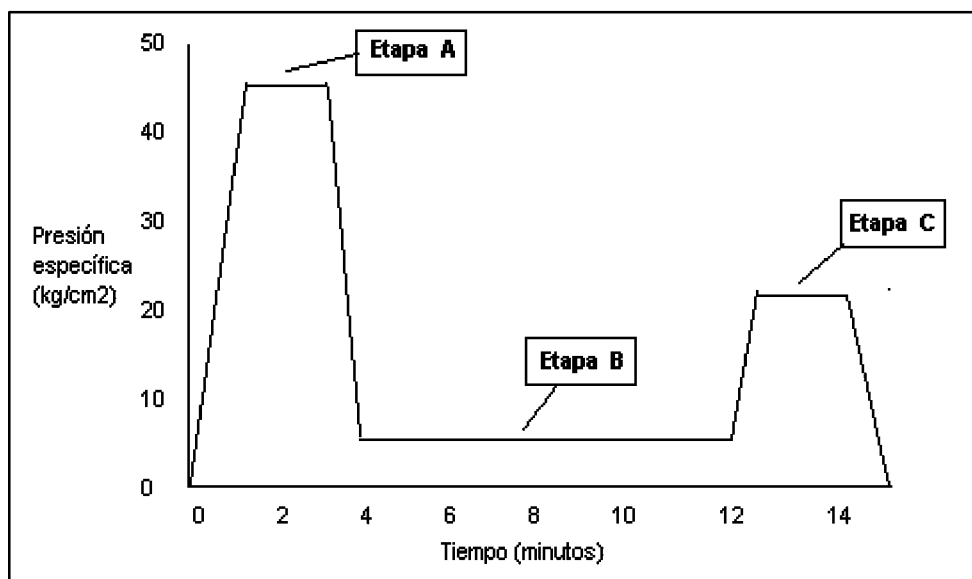


Figura 11 Esquema de Prensado en Caliente para la obtención de los Tableros de Fibras.

F) ACONDICIONAMIENTO DE LOS TABLEROS DE FIBRAS

Una vez terminado el proceso del prensado en caliente, todos los tableros de fibras fueron acondicionados a una humedad relativa de 65 % y a una temperatura de 20 oC según la norma técnica peruana NTP. 272.010

G) ENSAYOS FÍSICOS – MECÁNICOS DE LOS TABLEROS DE FIBRAS

Para la evaluación física y mecánica de los tableros se utilizaran las siguientes normas y métodos.

contenido de humedad	: norma NTP.251.010
incremento en masa y volumen	: norma ISO R 768 (1968)
blancura	: norma ISO 3688
densidad aparente	: método del volumenómetro de Breouille, norma interna del Laboratorio de Pulpa y Papel de la UNALM.
prueba de flexión	: norma ASTM D 1037 - 64 (1964)
prueba de tracción perpendicular al grano	: norma ASTM D 1037 - 64 (1964)
prueba de dureza	: norma ISO 868

3.4 DISEÑO ESTADÍSTICO EXPERIMENTAL

La evaluación de los datos se realizó de acuerdo al plan experimental 33, efectuada con la ayuda lógica "STATGRAPHICS" "plus" v.3.0, "STAT-PLUS" v.2.0, "STATISTICA" v.2.0. La evaluación consistió en evaluar en el diseño factorial, para cada tablero prensado en caliente, los efectos de las 3 variables (factores), y sus interacciones sobre las respuestas de los resultados. El diseño se aplicó en un único bloque y el orden de los experimentos tuvo que ser completamente randomizado, lo que proporcionó protección contra los efectos que puedan tener las variables y las interacciones que tienen un efecto significante. El análisis estadístico de la influencia de las variables sobre los resultados se efectuó previa evaluación del análisis de varianza mediante la prueba Fisher o "F", se tomará como referencia de confianza un 95% de probabilidad ($\alpha=0,05$); eventualmente este valor pudo variar a fin de explicar algunos

resultados. En el cuadro 16 se observa los valores de las variables utilizadas en el presente estudio.

Cuadro 16 Valores de los Niveles de las Variables Utilizadas en la Elaboración de Tableros de Fibras Duros a partir de Paja de Arroz (Oriza sativa L.)

Variables	Significado cada variable	Niveles		
A	Presión inicial de prensado caliente	28,14 kg/cm ²	37,52 kg/cm ²	46,90 kg/cm ²
B	Presión final de prensado en caliente	11,72 kg/cm ²	17,58 kg/cm ²	23,45 kg/cm ²
C	Tiempo final de prensado en caliente	3 min	5 min	7 min
	Valores transformados	-1	0	+1

La ecuación del modelo ajustado fue la siguiente:

$$Y = K_0 - K_1 A - K_2 B - K_3 C + K_4 AB + K_5 AC + K_6 BC - K_7 A^2 - K_8 B^2 - K_9 C^2 + E$$

Donde:

- Y : respuesta
- $K_0, K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6, K_7, K_8, K_9$: constantes de la ecuación modelo
- A, B, C : variables en estudio (valores transformados)
- AB, AC, BC : interacciones entre variables
- E : error

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 ANÁLISIS QUÍMICO DE LA PAJA DE ARROZ

Los Resultados del Análisis químico de la paja de arroz utilizado para la elaboración de los tableros de fibras se muestran en el cuadro N° 17; se incluyen análisis similares de paja de arroz obtenidos por Ibrahim y Fouad (1973) y Jeyasingam (1974)

Cuadro 17 Resultados del Análisis Químico de la Paja de Arroz.

Ensayo	Resultados presente estudio (%)	Resultados Ibrahim y Fouad ^a (%)	Resultados Jeyasingam ^b (%)
Contenido de Humedad	9,84	-	8,8
Celulosa	44,8	36,2	-
Hemicelulosa	-	24,5	21,0
Lignina	23,9	11,9	12,0
Geniza	18,0	16,1	24,8
Sílice	13,5	-	14,3
Extractivos en Alcohol – Benceno	6,6	-	2,1
Solubilidad en Agua Caliente	17,5	-	17,7
Solubilidad en Agua Fría	13,8	-	-

Fuente : Ibrahim y Fouad (1973)a , Jeyasingam (1974)b

En cuanto al contenido de humedad, Misra (1990), menciona que la medición de este parámetro en las balas de paja tiene mucha importancia en cuanto al deterioro que se produce durante su almacenamiento; siendo un contenido de humedad aceptable el que va de 8 al 14%, un contenido más elevado hace que la paja experimente ataques microbianos. Por lo tanto no hubo problemas de almacenamiento de la materia prima, según el contenido de humedad que se calculó. Los resultados de contenido de celulosa, demuestran que la paja de arroz, puede ser una materia prima para ser tomada en cuenta por la industria de pulpa, debido a que su contenido de celulosa es similar al de especies maderables y no maderables utilizadas en la manufactura de papeles, cartones y tableros, ver cuadro 02.

El resultado de contenido de lignina, fue de 23,9 %, el cual no se encuentra dentro del rango esperado, ver cuadro 02, y resultados de análisis previos, ver cuadro 17. Es posible que los

compuestos distintos a la lignina, no hayan sido removidos en su totalidad durante la hidrólisis de los carbohidratos, además la fracción inorgánica pudo haber sobre estimado el peso final de la muestra. Por otra parte el resultado del análisis de contenido de cenizas y sílice, demuestran que la paja de arroz es un material abrasivo, que puede traer problemas durante el desfibrado, si es que no se utilizan discos adecuados que prevengan su desgaste, aun cuando la presencia de sílice en paneles fabricados con esta materia prima, hacen de que estos sean resistentes al ataque de insectos xilófagos.

Los solventes polares como el alcohol y los solventes no polares como el benceno van a permitir la extracción de compuestos polares como las sales, gomas y carbohidratos, y la extracción de compuestos no polares, como resinas, cera y grasas, por lo tanto el ensayo de extractivos utilizando alcohol – benceno va a permitir la extracción de una mayor variedad de extractivos. El resultado del ensayo muestra que la paja de arroz tiene una proporción similar de extractivos al de las coníferas y latifoliadas (1 –10%), según Quinde (1982). Además, cabe agregar que la cantidad de extractivos va a afectar el rendimiento del pulpeo de la paja de arroz, debido a que el NaOH, utilizado durante el tratamiento químico, va a degradar los extractivos de la paja de arroz.

Por último, los resultados del análisis de solubilidad de la paja de arroz en agua caliente y fría, demuestran, que las hemicelulosas y algunos extractivos, son solubles también, en un medio acuoso, afectando posiblemente, el rendimiento del pulpeo, debido a que se utiliza agua como un agente regulador de calor y como medio de transporte de las fibras durante el desfibrado mecánico.

4.2 RESULTADOS FINALES DE LA OBTENCIÓN DE PULPA DE ALTO RENDIMIENTO

En el cuadro 18 se observan los resultados del pulpeo de paja de arroz empleando hidróxido de sodio (NaOH) al 5 % (bms) como reactivo del tratamiento químico.

Cuadro 18 Resultados Promedio de Pulpa de Alto Rendimiento de Paja de Arroz.

	Vacío	1era Etapa	2da Etapa
distancia entre discos (mm)	-	0,62	0,10
tiempo de desfibrado (minutos)	-	34	14
consumo de energía (A)	9,75	15,50	33,75
drenabilidad (OSR)	-	-	33
rendimiento (%)	-	-	81,36

La drenabilidad de la pulpa, se ve influenciada aparentemente, por el tratamiento químico, cuya relación es directamente proporcional a la cantidad de reactivo (NaOH), a mayor cantidad de álcali absorbido, mayor es la reacción entre el NaOH y las regiones amorfas de las fibras y las hemicelulosas, el desfibrado se realizará con mayor facilidad, produciéndose mayor cantidad de fibras largas, por lo tanto, mayor será la drenabilidad de la pulpa y menor la lectura de los grados de libertad Schopper Riegler (°SR). La influencia que tiene este reactivo se puede apreciar en el cuadro N° 19, donde Saldívar (2004), obtuvo pulpa de paja de arroz, utilizando como tratamiento químico hidróxido de sodio a diferentes concentraciones, a temperatura ambiente por 24 h. En cuanto al rendimiento de la pulpa químico mecánica de paja de arroz, esta se encuentra dentro del rango (\approx 80%), que muestra Cooper (1987) en el cuadro N° 03. Asimismo, el rendimiento es afectado por la presencia de hidróxido de sodio; este reactivo degrada las regiones amorfas de la celulosa, disuelve a las hemicelulosas y extractivos, disminuyendo el peso de la paja de arroz a medida que la cantidad de reactivo se incrementa durante el tratamiento químico, su influencia se puede apreciar en el cuadro N° 19.

Cuadro 19 Efecto de la Cantidad de Hidróxido de Sodio y la Drenabilidad de Pulpa de Alto Rendimiento de Paja de Arroz (*Oryza sativa*).

	Contenido de Hidróxido de Sodio (%)		
	0	2	4
Drenabilidad Schopper Riegler (°SR)	43	38	38
Rendimiento (%)	81,8	81,5	80,1

Fuente: Saldívar (2004)

4.3 EVALUACIÓN DE LA PULPA DE PAJA DE ARROZ

4.3.1 SOLUBILIDAD DE LA PULPA DE PAJA DE ARROZ EN NaOH (1%)

Cuadro 20 Solubilidad de la pulpa de paja de Arroz en una solución de Hidróxido de Sodio (1%)

Ensayo	Resultado del presente estudio
Solubilidad en NaOH (1%)	45,7

Las sustancias que son disueltas por acción del NaOH son: hemicelulosas, regiones amorfas de celulosa y extractivos. El resultado del análisis de solubilidad en NaOH (1%), muestra que la pulpa de paja de arroz, contiene aún cantidades considerables de hemicelulosa en su composición química, puesto que el 45,7 % de los compuestos químicos de la pulpa han sido solubilizados, mientras que el 54,3 % no se vio afectado; la fracción no solubilizable está compuesto por lignina, regiones cristalinas de celulosa y cenizas. Asimismo se comprueba la acción química del NaOH, durante el tratamiento químico de la paja de arroz, este reactivo hincha la hemicelulosa y regiones amorfas de celulosa, facilitando de esta manera, la acción mecánica del desfibrador de discos. Ibrahim y Fouad (1973), señalan que la paja de arroz en comparación con la madera, posee una pared celular mas delgada y menos densa, minimizando el problema de difusión del reactivo.

4.3.2 CLASIFICACIÓN DE FIBRAS

De acuerdo a los resultados obtenidos en el clasificador de fibras Bauer - McNett (cuadro N° 21) la mayor proporción de la pulpa corresponde a la fracción de finos, conformada por las fracciones + 200 y -200, seguido por las fibras cortas, correspondientes a las fracciones +50 y +100; la fracción de fibras largas, tamiz +30, es de 22 %. Estos resultados muestran la gran variabilidad, en cuanto a longitud de fibras, que posee la paja de arroz. Kuo et al (1998), explican que en la manufactura de los tableros de fibras obtenidos por vía húmeda, la fracción de fibras largas es importante en el desarrollo de las propiedades mecánicas, además de permitir un rápido drenado durante la formación del manto fibroso. Sin embargo, no hay un valor de referencia que demuestre el porcentaje mínimo de fibras largas requeridas en los tableros de fibras.

Cuadro 21 Clasificación de Fibras mediante el Fraccionador Bauer – McNett de 10 g (bms) de Pulpa de Paja de Arroz.

Fracción	Dimensión	Denominación	Retención %
+ 30	> mm	fibras largas	22
+ 50	> mm	fibras cortas	9
+ 100	> mm	fibras cortas	23
+ 200	> mm	finos	13
- 200	< mm	finos	33
Total			100

4.3.3 LONGITUD DE FIBRAS

En la Figura 12 se muestra el histograma y el polígono de frecuencia del análisis de dimensión de las fibras retenidas en la malla 30 mesh. En los resultados, se observa que predominan las fibras que tienen rango de longitud entre 542 a 2945 μ m, una media de 1610 μ m, con una proporción de 26 % de frecuencia relativa. Sin embargo, al efectuar el mismo análisis sobre la fracción retenida en la malla de 50 mesh, figura N° 13, se observa que el rango de longitud varía entre 478 a 1594 μ m, con una media de 974 μ m y una proporción de 24 % de frecuencia relativa. Se deduce, en apariencia, que la separación en la clasificación Bauer-McNett no separa completamente las fibras por longitud, pues fibras largas aparecen en el tamiz 50 y fibras cortas en el tamiz 30.

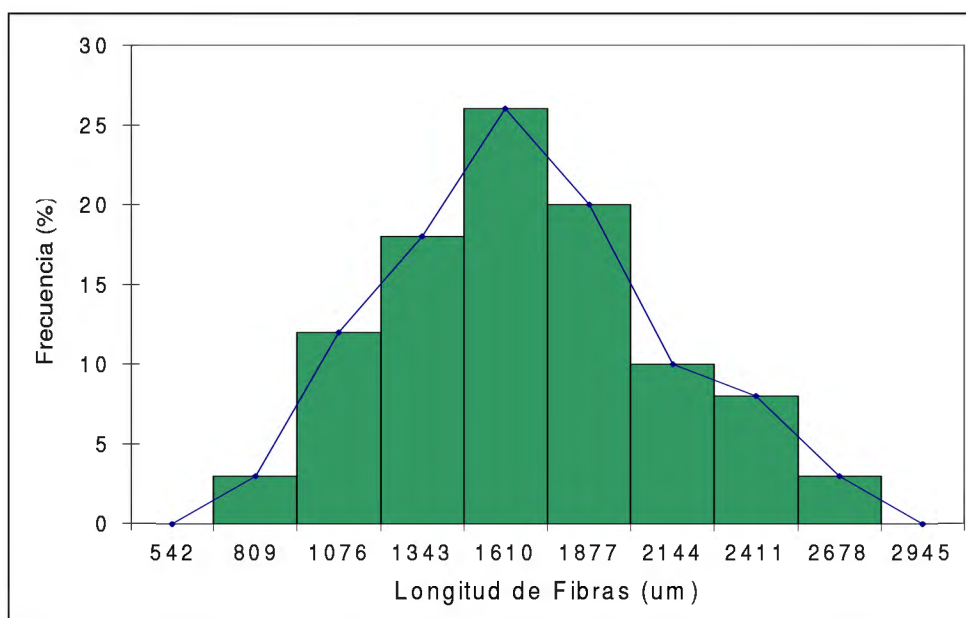


Figura 12 Histograma y Polígono de Frecuencia de las Fibras Retenidas sobre la Malla # 30.

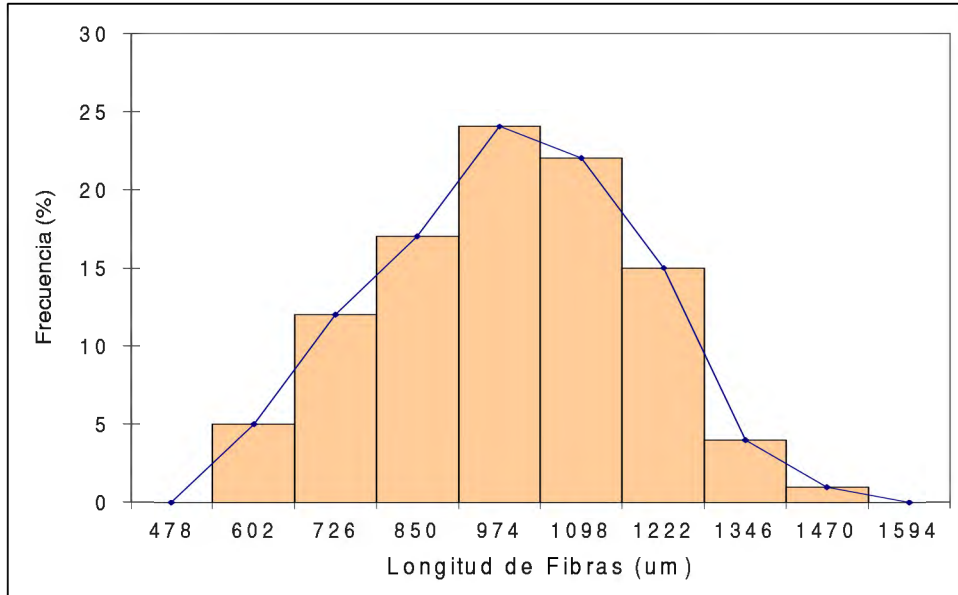


Figura 13 Histograma y Polígono de Frecuencia de Fibras Retenidas en la Malla # 50.

4.4 EVALUACIÓN FÍSICO MECÁNICA DE LOS TABLEROS DE FIBRAS

Los valores originales de los resultados de ensayos físicos y mecánicos de los tableros de fibras obtenidos a partir de paja de arroz se presentan en el anexo 01.

4.4.1 ESPESOR

La superficie de respuesta de las variaciones del espesor en función de las variaciones de los valores de presión inicial y final durante el prensado en caliente se muestra en la figura 14; los resultados del análisis estadístico se muestran en el anexo 02.

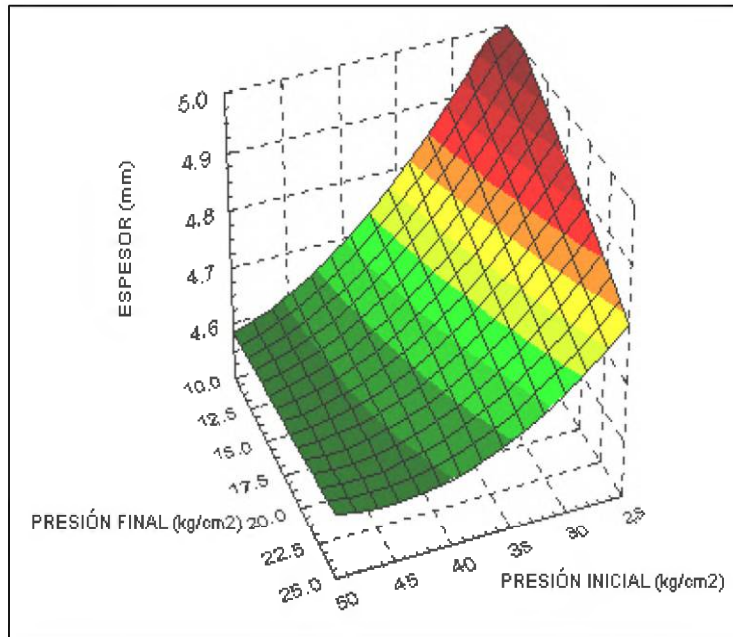


Figura 14 Superficie de Respuesta de las Variaciones del Espesor de los Tableros de Fibras en Función de las Variaciones de los Valores de Presión Inicial y Final.

La ecuación de regresión para el espesor en función de las variables es:

$$\text{Espesor} = 4.6822 - 0.1194 \cdot \text{Presión Inicial} - 0.0388 \cdot \text{Presión Final} + 0.0427 \cdot \text{Presión Inicial}^2 + 0.04 \cdot \text{Presión Inicial} \cdot \text{Presión Final}$$

El análisis estadístico con un coeficiente de regresión de 93,1% indica que existe una relación cuadrática de los valores de presión inicial sobre el espesor. La presión inicial y final ejercen una influencia altamente significativa sobre los valores de espesor del tablero: por el coeficiente de la ecuación, el efecto de la presión inicial es mayor que el de la presión final.

Conforme aumentan los valores de presión inicial y presión final, el espesor disminuye, en el presente estudio, de 5,0 mm a 4,6 mm, observándose una relación directa entre las variables y el resultado. Sin embargo, cuando los niveles de presión inicial superan los 37,5 kg/cm², el efecto sobre el espesor disminuye o deja de ser importante. Aparentemente, el efecto que provoca un nivel de presión inicial por encima de los 37,5 kg/cm², durante el prensado en

caliente, provoca que el contacto entre las fibras y la reducción de sus espacios vacíos, sea máximo, por consiguiente, la aplicación de niveles superiores de presión inicial y niveles de presión final superior a los 17.5 kg/cm^2 no afectará el espesor de los tableros. Por otra parte se encontró que la influencia del tiempo final de prensado no tuvo ninguna significancia en las variaciones del espesor.

4.4.2 CONTENIDO DE HUMEDAD

De acuerdo al coeficiente de regresión obtenido durante el análisis estadístico, para el caso de contenido de humedad de los tableros de fibras se observa que el grado de asociación de los valores de presión inicial y contenido de humedad es muy bajo, 7,2 %, mientras que los valores de la presión final y el tiempo final de prensado no ejercen influencia sobre los resultados del contenido de humedad, debido a que no hay ningún grado de asociación hallado en el análisis estadístico, ver anexo 03. Se concluye, en este caso que la ecuación hallada no es válida para efectuar predicciones sobre el comportamiento del contenido de humedad en relación a los valores presión final y tiempo, sin embargo la influencia ejercida por la presión inicial al cuadrado muestra un nivel de significancia alrededor de 90%.

Por tratarse de un resultado que influye en el comportamiento de las probetas durante los ensayos mecánicos, se tratará de establecer la influencia que tiene esta variable sobre los resultados del contenido de humedad. La superficie de respuesta de las variaciones del contenido humedad en función de las variaciones de presión inicial y final se aprecian en la Figura 15.

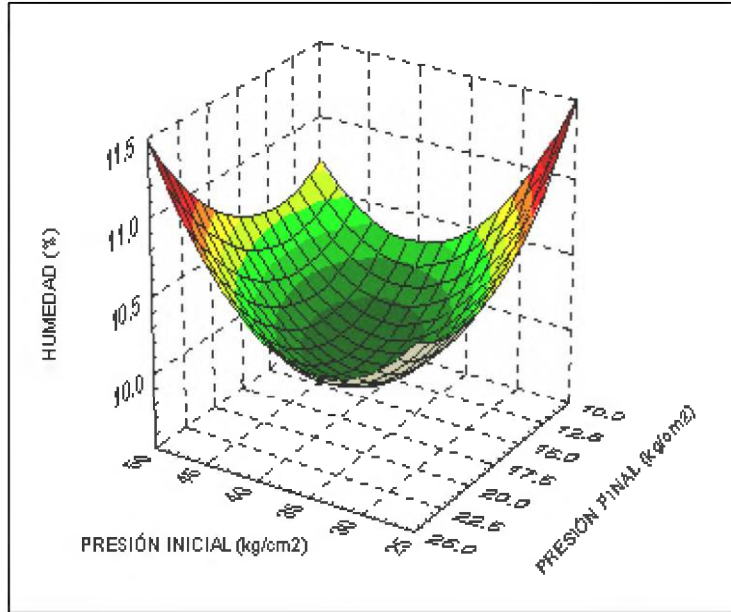


Figura 15 Superficie de Respuesta de las Variaciones del Contenido de Humedad de los Tableros de Fibras en Función de las Variaciones de los Valores de Presión Inicial y Final.

La disminución inicial del contenido de humedad por acción de la presión inicial, comienza cuando se fuerza la salida de agua en forma líquida y de vapor. La relación inversa entre la variable y resultado llegó a su máxima expresión (9.8 %); se presume que la eliminación de agua se realizó en forma integral en todo el tablero, tanto en las caras como en el centro.

Por otra parte, el incremento del contenido de humedad a medida que los niveles de presión inicial aumentan, pudo haber sucedido producto de la sobre densificación de las caras, la cual alteró la transferencia de calor desde los platos de la prensa hacia el centro del panel durante la segunda etapa de prensado en caliente, dificultando la salida de agua en forma de vapor del interior del panel hacia el exterior.

La presión final, según el gráfico 15, posee el mismo comportamiento que la presión inicial, tal vez, esta tendencia se deba a que inicialmente la presión final influye en la transferencia de calor, evacuando el agua que no se eliminó totalmente en la segunda etapa de prensado. Posteriormente, a medida que los niveles de presión final se incrementan, el comportamiento del contenido de humedad y la variable se vuelve directa, aparentemente la acción de niveles

elevados de presión final sobre el “mat” dificulta aún más la transferencia de calor para terminar de evaporar el agua de la zona central del tablero.

La influencia de la presión y la temperatura durante el prensado en caliente sobre el contenido de humedad fue estudiada por Tabarsa y Chui (1997). Ellos prensaron láminas de abeto blanco (*Picea glauca*), con un contenido de humedad inicial de 15 % y 12mm de espesor, encontrando una reducción del contenido de humedad, cuando la presión reduce el espesor hasta un 25% de su valor original (9 mm), para después sufrir un ligero incremento del contenido de humedad cuando se supera el 25 % de la tasa de compresión, aparentemente, producto de la sobre densificación de la lámina. La influencia de la presión sobre el contenido de humedad se aprecia en la figura N° 16. Winistorfer y Xu (1996), mencionan que las zonas altamente densificadas que poseen tableros MDF y OSB, absorben mayor cantidad de agua, debido a la mayor disponibilidad de material celulósico que existe en estas zonas para captar agua.

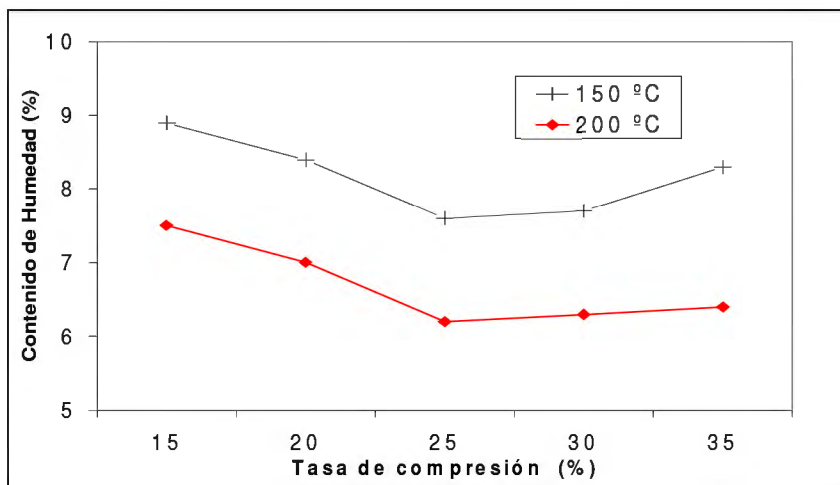


Figura 16 Influencia de la Presión y la Temperatura durante el Prensado en caliente sobre el Contenido de Humedad en láminas de Abeto blanco. Fuente: Tabarsa y Chui (1997)

4.4.3 BLANCURA

La superficie de respuesta de las variaciones de blancura en función de las variaciones de la presión inicial y presión final en la blancura se muestra en la figura 17; el análisis estadístico se muestra en el anexo 04.

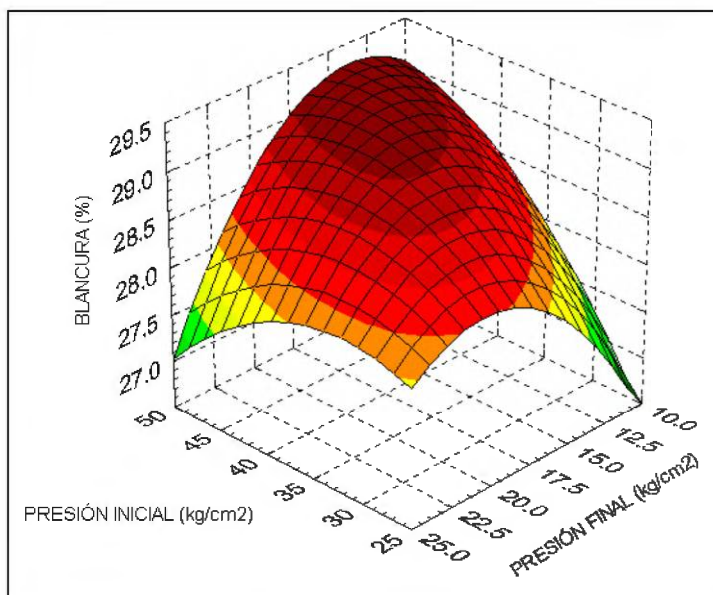


Figura 17 Superficie de Respuesta de las Variaciones de la Blancura de los Tableros de Fibras en Función de los Valores de Presión Inicial y Final.

La ecuación de regresión respectiva para blancura en función de las variables mencionadas es:

$$\text{Blancura} = 29.5185 - 0.8889 \cdot \text{Presión Inicial}^2 - 0.9722 \cdot \text{Presión Inicial} \cdot \text{Presión Final}$$

Según el análisis estadístico, entre los factores presión inicial y presión final con la blancura de los tableros, se encontró un coeficiente de regresión de 33,52 %, a un nivel de confianza significativo, hallándose además un efecto cuadrático de la presión inicial sobre la blancura: por el coeficiente de la ecuación, el efecto combinado de la presión inicial y final es mayor que el de la presión inicial al cuadrado.

Sanjuán (1997), menciona que la blancura es un atributo complejo de la sensación visual, por el cual un cuerpo se hace aproximadamente blanco, debido a su elevada claridad y la ausencia de tonalidad perceptible. El valor práctico más importante para caracterizar el tono de algún material es su brillantez, el cual se puede determinar tomando la lectura de reflectancia de la luz azul (357 a 360 nm), sobre un material, basada en la reflexión de una placa de óxido de magnesio que se considera como 100 % de blancura.

La blancura aumenta hasta un valor máximo, 29 %, cuando los valores de presión inicial y final son medios, sin embargo, cuando los valores de ambas variables superan los 37,5 y 17,5 kg/cm² respectivamente, la blancura disminuye. La acción combinada de ambas variables produce los máximos valores de blancura.

Aparentemente el aumento de la blancura se debe, a la disminución gradual de agua contenida en el interior del tablero, dando una sensación de una mayor claridad al tablero a medida que se evapora la mayor cantidad de agua. Los tableros prensados con valores superiores de presión inicial y final de 37,5 y 17,5 kg/cm² respectivamente, no permitieron la evacuación total de agua, dando la impresión de que estos tableros fueran menos claros que los que los prensados en condiciones intermedias. Por otra parte se encontró que la influencia del tiempo final de prensado no tuvo ninguna significancia en las variaciones de la blancura.

4.4.4 INCREMENTO EN VOLUMEN POR HINCHAMIENTO

La superficie de respuesta de las variaciones del incremento del volumen de los tableros de fibras después de estar sumergidos 24 horas en agua en función de las variaciones de los valores de presión inicial y presión final se muestra en la figura N° 18; los resultados del análisis estadístico se encuentran en el anexo 05.

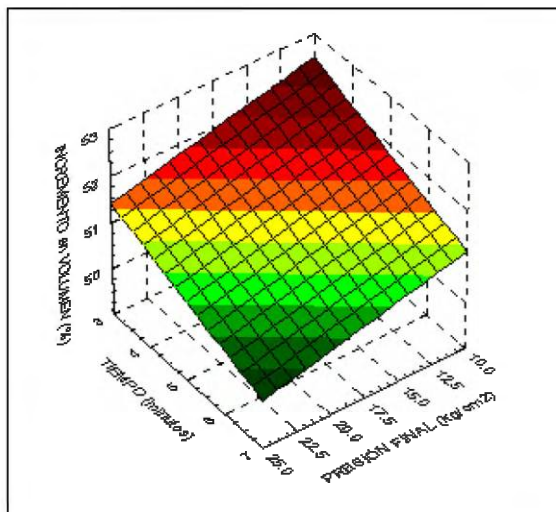


Figura 18 Superficie de Respuesta de las Variaciones del Incremento del Volumen de los Tableros de Fibras en Función de las Variaciones de los Valores de Presión Final y Tiempo.

La ecuación de regresión para el incremento del volumen, por hinchamiento, en función de las variables es:

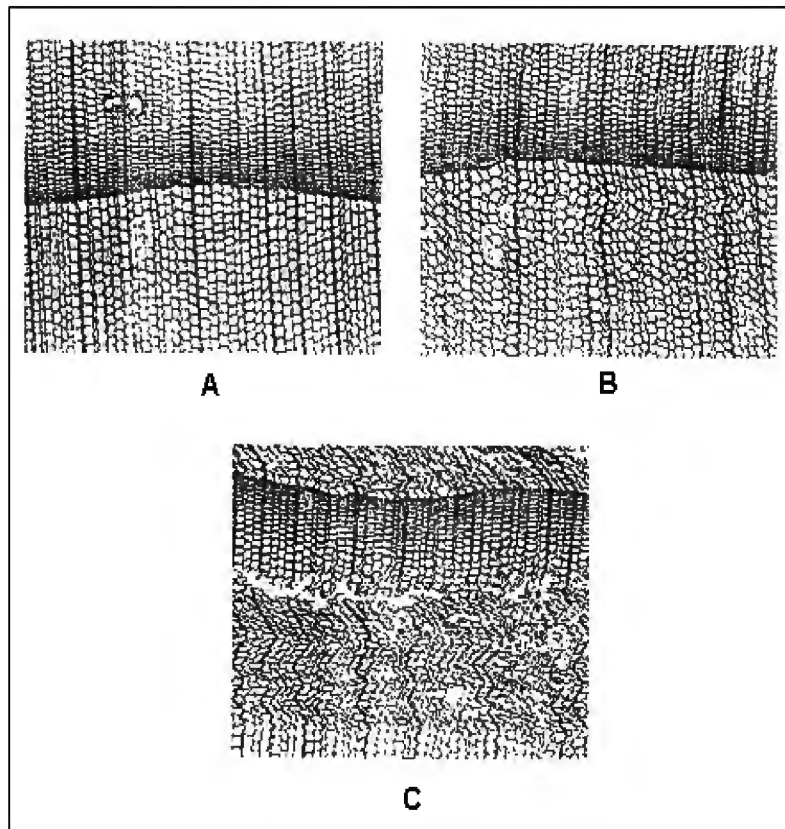
$$\text{Incremento en Volumen} = 51.1486 - 0.424866 * \text{Presión Inicial} - 0.254592 * \text{Presión Final} + 0.850235 * \text{Tiempo} + 0.941434 * \text{Presión Final} * \text{Tiempo}$$

En el análisis estadístico, entre los factores presión inicial, presión final y tiempo final de prensado con el incremento en volumen de los tableros de fibras, se encontró un coeficiente de correlación de 82,38% un nivel de confianza significativo de la influencia de los tres factores. La relación entre las tres variables con el incremento del volumen es de tipo lineal. En la ecuación de regresión se observa que, por los coeficientes, la presión final en acción conjunta con el tiempo final de prensado son los factores más significativos.

Winistorfer y Xu (1996) y Sanjuan (1997), mencionan que el incremento del volumen por hinchamiento se inicia cuando las paredes celulares comienzan a absorber agua debido a que estas se encuentran por debajo de su punto de saturación (contenido de humedad \leq 30 %). En estas circunstancias el agua se mueve a través de las paredes de las fibras creando gradientes de humedad, (movimiento de agua que existe desde una zona de mayor humedad hacia una de menor humedad), a través de la pared celular, creándose un fenómeno de difusión. Las paredes celulares de las fibras comienzan a adsorber agua, causando cambios dimensionales en las fibras y por consiguiente en el panel. La modificación de las dimensiones de las fibras llega a su fin cuando las paredes celulares se saturan de agua alcanzando el punto de saturación de las fibras. Tuset y Duran (1979), mencionan que el cambio dimensional es diferente en las tres direcciones de las fibras, o sea longitudinal, radial y tangencial, siendo los cambios tangenciales los mayores.

Conforme aumentan los niveles de presión final el incremento porcentual del volumen disminuye, mostrando una relación inversa. La reducción del incremento en volumen por acción de la presión final, se debe aparentemente, a la disminución paulatinamente del espesor de su pared celular. Es posible que cuando los niveles de presión final aumentaban y comenzaba la consolidación del "mat", por acción de la temperatura, las paredes celulares de las fibras comenzaban a sufrir un colapso en su estructura interna, hasta llegar a un nivel de

deformación plástica, en el cual las fibras ya no pueden recuperar sus dimensiones originales, tal como lo muestra Tabarsa y Chui (1997), en la figura 19.



Leyenda:

- A: fotografía de una sección del tablero prensado a 100 °C y una tasa de compresión del 12 % (75x).
- B: fotografía de una sección del tablero prensado a 100 °C y una tasa de compresión del 32 % (75x).
- C: fotografía de una sección del tablero prensado a 200 °C y una tasa de compresión del 32 % (75x).

Figura 19 Influencia de la Presión y la Temperatura durante el Prensado en Caliente de láminas de Abeto blanco. Fuente: Tabarsa y Chui (1997)

Ellos analizaron microscópicamente láminas de abeto blanco de 12mm de espesor, sometido a distintos niveles de presión y temperatura, revelando los distintos grados de colapso de la pared celular de los distintos elementos xilemáticos a medida que se incrementaban los niveles de presión y temperatura. De esta manera, se deduce, que las fibras fueron reduciendo su capacidad de alterar sus dimensiones al momento de absorber agua, por encontrarse compactadas y deformadas debido a la acción de la presión final y la temperatura.

Asimismo el tiempo final de prensado también muestra una relación inversa con el incremento en volumen por hinchamiento, aparentemente el tiempo final de prensado, favorece la consolidación final del panel, debido a que la lignina va a tener un mayor tiempo para fluir y solidificar a las fibras unas a otras, por lo tanto, la capacidad de las paredes celulares para cambiar sus dimensiones se verá reducida.

Por otro parte la presión inicial, también mostró una relación inversa con el incremento porcentual del volumen, aparentemente, a medida que aumentaban los niveles de presión inicial, el panel se hacía más denso, contribuyendo, de alguna forma, a la disminución del espesor de la pared celular.

4.4.5 INCREMENTO EN MASA POR ABSORCIÓN DE AGUA

La superficie de respuesta de las variaciones del incremento de masa por absorción de agua en función de las variaciones de los valores de presión inicial y final se muestra en la figura 20; el análisis estadístico se encuentra en el anexo 06.

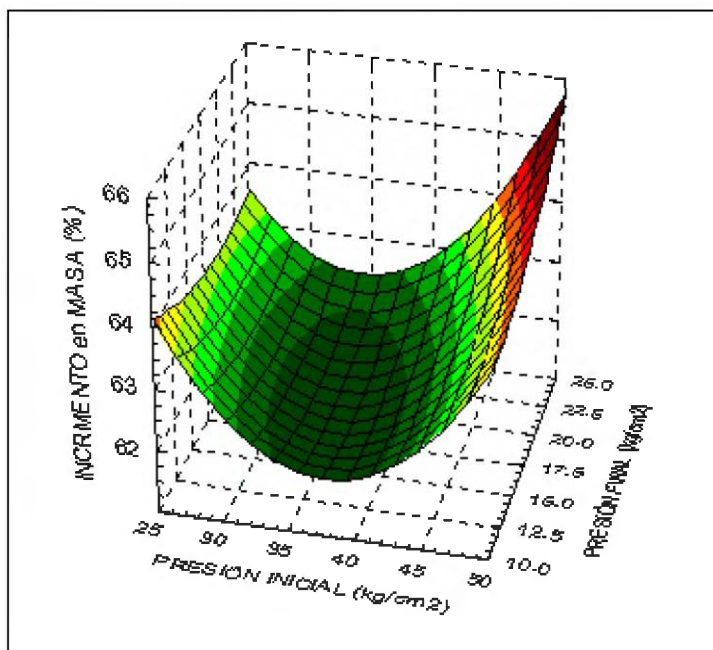


Figura 20 Superficie de Respuesta de las Variaciones del Aumento de Masa por Absorción de Agua de los Tableros de Fibras en Función de las Variaciones de los Valores de Presión Inicial y Final.

La ecuación de regresión para el incremento de masa, por absorción de agua, en función de las variables es:

$$\text{Incremento de masa por absorción de agua} = 61.9981 + 0.43675 * \text{Presión inicial} - 0.331687 * \text{Tiempo} + 1.23544 * \text{Presión inicial}^2 + 0.378969 * \text{Presión inicial} * \text{Presión final}$$

Según el análisis estadístico, entre los factores presión inicial y presión final con el incremento en masa por absorción de agua, se encontró un coeficiente de regresión de 62,05 %, a un nivel de confianza significativo por parte de la presión inicial, final y tiempo final de prensado, hallándose además un efecto cuadrático de la presión inicial sobre el incremento en masa. En la ecuación de regresión se observa que, por los coeficientes, la presión inicial al cuadrado es el factor más significativo.

Winistorfer y Xu (1996) y Sanjuán (1997), mencionan que el incremento en masa por absorción de agua se inicia cuando las paredes celulares de las fibras comienzan a absorber agua, por difusión, hasta el punto de saturación de las fibras. Una vez saturadas las paredes de las fibras el incremento en masa continua, pero a través de los lúmenes de las fibras. Este fenómeno denominado capilaridad, hace que el agua que rodea al panel, se mueva a través de las cavidades de las fibras.

Conforme aumentan los niveles de presión inicial el incremento porcentual en masa se hace menor, mostrando una relación inversa. Inicialmente el incremento en masa disminuye a medida que las fuerzas de flexión y compresión ejercidas por la presión inicial, provocan una disminución del volumen del lumen de las fibras y el aumento de los puntos de contacto entre las ellas, reduciendo la cantidad de espacios vacíos que puedan albergar moléculas de agua.

Una vez que la presión inicial ha superado su valor intermedio, 37,5 kg/cm², la relación entre la presión inicial y el incremento en masa, se vuelve directa. Según Winistorfer y Xu (1996), el aumento del incremento en masa pudo haber sucedido por la sobre densificación del panel; ellos encontraron que en los estratos de mayor densidad en paneles de MDF y Oriented strandboard, el aumento en incremento en masa fue mayor que en zonas menos densa, debido aparentemente, a que una mayor cantidad de material fibroso estuvo disponible para captar agua higroscópica (agua absorbida por las paredes celulares) y agua libre (agua almacenada en los lúmenes de las fibras), tal como lo muestra en la figura 21.

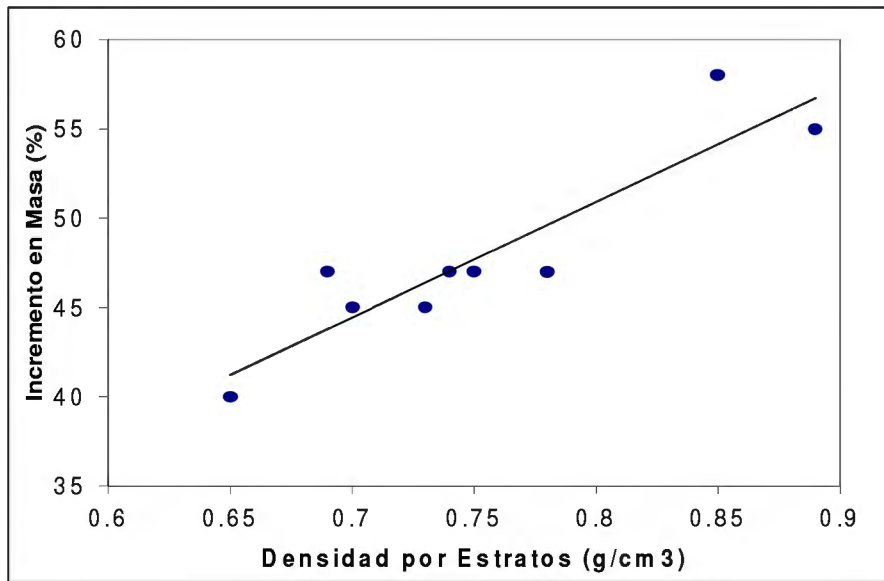


Figura 21 Influencia de la Densidad en el Incremento en Masa de Estratos de MDF sumergidos en agua por 8 horas.

Fuente: Winistorfer y Xu (1996).

De esta manera se presume, que los tableros prensados a un nivel superior de presión inicial de 37,5 kg/cm², sufrieron una densificación excesiva en las caras, aumentando la capacidad del tablero para absorber agua. Por otro lado la presión final mostró en general, una relación inversa con el incremento porcentual en masa, su acción en conjunto con la temperatura, pudo haber influenciado en la compactación y solidificación final entre las fibras, gracias a la acción de la lignina, reduciendo aún más los espacios vacíos entre las fibras.

Finalmente, se observó que el tiempo final de prensado también tuvo una influencia significativa en la variación en masa por adsorción de agua. Se apreció una relación inversa, en donde la variación del incremento en masa por absorción de agua disminuye, a medida que el tiempo se incrementa, se deduce que a mayor tiempo de prensado final, la transferencia de calor para que se produzca la plastificación de la lignina alcanzará a todo el tablero, haciendo que la mayoría de las fibras queden unidas y cubiertas por una delgada capa de lignina, haciendo de que las fibras se vuelvan de alguna manera más hidrofílicas. La superficie de respuesta entre el incremento en masa por absorción de agua y el tiempo final de prensado se aprecia en la figura 22.

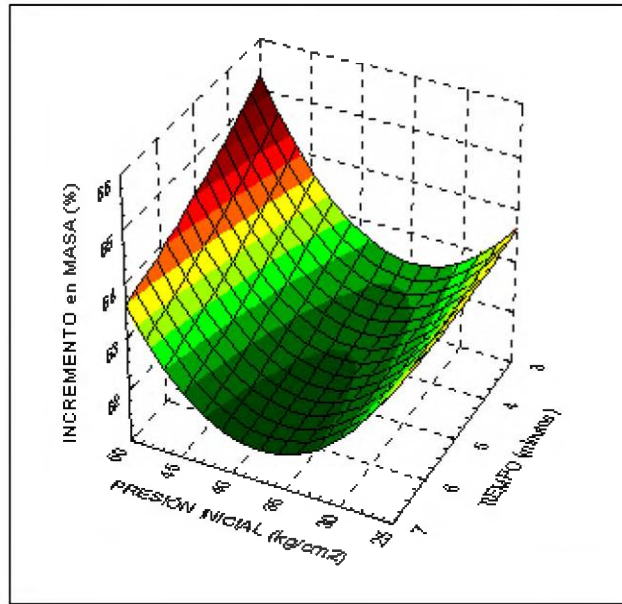


Figura 22 Superficie de Respuesta de las Variaciones del Incremento en Masa por Adsorción de Agua de los Tableros de Fibras en Función de las Variaciones de los Valores de Presión Inicial y Tiempo.

Por otro lado, pese a la aplicación de la colofonia, como un aditivo que eleva la resistencia a la penetración de agua y mejora la estabilidad dimensional de los tableros de fibras, todos los paneles mostraron valores superiores tanto en el incremento del volumen por hinchamiento como en el incremento en masa por absorción de agua, que tableros de fibras duros fabricados a partir de fibras de madera, cuyos requerimientos mínimos en cuanto al incremento en volumen y masa se aprecian en la norma mexicana NMX (1976) (cuadro 06) y la American Hardboard Association AHA (2002) (cuadro 08). Una probable explicación a estos resultados es que la pulpa de paja de arroz posee aún en su constitución fibrilar una elevada cantidad de hemicelulosas, como lo demuestra el análisis de solubilidad de pulpa de paja de arroz en NaOH (1%), (cuadro 20). Según los resultados, el 45,7 % de los compuestos químicos de la pulpa se solubilizaron, indicando de esta manera la presencia de este polisacárido y de regiones amorfas de celulosa, los cuales son solubles en un medio alcalino. La presencia de ambos compuestos en las fibras eleva la afinidad de las fibras por el agua, provocando un incremento superior en volumen y masa, que tableros fabricados a partir de fibras de madera.

4.4.6 DENSIDAD

La superficie de respuesta de las variaciones de densidad en función de las variaciones de presión inicial y presión final se muestran en la figura 23; los resultados de análisis estadístico de encuentran en el anexo 07.

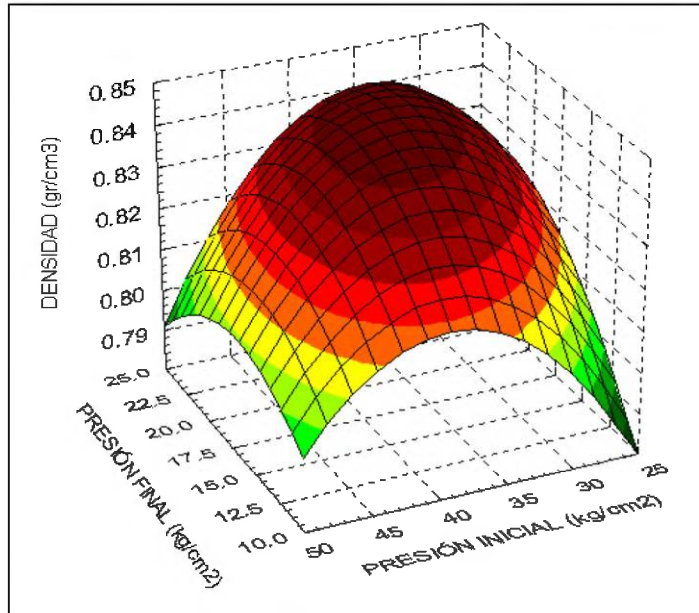


Figura 23 Superficie de Respuesta de las Variaciones de la Densidad de los Tableros de Fibras en Función de las Variaciones de los Valores de Presión Inicial y Final.

La ecuación de regresión para la densidad en función de las variables es:

$$\text{Densidad} = 0.8429 + 0.0072 * \text{Presión final} - 0.0173 * \text{Presión inicial}^2 - 0.0076 * \text{Presión inicial} * \text{Presión final} - 0.0085 * \text{Presión final}^2$$

Según el análisis estadístico, entre los factores presión inicial y presión final con la densidad de los tableros, se encontró un coeficiente de regresión de 59,83 %, a un nivel de confianza significativo, hallándose además un efecto cuadrático de ambos factores sobre la densidad. Por

los coeficientes de la ecuación, el efecto de la presión inicial al cuadrado es mayor que el de la presión final al cuadrado.

Tabarsa y Chui (1997) y Wolcott et al (1994), mencionan que cuando un material celular es sometido a elevados niveles de compresión transversal y temperatura, usualmente ocurre un colapso o daño permanente en la pared celular de los elementos xilemáticos formándose regiones altamente compactadas. Steiner y Dai (1993), mencionan que por efecto del prensado en caliente en tableros de hojuelas (flakeboards), ocurre una sobre densificación de las caras del panel, dificultando la transferencia de calor hacia el centro, produciéndose zonas altamente densificadas (caras), y otras con una densidad menor (centro).

La figura 23, muestra que los valores de densidad de los tableros de fibras de paja de arroz van aumentando hasta alcanzar su máximo valor (0.84 gr/cm³), a medida que los valores de presión inicial se incrementan de 25 kg/cm² a 37,5 kg/cm², mostrando una relación directa, esta tendencia, se explicaría porque a medida que los niveles de presión inicial aumentan, las fibras comienzan a plegarse y comprimirse, reduciendo el espesor del panel e incrementando su masa por unidad de volumen, aparentemente, en forma homogénea, tanto en las caras como en el centro. Zhang et al (1994), estudiaron la influencia de la presión sobre algunas propiedades en tableros LVL (laminated veneer lumber) de álamo (*Populus sp*), empleando 8 láminas de 3.2 mm de espesor c/u, a una temperatura de 155 °C durante el prensado en caliente; encontrando una relación directa entre la presión y la densidad. Ellos manifiestan que el aumento de la densidad pudo haber ocurrido por la densificación de las láminas producto del incremento de la presión, su influencia se aprecia en el cuadro 22.

Cuadro 22 Influencia de la Presión sobre algunas propiedades de Tableros LVL* de Álamo (*Populus sp*)

Presión (kg/cm ²)	Densidad (g/cm ³)	MOE (miles kg / cm ³)
11,6	0,509	78,02
14,6	0,519	82,48
17,6	0,584	95,98

* Tableros LVL: 8 láminas de 255 x 22 x 25 mm de largo, ancho y espesor respectivamente

Fuente: Zhang et al (1994)

La disminución de la densidad, cuando los niveles de presión inicial superan los 37,5 kg/cm² se podría explicar porque la presión inicial ejercida por los platos de la prensa, sobre densificó las caras, dificultando la transferencia de calor hacia el centro del panel, formando un tablero con una densidad inferior en la zona central, lo que posiblemente disminuyó la lectura de la densidad en el volumenómetro de Breouille.

La presión final tiene el mismo comportamiento que la presión inicial; solo hasta los 17,5 kg/cm², se establece una relación directa entre este parámetro y la densidad, se presume que esta tendencia se deba a que durante la etapa de presión final, se produce la solidificación del tablero, entonces a medida que se incrementan los niveles de presión final, el conglomerado de fibras estará más cohesionado para cuando la lignina se ablande, fluya y se plastifique por todo el manto fibroso. Sin embargo después de superar los 17,5 kg/cm² se ejerce una relación inversa entre la presión final y la densidad, probablemente, esta disminución de los valores de densidad se deba a la influencia de los elevados niveles de presión inicial sobre el “mat”, por lo que la solidificación final se realizó sobre un panel estratificado, por lo tanto la diferencia de densidades al interior del tablero se siguió manteniendo. Por otra parte se encontró que la influencia del tiempo final de prensado no tuvo ninguna significancia en las variaciones de la densidad.

Asimismo, los valores de densidad obtenidos con los distintos niveles de presión inicial, final y tiempo, muestran que todos los tableros de fibras obtenidos a partir de paja de arroz se encuentran catalogados como tableros de fibras duros dentro de la clasificación de paneles citada por Kollman (1975), ver cuadro 05.

4.4.7 MÓDULO DE RUPTURA

La superficie de respuesta de las variaciones del módulo de ruptura en función de la presión inicial y final se muestra en la figura 24; los resultados del análisis estadístico se encuentran en el anexo 08.

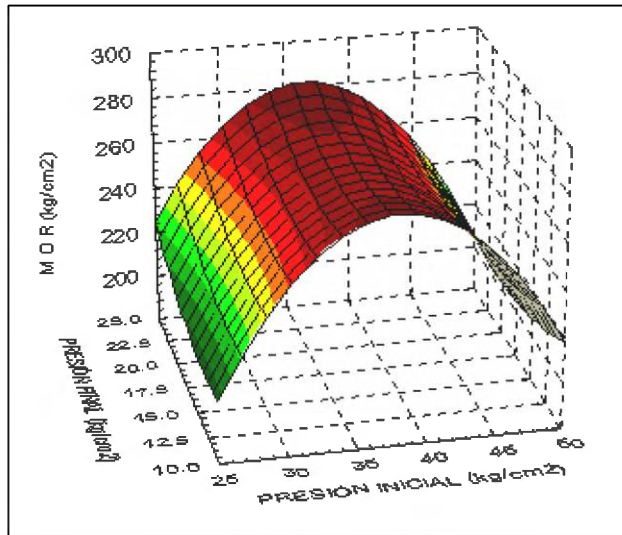


Figura 24 Superficie de Respuesta de las Variaciones del Modulo de Ruptura de los Tableros de Fibras en Función de los Valores de Presión Inicial y Presión Final.

La ecuación de regresión para el módulo de ruptura en función de las variables es:

$$\text{Módulo de ruptura} = 275.65 - 37.16 * \text{Presión inicial}^2$$

El análisis estadístico con un coeficiente de regresión de 43,39 % indica que existe una relación inversa, de orden cuadrática, entre la presión inicial y la densidad de los tableros de fibras, con un nivel de confianza significativo. El módulo de ruptura, indica el esfuerzo unitario máximo o la carga máxima que puede soportar un material sometido a fuerzas de compresión y tracción, hasta el momento de su falla o rotura. El efecto cuadrático que tiene la presión inicial sobre el MOR, incrementando sus valores hasta alcanzar un máximo valor para luego disminuir repentinamente, se debe aparentemente, a la densificación homogénea que alcanzaba el panel a medida que los niveles de presión inicial se incrementan hasta los 37,5 kg/cm² alcanzando un MOR máximo de 280 kg/cm² en promedio.

Por encima de los 37,5 kg/cm² de presión inicial, ya no se observa un incremento considerable del MOR, más bien se produce una disminución progresiva de los valores de MOR, es probable, que la variación vertical de la densidad del panel, así como el incremento de la

humedad, haya mermando la resistencia de los tableros de fibras para soportar una mayor carga.

Según el gráfico 24, la presión final tiene una relación directa con el MOR, tal vez la presión final en acción conjunta con la temperatura, hace que las fibras se mantengan mas unidas y compactadas al momento de que la lignina plastifica, haciendo que el tablero eleve su resistencia a las fuerzas de tracción y compresión, a medida que los niveles de presión final se incrementan. Por otra parte se encontró que la influencia del tiempo final de prensado no tuvo ninguna significancia en las variaciones del MOR. Asimismo, la mayoría de los tableros de fibras, en cuanto al módulo de ruptura cumplen con los requerimientos de la american hardboard asociation AHA (2000), ver cuadro N° 08, catalogando a los tableros de fibras de paja de arroz, como tableros de fibras de servicio.

4.4.8 MÓDULO DE ELASTICIDAD

La superficie de respuesta de las variaciones del módulo de ruptura en función a la presión inicial y final se muestra en la figura 25; los valores del análisis estadístico se encuentran en el anexo 09.

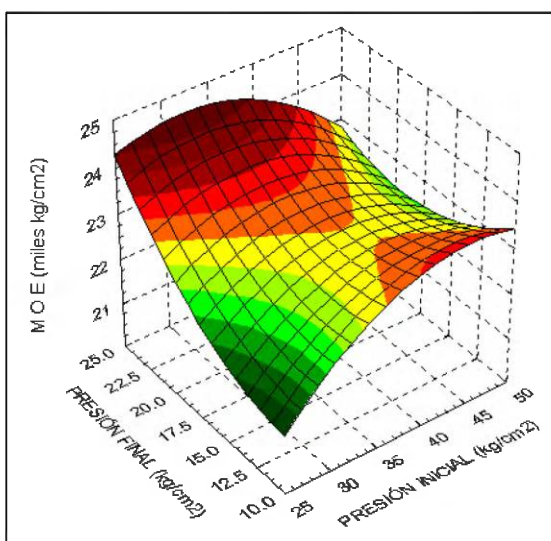


Figura 25 Superficie de Respuesta de las Variaciones del Modulo de Elasticidad de los Tableros de Fibras en Función de los Valores de Presión Inicial y Presión Final.

La ecuación de regresión para el módulo de elasticidad en función de las variables es:

$$\text{Módulo de elasticidad} = 25.09 + 1.111 * \text{Presión inicial} - 1.435 * \text{Presión inicial}^2$$

Según el análisis estadístico, entre el factor de presión inicial y módulo de elasticidad, se obtuvo una ecuación de predicción, con un bajo coeficiente de regresión, 21,30%, sin embargo la influencia de la presión inicial sobre el MOE muestra un nivel de significancia de 90%, observándose además un orden cuadrático de la presión inicial.

El módulo de elasticidad es una medida de rigidez que indica la facilidad o dificultad que tiene un material para oponerse a una carga, hasta el punto en que su deformación (cambios en tamaño y forma) pueda ser recuperable (deformación elástica). Inicialmente a medida que aumenta la presión inicial, aumentan los valores de MOE hasta alcanzar los 24 mil kg/cm², mostrando una relación directa. Esta tendencia se debe aparentemente, producto de la densificación del panel a medida que la presión inicial aumenta, tal como lo muestra Zhang et al (1994), en el cuadro 22.

La disminución del MOE, se produce, cuando los valores de presión inicial superan en promedio los 37,5 kg/cm², esta reducción paulatina de los valores de MOE, pudieron haber sido afectados por el contenido de humedad de las probetas, así como el daño permanente que sufren las paredes celulares de las fibras, observado por Tabarsa y Chui (1997) en la figura N° 19. El aparente colapso de la pared celular, pudo haber disminuido la capacidad de las fibras para soportar cargas que la deformen elásticamente, debido a que internamente la estructura de las fibras se encuentra quebrada, por lo tanto la rigidez del tablero se ve afectada a medida que se incrementan los niveles de presión inicial se hacen máximos.

Por otro lado en la figura 25, la presión final presenta una relación directa con el MOE, aparentemente a medida que aumentan los niveles de presión final, el manto fibroso se hace más compacto, al mismo tiempo que comienza la polimerización de la lignina, incrementando la rigidez del panel. Por otra parte se encontró que la influencia del tiempo final de prensado no tuvo ninguna significancia en las variaciones del MOE.

Finalmente, la mayoría de los tableros de fibras de paja de arroz, en cuanto al módulo de elasticidad, se encuentran ligeramente por debajo de los requerimientos que muestra Kollman (1975), para tableros de fibras duros de servicio, ver cuadro 08. Estos resultados, se pueden explicar, por que las fibras de paja de arroz, poseen una mayor proporción de fibras cortas y finos, ver cuadro 08, además de un menor contenido de lignina, ver cuadro 02, mientras que los paneles de madera, poseen una mayor proporción de fibras largas y de lignina, permitiendo que el manto fibroso este mejor conformado, gracias a un mayor entrecruzamiento entre las fibras, aumentando su resistencia a la deformación.

4.4.9 TRACCIÓN PERPENDICULAR AL GRANO

La superficie de respuesta de las variaciones de la tracción perpendicular al grano en función de las variaciones de los valores de presión inicial y final se muestra en la figura 26. Los resultados del análisis estadístico se encuentran en el anexo 10.

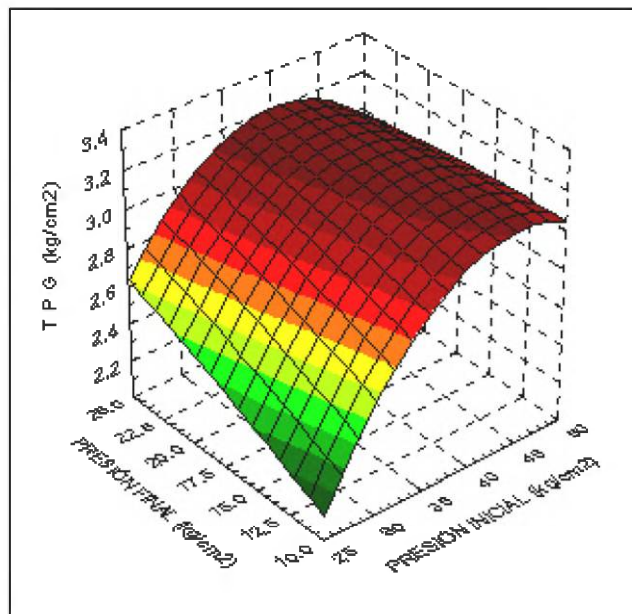


Figura 26 Superficie de Respuesta de las Variaciones de la Tracción Perpendicular al Grano de los Tableros de Fibras en Función de los Valores de Presión Inicial y Presión Final.

La ecuación de regresión para la tracción perpendicular al grano en función de las variables es:

$$\text{Tracción perpendicular al grano} = 3.166 + 0.2712 * \text{Presión inicial} - 0.2513 * \text{Presión inicial}^2$$

En el análisis estadístico, entre el factor presión inicial con la tracción perpendicular al grano, se encontró un coeficiente de correlación de 59,04% a un nivel de confianza significativo. La relación de la presión inicial con la tracción perpendicular al grano es de tipo cuadrática.

La TPG, es una medida de resistencia mecánica que permite evaluar el grado de cohesión interna que posee un panel, el cual se resiste a la acción opuesta de dos fuerzas que tratan de separarlo, denominadas fuerzas de tracción. A medida que aumenta los niveles de presión inicial, la TPG aumenta hasta alcanzar sus valores máximos, 3,2 kg/cm², para luego disminuir ligeramente cuando la presión inicial supera los 40 kg/cm². El incremento de la TPG, puede ser atribuido a que la transferencia de calor desde los platos de la prensa hacia el centro del “mat” se realizó en forma homogénea, otorgando al panel un contenido de humedad y una densidad uniforme.

El Wood Handbook citado por Suchsland y Xu (1991), mencionan que elevados niveles de densificación en paneles de hojuelas (flakeboard), no incrementa la TPG, más bien lo reduce, debido aparentemente a la fractura que sufren los elementos xilemáticos de las hojuelas. Además agregan que la TPG, también se ve influenciada, probablemente por la variación interna de la densidad, esto podría explicar por qué cuando se aplican dos fuerza opuestas a las caras de los tableros de fibras que tratan de separar a los elementos lignocelulósicos, la falla se produce en la zona menos densa. Esto podría explicar porque los tableros elaborados con los máximos niveles de presión inicial disminuyen su resistencia a la TPG, debido a la menor densificación que posee el centro del panel.

Según la figura 26, la presión final posee una relación directa con la TPG, aparentemente, a medida que aumentaban los niveles de presión final y se iniciaba la plastificación de la lignina, el “mat” incrementaba la cohesión entre fibras, elevando su resistencia a la TPG. Por otra parte

se encontró que la influencia del tiempo final de prensado no tuvo ninguna significancia en las variaciones de la TPG.

Finalmente, todos los valores de TPG, se encuentran ligeramente por debajo de los requerimientos de la dirección general de normas de México NMX (1976), ver cuadro N° 07 y la american hardboard asociation AHA (2000), ver cuadro 08. Esto podría explicarse debido a la influencia que tiene el tamaño de las fibras durante la formación del manto fibroso; mientras mayor sea la proporción de fibras largas el entrecruzamiento entre ellas será mayor, produciendo un colchón de fibras mejor constituido que uno formado en su mayoría con fibras cortas, como la que posee la pulpa de paja de arroz, analizada el cuadro 21.

4.4.10 DUREZA

La superficie de respuesta de las variaciones de la dureza en función de las variaciones de los valores de presión inicial y presión final se muestra en la figura 27; los valores del análisis estadístico se muestran en el anexo 11.

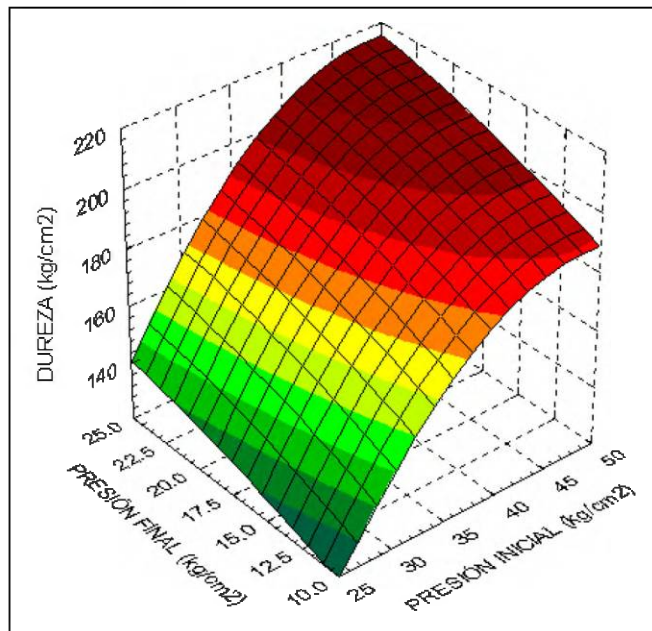


Figura 27 Superficie de Respuesta de las Variaciones de la Dureza de los Tableros de Fibras en Función de las Variaciones de los Valores de Presión Inicial y Presión Final.

La ecuación de regresión para la dureza en función de las variables es:

$$\text{Dureza} = 187.948 + 27.8209 \cdot \text{Presión inicial} + 10.1339 \cdot \text{Presión final} - 11.2039 \cdot \text{Presión inicial}^2$$

Según el análisis estadístico, entre los factores presión inicial y presión final con la dureza de los tableros, se encontró un coeficiente de regresión de 90,69 %, a un nivel de confianza muy significativo, hallándose además un efecto cuadrático por parte de la presión inicial sobre la densidad. Por los coeficientes de la ecuación, el efecto de la presión inicial es mayor que el de la presión final.

Los ensayos de dureza son denominados ensayos de penetración, debido a que esta prueba mide la resistencia que tiene un material en su superficie para soportar la penetración de un cuerpo, las deformaciones (profundidades de penetración), se determinan después de la aplicación de un peso durante un periodo pre establecido. En general se emplean dos métodos para medir la dureza de un material: dureza a la presión de la bola (materiales duros) y la dureza Shore A y dureza Shore D, ambas permiten utilizar probetas de hasta 4 mm de espesor, La presión aplicada para estos aparatos es de 12,5 N (Shore A, para materiales blandos) y de 50 N (Shore D, para materiales no muy blandos), la dureza se mide a los 3 segundos de ser aplicada la fuerza sobre el material. Para el presente estudio se utilizó el método de dureza Shore D, debido a que los tableros de fibras de paja de arroz, necesitaban una fuerza superior a los 12,5 N para la determinación de su dureza.

Según la figura N° 27, en un inicio, la relación entre la presión inicial y la dureza es directa, posteriormente a medida que los valores de presión inicial se aproximan a los extremos, la dureza alcanza su valor máximo, 220 kg/cm², para luego dejar de aumentar y mantenerse constante, esto sucede cuando los valores de presión inicial superan los 45 kg/cm².

Aparentemente, la relación directa que existe entre la presión inicial y la dureza, se deba a consecuencia de los elevados niveles de presión inicial. Un nivel superior a los 37,5 kg/cm², hace que el panel experimente una sobre densificación en las caras, por lo tanto, la superficie del panel se hará más resistente a la penetración de un cuerpo a medida que los niveles de

presión se incrementan. Es posible también, que las variaciones en el tamaño de fibra que posee la paja de arroz, ver cuadro 21, haya influido favorablemente en la dureza de los tableros, debido a la gran proporción de finos. Estos elementos actúan como agentes de relleno entre los espacios dejados por el entrecruzamiento de fibras largas y cortas, por lo tanto, los espacios vacíos se verán reducidos por estos elementos de relleno, haciendo que el tablero eleve su resistencia a la penetración de un cuerpo.

Por otro lado, la presión final muestra también una relación directa con la dureza, es probable, que a medida que aumentan los niveles de presión final, el “mat” alcanza una mayor consolidación entre sus fibras y por acción de la temperatura la solidificación del panel, haciendo que la superficie del tablero incremente su resistencia a la penetración de algún cuerpo a medida que aumentan los valores de presión final. Asimismo se encontró que la influencia del tiempo final de prensado no tuvo ninguna significancia en las variaciones de la dureza.

Finalmente, si se compara los resultados de dureza, con resultados en especies maderables, Aróstegui y Sato (1975), clasificarían a los tableros de fibras de paja de arroz, como paneles de una dureza baja (200 – 400 kg/cm²), siendo las especies maderables que más se asemejan a los tableros de fibras de paja de arroz en cuanto a dureza: ubos, catahua amarilla, cumala y el zapote.

5. *CONCLUSIONES*

El rendimiento de la pulpa a partir de paja de arroz proveniente del departamento de Lambayeque, presentó valores ligeramente por encima de lo reportado en la literatura para pulpas mecánicas. (R = 81.36%)

Debido al alto contenido de hemicelulosa que posee la paja de arroz, es que el incremento en volumen por hinchamiento (50%) y el incremento en masa por absorción de agua (62%), supera los requerimientos mínimos que deben tener un tablero de fibra duro de servicio.

Elevados niveles de presión inicial en caliente (46,90 kg/cm²) y de presión final en caliente (23,45 kg/cm²), causan una estratificación vertical de la densidad del tablero, ocasionando la reducción de las propiedades físicas y mecánicas.

De acuerdo a sus propiedades mecánicas, densidad (0.84 gr/cm³), MOR (280 kg/cm²), MOE (24 miles kg/cm²), TPG (3,2 kg/cm²), los tableros de fibras duros obtenidos a partir de paja de arroz, se clasifican, según la American Hardboard Association (2,000), como tableros de fibras de servicio.

6. RECOMENDACIONES

Para obtener los mejores resultados en cuanto a propiedades físicas y químicas de tableros de fibras duros por vía húmeda a partir de paja de arroz se recomienda aplicar la siguiente metodología: Presión inicial de 37,52 kg/cm², una presión final de 17,58 y un tiempo final de prensado de 3 minutos.

Emplear pulpa mecánica de paja de arroz proveniente de Lambayeque, como una futura alternativa para la manufactura de tableros de fibras duros.

De acuerdo a los resultados obtenidos, utilizar tableros de fibras duros obtenidos a partir de paja de arroz, como paneles para cielos rasos, divisiones de ambientes, puertas contraplacadas y revestimiento interno de carrocerías.

Producir tableros de fibras duros de paja de arroz por vía seca, con la finalidad de obtener tableros más resistentes en cuanto a las propiedades físicas y mecánicas.

Investigar más acerca de nuevas fuentes de materias fibrosas no maderables, como fuente de materia prima para abastecer a una industria de pulpa y sus derivados.

BIBLIOGRAFÍA

- AHA (American Hardboard Association). 2002. Today's Hardboard. USA. 9 p.
- Aróstegui, A; Sato, A. 1975. Características Tecnológicas de la Madera de 40 especies del Bosque Nacional Alexander Von Humbolt. Lima, PE, Universidad Nacional Agraria la Molina. v. III.
- Bagby, M y Clark, T. (1977). Kenaf for Hardboard. En: Non wood Plant Fiber Pulping. Georgia, USA, TAPPI. P. 9 – 13. (Progress Report N° 7)
- Bowyer, J y Stockman, V. (2001), Agricultural Residues an Exciting Bio – Based Raw Material for the Global Panels Industry. Forest Products Journal. 51 (1): 10 – 21.
- Bublitz, W; Casey, J. 1990. Pulpa y Papel. En: Química y Tecnología Química. MX, Limusa v. 1. Cap. 3. 950 p.
- Chandler, R. 1984. Arroz en los Trópicos. Guía para el desarrollo de programas nacionales. Instituto Interamericano de cooperación para la Agricultura. San José. Costa Rica.
- Cooper. 1987. Technical Asociation of Pulp and Paper Industry. TAPPI. Vol 70. N° 12: 231-232.
- Coté, W. 1980. Papermaking fibers. New York, USA, College of Environmental Science and Forestry, Syracuse University. 79 p.
- NMX. (Dirección General de Normas de México). 1976. Tableros de Fibra de Madera
- FAO. (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2001. Anuario. 243 p.
- García, E; Guindeo, C; Peraza, O; De Palacios, P. 2002. La Madera y su Tecnología. Madrid, ES, Fundación Conde del Valle Salazar, Mundi – Prensa. 322 p.
- Gonzáles, E. 2002. Étude des effets de la force de cisaillement au cours du raffinage PFI sur les propietés d'une pâte à haut rendement de pin gris, Trois Rivières, CAN, Université du Québec, Tesis Doctorat Génie papetier,
- Granum, R y Eustis, O. 1999. Hardboard What is it?. USA. 11 p.
- Grist, H. 1975. Arroz. MX. Compañía Editorial Continental S.A.

- Han, J. 1998. Properties of Nonwood Fibers. Proceedings of the Korean Society of Wood Science and Technology Annual Meeting. 12 p.
- Haygreen, J. y Bowyer, J. 1982. Forest Products and Wood Science an Introductions, Iowa. USA, The Iowa State University. 495 p.
- Ibrahim, H. y Fouad, Y. 1973. Industrial Experiences in the Utilization of Rice Straw in the Pulp and Paper Industries. En: Non Wood Plant Fiber Pulping, Georgia, USA, TAPPI. p. 37 – 48. (Progress report N° 4)
- Jeyasingam, T. 1974. Experience in Bleaching of Rice Straw Pulp and the Special Problems Connected with It. En: Non Wood Plant Fiber Pulping. Georgia, USA, TAPPI. p. 7 – 13. (Progress report N° 05)
- Keavney, J; Kulick, R; Casey, J. 1990. Pulpa y Papel. En: Química y Tecnología Química. MX, Limusa v.3. Cap. 16. 950 p.
- Kollman, F. 1975. Principles of wood science and technology II. Wood based materials. New York, USA
- Kuo, M; Adams, D; Myers, D; Curry, D; Heemstra, H; Smith, J; Bian, Y. 1998. Properties of Wood/Agricultural Fiberboard Bonded with Soybean – Based Adhesives. Forest Products Journal. 48 (2): 71 – 75.
- Kurdin, J; Casey, J. 1990. Pulpa y Papel. En: Química y Tecnología Química. MX, Limusa v.1. Cap.4. 950 p.
- Libby, C. 1974. Ciencia y Tecnología sobre Pulpa y Papel. MX, Continental, tomo.1. 2da edición, 534 p.
- Maloney, 1977. Modern Particleboard and Processes Fiberboard Manufacturing. USA, Miller Freeman Publications. 672 p
- Manterola, H; Cerda, D; Mira, J. 1999. Los Residuos Agrícolas y su Uso en la Alimentación de Rumiantes. Santiago, CHL, Fundación para la Innovación Agraria., Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad de Chile. 222 p

- MINAG (Ministerio de Agricultura del Perú). 2005. Estadísticas de Producción. Unidad de Información Agraria. Lima. PE
- Misra, D; Casey, J. 1990. Pulpa y Papel. En: Química y Tecnología Química. MX, Limusa v.1. Cap.4. 950 p.
- Moreno, J. 1985. Proceso de Fabricación de Tableros de Partículas. Lima, PE, Seminario I. Universidad Nacional Agraria la Molina. 162 p.
- Pacheco, V. 1988. Uso de Productos No Fibrosos en la Industria de la Pulpa y Papel. Lima, PE, Simposium de la Industria de Pulpa y Papel. Universidad Nacional de Ingeniería. 74 p.
- Park, B; Rield, B; Hsu, E; Shields, J. 1999. Hot – Pressing Process Optimization by Response Surface Methodology. Forest Products Journal. 49 (5): 62 – 68.
- Quinde, 1982. Química de la Madera. Lima, PE, Redinfor, Universidad Nacional Agraria la Molina
- Quintana, S. 2002. Elaboración y Evaluación Físico – Mecánica de Tableros de Fibra de Residuos del Aserrío de Tres Especies Forestales del CEIFOR – Puerto Almendra. Iquitos, PE, Universidad de la Amazonía Peruana, Tesis. Ing. Forestal. 67 p.
- Rosales, J. 1992. Pulpa Química a la soda de paja de Arroz (*Oryza sativa* L.) var. Naylamp y paja de Trigo (*Triticum aestivum* L.) var. Ollanta. Lima, PE, Universidad Nacional Agraria la Molina, Tesis. Ing. Forestal. 80 p.
- Rowell, R. 2001. Performance Driven Composites from Lignocellulosic Resources. Mar de Plata, ARG, International Conference on Science and Technology of Composite Material. 5p.
- Saldívar, V. 2004. Proyecto de tesis. Estudio de la paja de arroz en proceso de alto rendimiento para papel. Lima, PE, Universidad Nacional Agraria la Molina.
- Sanjuán, R. 1997. Obtención de Pulpas y Propiedades de las Fibras para Papel. Guadalajara, MX, Universidad de Guadalajara. Departamento de Madera, Celulosa y Papel. 284 p.
- Sellers, T. 2001. Wood Adhesive Innovations and Applications in North America. Forest Products Journal. 26 (4): 12 – 22.
- Steiner, P y Dai, C. 1993. Compression Behavior of Randomly Formed Wood Flake Mats. Wood and Fiber Science. 25 (4): 349 – 358.

- SUNAT (Superintendencia Nacional de Administración Tributaria) 2005. Portal Aduanero. Anuario 2000-2001.
- Tabarsa, T y Chui, Y. 1997. Effects of Hot-Pressing on Properties of White Spruce. *Forest Products Journal*. 47 (5): 71 – 76.
- Tinarelli, A. 1989. *El Arroz*. Madrid, ES, Ediciones Mundi – Prensa. 575 p.
- Tuset, R; Duran, F. 1979. *Manual de Maderas Comerciales, Equipos y Proceso de Utilización*. Montevideo, URG, Editorial Agropecuaria Hemisferio Sur. 688 p.
- Valade, J; Nam, K; Gonzáles, E. 1999. *Algunos Aspectos Sobre las Pulpas de Alto de Rendimiento: Pulpas Mecánicas Refinadas*. Trois Rivières, CAN, Centre de Recherche de Pates et Papiers, Université du Québec.
- Wolcott, M; Kamke, F; Dillard, D. 1996. Fundamental Aspect of Wood Deformation Pertaining to Manufacture of Wood – Based Composites. *Wood and Fiber Science*. 26 (4): 496 – 511.
- Winistorfer, P; Xu, W. 1997. Layer Water Absorption of Medium Density Fiberboard and Oriented Strandboard. *Forest Products Journal*. 46 (6): 69 – 72.
- Yang, H; Kim, D; Kim, H. 2003. Rice Straw – Wood Particle Composite for Sound Absorbing Wooden Construction Materials. *Bioresource Technology*. 86 (2) 117 – 121.
- Youngquist, J. 1999. *Wood handbook - Wood as an engineering material*. Department of Agriculture. USA, Forest Service. Forest Products Laboratory. 463 p.
- Zavala, D. 1994. Análisis de los Factores que Intervienen en el Proceso de Prensado de Triplay. *Revista de Ciencia Forestal*. 19 (76): 77 – 92.
- Zhang, H; Chui, Y; Schneider, M. 1994. Compression Control and its significance in the Manufacture and Effects on Properties of Poplar LVL. *Wood and Fiber Science*. 28 (4): 285 – 290.

ANEXO I

VALORES ORIGINALES DE ENSAYOS FÍSICOS MECÁNICOS

w O	Variables codificadas			Variables y sus Niveles			Respuestas									
	Presión Inicial	Presión Final	Tiempo	Presión Inicial (kg/cm ²)	Presión Final (kg/cm ²)	Tiempo (minutos)	Esesor (mm)	Humedad (%)	Blancura (%)	IV (%)	IM (%)	Densidad (gr/cm ³)	MOR (kg/cm ²)	MOE (kg/cm ²)	TPG (kg/cm ²)	DUREZA (kg/cm ²)
1	-1	-1	-1	28.14	11.725	3	4.94	10.28	28.00	53.75	63.34	0.78	232.92	23.05	2.29	138.22
2	0	-1	-1	37.52	11.725	3	4.70	9.14	28.33	52.52	62.71	0.84	258.32	24.62	3.22	156.35
3	1	-1	-1	46.908	11.725	3	4.62	11.42	28.67	52.46	63.59	0.81	218.48	22.54	3.29	194.87
4	-1	0	-1	28.14	17.587	3	4.90	10.90	27.67	52.43	62.77	0.82	220.75	20.36	2.54	148.42
5	0	0	-1	37.52	17.587	3	4.69	9.80	29.67	52.30	62.78	0.84	295.27	27.17	3.16	196.01
6	1	0	-1	46.908	17.587	3	4.61	10.93	29.33	52.17	64.35	0.83	235.50	26.98	2.89	201.67
7	-1	1	-1	28.14	23.45	3	4.77	10.59	28.00	51.24	62.61	0.83	252.87	23.64	2.86	150.69
8	0	1	-1	37.52	23.45	3	4.66	10.60	30.00	50.87	62.48	0.84	251.36	22.35	3.01	197.14
9	1	1	-1	46.908	23.45	3	4.60	10.61	27.00	50.13	64.45	0.81	255.43	25.72	3.46	209.60
10	-1	-1	0	28.14	11.725	5	4.93	11.92	27.67	52.37	63.05	0.83	223.50	20.09	2.48	145.02
11	0	-1	0	37.52	11.725	5	4.69	10.12	27.67	51.67	61.65	0.83	314.28	27.30	3.64	166.55
12	1	-1	0	46.908	11.725	5	4.62	9.74	30.67	51.24	63.29	0.82	231.46	25.08	3.00	205.07
13	-1	0	0	28.14	17.587	5	4.88	10.11	29.00	51.27	62.72	0.83	235.13	22.57	2.63	143.89
14	0	0	0	37.52	17.587	5	4.70	10.32	28.67	50.93	61.54	0.84	274.66	25.73	3.10	190.34
15	1	0	0	46.908	17.587	5	4.59	10.41	29.33	50.73	63.21	0.82	227.00	23.56	3.06	205.07
16	-1	1	0	28.14	23.45	5	4.76	10.25	27.33	51.10	62.54	0.84	249.07	24.36	2.88	154.09
17	0	1	0	37.52	23.45	5	4.67	10.68	30.67	50.62	61.98	0.84	253.40	24.24	3.32	203.94
18	1	1	0	46.908	23.45	5	4.59	9.98	26.00	50.65	63.99	0.82	244.76	27.25	3.15	210.73
19	-1	-1	1	28.14	11.725	7	4.93	10.80	27.33	50.47	62.98	0.79	219.33	19.52	2.54	150.69
20	0	-1	1	37.52	11.725	7	4.70	10.51	29.00	49.31	60.17	0.82	303.27	27.34	2.84	175.61
21	1	-1	1	46.908	11.725	7	4.62	10.26	30.00	48.07	63.03	0.81	259.95	25.97	3.41	197.14
22	-1	0	1	28.14	17.587	7	4.77	9.83	29.00	50.41	62.17	0.83	259.98	24.54	2.87	150.69
23	0	0	1	37.52	17.587	7	4.65	9.72	28.33	50.82	61.94	0.84	276.53	23.65	3.25	199.40
24	1	0	1	46.908	17.587	7	4.60	9.87	29.33	50.80	62.34	0.83	204.65	21.63	3.15	196.01
25	-1	1	1	28.14	23.45	7	4.72	10.02	29.00	51.08	62.98	0.84	268.97	24.83	2.71	158.62
26	0	1	1	37.52	23.45	7	4.68	10.07	30.33	51.36	62.72	0.84	253.16	23.48	2.98	206.20
27	1	1	1	46.908	23.45	7	4.60	11.48	26.00	50.24	64.78	0.81	251.93	24.21	3.27	220.93

Legenda: C E: Corrida experimental; IV: Incremento en volumen; IM: Incremento en masa; MOR: Módulo de ruptura; MOE: Módulo de elasticidad; TPG: Tracción perpendicular al grano.

ANEXO 2

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL ESPESOR

Análisis de variancia

Predictor	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Razón F	Valor P	Significancia
PI	0.256806	1	0.256806	291.56	0.0001	99.99%
PF	0.0272222	1	0.0272222	30.91	0.0001	99.99%
PI ²	0.0109796	1	0.0109796	12.47	0.0019	99.81%
PI*PF	0.0192	1	0.0192	21.80	0.0001	99.99%
Total error	0.0193778	22	0.000880808			
Total (corr.)	0.333585	26				

PI: Presión Inicial

PF: Presión Final

R-cuadrado: 94.1911 %

R-cuadrado ajustado: 93.1349 %

S: 0.0209053

Análisis de regresión

Constante	4.6822
PI	-0.119444
PF	-0.0388889
PI ²	0.0427778
PI*PF	0.04

Ecuación

Espeor= 4.68222 - 0.119444*PI - 0.0388889*PF + 0.0427778*PI² + 0.04*PI*PF

ANEXO 3

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL CONTENIDO DE HUMEDAD

Análisis de variancia

Predictor	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Razón F	Valor P	Significancia
PI ²	1.0281	1	1.0281	3.03	0.0941	90.59%
Total error	8.48696	25	0.339478			
Total (corr.)	9.51506	26				

PI: Presión Inicial

R-cuadrado: 10.805 %
R-cuadrado ajustado: 7.23717 %
S: 0.582648

Análisis de regresión

Constante	10.1072
PI ²	0.413944

Ecuación

Humedad= 10.1072 + 0.413944*PI²

ANEXO 4

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA BLANCURA

Análisis de variancia

Predictor	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Razón F	Valor P	Significancia
PI ²	4.74133	1	4.74133	4.45	0.0454	95.46%
PI*PF	11.3432	1	11.3432	10.66	0.0033	99.67%
Total error	25.5462	24	1.06442			
Total (corr.)	41.6307	26				

PI: Presión inicial

PF: Presión final

R-cuadrado: 38.6363 %

R-cuadrado ajustado: 33.5226 %

S: 1.03171

Análisis de regresión

Constante	29.5185
PI ²	-0.888944
PI*PF	-0.97225

Ecuación

$$\text{Blancura} = 29.5185 - 0.888944 \cdot \text{PI}^2 - 0.97225 \cdot \text{PI} \cdot \text{PF}$$

ANEXO 5

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL INCREMENTO EN VOLUMEN POR HINCHAMIENTO

Análisis de variancia

Predictor	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Razón F	Valor P	Significancia
PI	3.24921	1	3.24921	14.54	0.0009	99.91%
PF	1.16671	1	1.16671	5.22	0.0323	96.77%
Tiempo	13.0122	1	13.0122	58.24	0.0001	99.99%
PF*Tiempo	10.6356	1	10.6356	41.6	0.0001	99.99%
Total error	4.91573	22	0.223442			
Tota (corr.)	32.9794	26				

R-cuadrado: 85.0946 %

R-cuadrado ajustado: 82.3845 %

S: 0.472697

Análisis de regresión

Constante	51.1486
PI	-0.42486
PF	-0.25459
Tiempo	-0.85023
PF*Tiempo	0.941434

Ecuación

Incremento en Volumen= 51.1486 - 0.42486*PI - 0.25459*PF + 0.85023*Tiempo + 0.941434*PF*Tiempo

ANEXO 6

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL INCREMENTO EN MASA POR ABSORCIÓN DE AGUA

Análisis de variancia

Predictor	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Razón F	Valor P	Significancia
PI	3.43352	1	3.43352	9.80	0.0049	99.51%
Tiempo	1.980289	1	1.980289	5.65	0.0265	97.35%
PI ²	9.15788	1	9.15788	26.15	0.0001	99.99%
PI*PF	1.72341	22	1.72341	4.92	0.0372	96.28%
Total error	7.70534	26	0.350243			
Total (corr.)	24.0004					

R-cuadrado: 67.895 %
R-cuadrado ajustado: 62.0577 %
S: 0.591813

Análisis de regresión

Constante	61.9981
PI	0.43675
Tiempo	-0.331687
PI ²	1.23544
PI*PF	0.378969

Ecuación

Incremento en masa = 61.9981 + 0.43675*PI - 0.331687*Tiempo + 1.23544*PI² + 0.378969*PI*PF

ANEXO 7

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA DENSIDAD

E) DENSIDAD

Análisis de variancia

Predictor	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Razón F	Valor P	Significancia
PF	0.000938889	1	0.000938889	10.29	0.0041	99.59%
PI ²	0.00181424	1	0.00181424	19.89	0.0002	99.98%
PI*PF	0.000705333	1	0.000705333	7.73	0.0109	98.91%
PF ²	0.000439185	1	0.000439185	4.82	0.0391	96.09%
Total error	0.00200665	22	0.0000912113			
Total (corr.)	0.0059043	26				

PI: Presión Inicial

PF: Presión final

R-cuadrado: 66.0138 %

R-cuadrado ajustado: 59.8344 %

S: 0.00955046

Análisis de regresión

Constante	0.842926
PF	0.00722222
PI ²	-0.0173889
PI*PF	-0.00766667
PF ²	-0.00855556

Ecuación

$$\text{Densidad} = 0.842926 + 0.00722222 \cdot \text{PF} - 0.0173889 \cdot \text{PI}^2 - 0.00766667 \cdot \text{PI} \cdot \text{PF} - 0.00855556 \cdot \text{PF}^2$$

ANEXO 8

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL MÓDULO DE RUPTURA

Análisis de variancia

Predictor	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Razón F	Valor P	Significancia
PI ²	8284.1	1	8284.1	20.93	0.0001	99.99%
Total error	9894.61	25	395.785			
Total (corr.)	18178.7	26				

PI: Presión Inicial

R-cuadrado: 45.5703 %
R-cuadrado ajustado: 43.3932 %
S: 19.8943

Análisis de regresión

Constante	275.584
PI ²	-37.1576

Ecuación

Módulo de ruptura = $275.584 - 37.1576 \cdot PI^2$

ANEXO 9

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD

Análisis de variancia

Predictor	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Razón F	Valor P	Significancia
PI	22.2044	1	22.2044	5.81	0.024	97.60%
PI ²	12.3573	1	12.3573	3.23	0.0848	91.52%
Total error	91.7759	24	3.824			
Total (corr.)	126.338	26				

PI: Presión Inicial

R-cuadrado: 27.3566 %
R-cuadrado ajustado: 21.303 %
S: 1.9555

Análisis de regresión

Constante	25.0963
PI	1.11067
PI ²	-1.43511

Ecuación

Módulo de elasticidad = $25.0963 + 1.11067 \cdot PI - 1.43511 \cdot PI^2$

ANEXO 10

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA TRACCIÓN PERPENDICULAR AL GRANO

Análisis de variancia

Predictor	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Razón F	Valor P	Significancia
PI	1.32465	1	1.32465	30.7	0.0001	99.99%
PI ²	0.379178	1	0.379178	8.79	0.0068	99.32%
Total error	1.03569	24	0.0431539			
Total (corr.)	2.73952	26				

PI: Presión inicial

R-cuadrado: 62.1944 %
R-cuadrado ajustado: 59.0439 %
S: 0.207735

Análisis de regresión

Constante	3.16678
PI	0.271278
PI ²	-0.251389

Ecuación

Tracción perpendicular al grano = $3.16678 + 0.271278 \cdot PI - 0.251389 \cdot PI^2$

ANEXO 11

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA DUREZA

Análisis de variancia

Predictor	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Razón F	Valor P	Significancia
PI	13932.1	1	13932.1	216.08	0.0001	99.99%
PF	1848.52	1	1848.52	28.67	0.0001	99.99%
PI ²	753.17	1	753.17	11.68	0.0024	99.76%
Total error	1482.95	23	64.476			
Total (corr.)	18016.7	26				

PI: Presión Inicial

PF: Presión final

R-cuadrado: 91.7691 %

R-cuadrado ajustado: 90.6955 %

S: 8.02969

Análisi de regresión

Constante	187.948
PI	27.8209
PF	10.1339
PI ²	-11.2039

Ecuación

$$\text{Dureza} = 187.948 + 27.8209 \cdot \text{PI} + 10.1339 \cdot \text{PF} - 11.2039 \cdot \text{PI}^2$$