

ANÁLISIS DE LOS FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO DE PRENSADO DEL TRIPLAY.

Zavala Zavala David*

RESUMEN

El proceso de prensado es determinante de la calidad y productividad del triplay, para optimizarlo se requiere conocer los parámetros que intervienen en la formación del tablero, tales como la madera, el adhesivo, la temperatura y la presión. Las resinas para triplay (urea y fenol formaldehído), polimerizan a temperaturas elevadas y la humedad de la chapa y del adhesivo, además de retardar la polimerización de la resina, genera vapor cuya presión tiende a separar la chapa en forma de delaminaciones o "ponchaduras". Este trabajo se realizó con la finalidad de determinar y analizar la distribución de la temperatura en las líneas de pegamento, la presión que ejerce el vapor en el conglomerado y el efecto de la carga de los platos de la prensa en la compactación del triplay.

Los materiales utilizados fueron chapa de abeto Douglas con 6, 12, y 16% de contenido de humedad (C.H.), una prensa de 2' x 2' con fuente de calentamiento a base de vapor y resina de fenol formaldehído. La temperatura, la presión del vapor y la compactación del conglomerado durante el prensado, se midieron con sensores y convertidores de analogía a digital, a través de termopares, de tubos hipodérmicos y de convertidores lineales (LVDT). Se utilizó una temperatura de prensado constante de 148.8°C, y presiones de los platos de la prensa de 100, 125 y 175 psi. Los tableros se integraron con 5 chapas y con un tiempo de prensado de 1 000 segundos. La captura de datos y el control del proceso se realizó a través de una computadora.

La temperatura en las líneas de pegamento más externas aumenta rápidamente al cerrarse la prensa y mantienen una diferencia respecto a las dos líneas internas, que tiende a reducirse conforme avanza el prensado, para igualarse a los 400 segundos del

* Ingeniero Agrónomo Forestal, Ph.D., Investigador titular del CENID-COMEF, INIFAP, SARH.

proceso. La temperatura de 110-120°C a la que polimeriza la resina, se obtuvo después de 250 segundos en la línea de pegamento más interna, que se puede utilizar como indicador de la secuela de prensado.

La presión del vapor en el conglomerado, se incrementa rápidamente en las chapas externas al momento de cerrar la prensa, y posteriormente declina esa tendencia. En contraste, la presión del vapor en las líneas internas al inicio del proceso es baja y aumenta en forma constante conforme avanza el prensado.

La menor transferencia de calor y la mayor concentración de humedad en las líneas internas del pegamento, retarda la polimerización del adhesivo y por lo tanto determina las secuelas de prensado del triplay.

La compactación del tablero por efecto de la presión de los platos de la prensa, se manifiesta más drásticamente durante los primeros 400 segundos de prensado; para el tablero estándar fue de 9%. En contraste para tableros con 16% de C.H. y presiones altas (175 psi), la compactación fue de un 39% del espesor del triplay.

Palabras clave: Industria forestal, fabricación de triplay, proceso de prensado.

ABSTRACT

Plywood quality and productivity is determined by the pressing process. To optimize it, an understanding of the parameters involved in the production of boards is required, as wood, adhesive, temperature, pressure. The resins for plywood (urea and phenol formaldehyde) cured at high temperatures, the moisture of the veneer and the adhesive, besides delaying the polymerization of the resin, produces vapor pressure that tends to separate the veneer through delaminations or "blows". The present study was carried out to determine the distribution of temperature in the glue lines, the vapor pressure in the laminate and the effect of the platen load on plywood compaction.

Douglas fir veneer with 6, 12 and 16% of moisture content (M.C.), a press with 2' x 2' platens heated with steam and phenol formaldehyde resin were used. Temperature, vapor pressure and compaction of plywood during pressing were measured with digital to analog convertors using thermocouples, hypodermic tubes and a linear variable differential transducer (LVDT). A constant pressing temperature of 148.8°C (300°F) and platen loads of 100, 125 and 175 psi were applied. Plywood was made up of 5

layers, with a pressing time of 1 000 seconds. Data collection and process control was achieved with a personal computer.

Temperature in the outer gluelines rise quickly after the press is closed, with a gradient in relation to the inner gluelines that tends to diminish throughout the pressing cycle, reaching similar temperatures at 400 seconds. The resin polymerization temperature of 110-120 ° F in the inner glueline was achieved after 250 seconds, period that can be used as indicator of the pressing cycle.

Vapor pressure in the conglomerate rises rapidly in the outer veneers when the press is closed, decreasing this trend a few seconds later. In contrast, vapor pressure in the inner veneers at the begining of the pressing cycle is low and increases in a constant trend throughout the process.

The lower rate of heat transfer and the higher concentration of moisture in the inner gluelines, delay the polimerization of the adhesive, both factors affect the pressing schedules.

The rate of board compactation by the platen press was higher within the first 400 seconds. For the standar board the compactation was 9% of the original thickness, and for boards with 16% M.C. and high platen loads (175 psi), the compactation was 39 % of plywood thickness.

Key words: Forest industry, plywood manufacture, pressing process.

INTRODUCCIÓN

En la producción de tableros contrachapados (triplay), es importante entender el comportamiento de los diferentes factores que intervienen en el prensado, debido a que esta parte del proceso es determinante tanto para la calidad final, como de los volúmenes de producción de triplay.

El prensado del triplay es la fase de producción donde interaccionan las características de la chapa (textura, densidad, contenido de humedad, energía de la superficie, etc.), con las propiedades del adhesivo (peso molecular, contenido de sólidos, viscosidad, pH), a través de la acción de la temperatura y de la presión de los platos de la prensa sobre el conglomerado de chapas para la integración del tablero. La función de la

temperatura es acelerar la polimerización del adhesivo y a través de la presión de los platos facilitar el contacto entre las chapas y el pegamento (Figura N° 1).

Los adhesivos más utilizados en la elaboración de triplay son urea y fenol formaldehído, y su selección depende del uso final al que se destine el tablero, para interiores generalmente se utilizan las resinas de urea y para exteriores las fenólicas. Estos dos tipos de adhesivos polimerizan a temperaturas elevadas, el tiempo necesario para que polimericen a un nivel apropiado que permita la integración del tablero, depende de las características de los adhesivos y de la transferencia de calor al adherente (chapa).

Una alternativa para incrementar los volúmenes de producción de triplay, es reducir al mínimo posible el tiempo de prensado del conglomerado, lo cual puede lograrse conociendo la interrelación de los componentes del tablero (madera-adhesivo), con las variables del proceso (temperatura, presión y tiempo de prensado). Con el dominio de estos parámetros es posible determinar el tiempo mínimo de prensado que asegure la integración del tablero y elimine cualquier posible fuente de delaminación del triplay por la falta de una polimerización adecuada de la resina.

El presente trabajo se realizó con la finalidad de determinar y analizar los factores que intervienen en el proceso de prensado del triplay y su interacción en condiciones estandares y modificadas de producción, con énfasis en la determinación de la distribución de la temperatura y de la presión del vapor generado durante el prensado del conglomerado; además del efecto del contenido de humedad de la chapa, de la presión y de la temperatura de los platos de la prensa, en la compactación del triplay.

2. ANTECEDENTES

El prensado del conglomerado se considera la fase mas importante en la producción de triplay por el efecto que tiene la interacción de la presión de los platos, de la temperatura y del tiempo de prensado, en la calidad de los tableros y en la productividad de las empresas.

A través de la prensa se generan presiones moderadas para establecer un buen contacto entre el adhesivo y las chapas; también se obtienen las temperaturas requeridas (110 a 130 ° C), para el fraguado de los adhesivos termostables (urea y fenol formaldehído). El tiempo para lograr un curado adecuado de estos adhesivos varía de unos cuantos

minutos a las temperaturas indicadas, hasta varias horas con temperaturas inferiores; influyendo también en las características de los adhesivos y la transferencia de calor del adherente (Chow y Mukai, 1972¹, Gould, 1959², Klein, 1979³, Marian y Stumbo, 1962⁴).

2.1. Interacción de variables durante el proceso de prensado

La integración del conglomerado de chapas para producir el triplay, depende del efecto de la interacción del calor y de la presión generados por la prensa sobre la chapa, el adhesivo y el C.H. de la línea de pegamento. La presión y la temperatura generadas por los platos de la prensa, obligan a la chapa a establecer contacto con el adhesivo y al mismo tiempo aceleran su polimerización (Figura No. 1).

Como se esquematiza en la figura No. 1, la transferencia de calor y de masas, resultante del efecto de la temperatura y de la humedad, genera vapor, el cual ejerce presión dentro del triplay que tiende a separar la chapa al intentar liberarse del inferior del tablero. La resistencia de la línea de ensamble para contrarrestar la presión interna del vapor, depende del grado de polimerización que haya alcanzado el adhesivo, y la reactividad del adhesivo a su vez la determinan las características de sus componentes y la temperatura aplicada al tablero a través de los platos de la prensa (Humphrey y Bolton, 1979⁵; Zavala, 1986⁶ y Zavala 1984⁷).

Si la reactividad de la resina no es lo suficientemente alta para mantener unidas las chapas, los esfuerzos producidos por la presión del vapor en la línea del pegamento pueden causar delaminaciones. La integración del tablero, por lo tanto, depende del desarrollo de una mayor resistencia del pegamento que contrarreste la fuerza de la presión residual del vapor y de la elasticidad de la chapa al momento de abrir la prensa, (Figura N° 1).

La velocidad de curado de las resinas termostables depende de la temperatura, y ésta, en las partes internas del conglomerado durante el prensado, está en función de la

¹Chow, S. and H.M. Mukai. 1972. "Polimerization of phenolic resin at high vapor pressure". pp. 65-72.

²Gould, F.O. 1959. "Phenolic resins". pp 26-125.

³Klein, A.J. 1979. "Controlling glue costs and hot press production to improve construction plywood quality and profitability". pp. 4.

⁴Marian, J.E. and D.A. Stumbo. 1962. "Adhesion in wood. Part I and II". pp. 168-180.

⁵Humphrey, P.E. and A.J. Bolton. 1979. "Urea formaldehyde resin bond strength development with reference to wood particle-board manufacture". pp. 129-133.

⁶Zavala Z., D. 1986. "Analysis of processes operative within plywood during hot pressing". pp 201.

⁷Zavala Z., D. 1984. "Factors controlling the adhesion characteristics of phenolic resins on veneer for plywood production". pp. 12.

transferencia de calor y de masas (humedad, vapor y aire). La transferencia de calor se asocia con las características de la madera y con los parámetros del prensado. La conductividad térmica de la madera depende de la densidad, del C.H., de la orientación de las fibras, de la dirección del flujo del calor (dirección radial, tangencial o longitudinal) y de las irregularidades de su estructura (nudos, rajaduras) (Kollmann y Côté, 1968⁸, Lewis, 1967⁹, Siau, 1985¹⁰, Strickler, 1959¹¹, U.S. F. P. L., 1974¹² y Wangaard, 1969¹³).

PROCESOS QUE INTERACCIONAN EN EL PENSADO

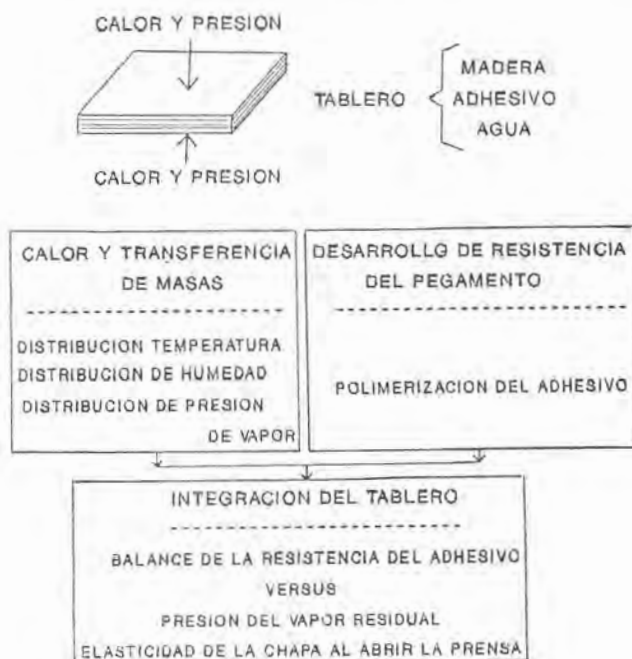


Figura N°1. Interacción de procesos durante el prensado de triplay.

⁸Kollmann, F.F.P. and W.A. Côté. 1968. *Principles of wood science and technology*.

⁹Lewis, W.C. 1967. *Thermal conductivity of wood-based fiber and particle panel materials*.

¹⁰Siau, J.F. 1984. "Transport processes in wood". pp. 151-232.

¹¹Strickler, M.D. 1959. "Effect of press cycles and moisture content on properties of Douglas-fir flakeboard". pp. 203-215.

¹²U.S. Forest Products Laboratory. 1974. *Wood handbook: "Wood as an engineering material"*. pp. 3- 19:3-22.

¹³Wangaard, F.F. 1969. "Heat transmissivity of southern pine wood, plywood, fiberboard, and particleboard". pp. 54-60.

2.2 Efecto de la temperatura de los platos de la prensa en la integración del tablero

La madera es un conductor de calor relativamente pobre, por esta razón, para acelerar la velocidad de curado del adhesivo en el conglomerado de chapas, se requiere aplicar temperaturas elevadas a través de los platos de la prensa. El tiempo mínimo de prensado para asegurar la polimerización del adhesivo, dependerá del efecto combinado de los factores que controlan la integración del tablero, como la reactividad del adhesivo, determinada por el tipo de polímero y por el efecto del catalizador; la capacidad de recuperación de temperatura de los platos, que depende del sistema de calentamiento de la prensa (eléctrico, vapor, aceite térmico); la presión ejercida por los platos sobre el conglomerado; la difusión térmica y de masas en el tablero que se está calentando (madera, adhesivo, agua); y la distancia de los platos de la prensa a la línea de pegamento más interna, (Bodig y Jayne, 1982¹⁴; Gould, *op. cit.*; Klein, 1979¹⁵; Marian y Stumbo, *op. cit.*; Rudnicki, 1975¹⁶; Sellers, 1985¹⁷).

Para el prensado de triplay con resinas fenólicas, la temperatura de los platos cuando el calentamiento es a base de vapor, varía de 120 a 150 °C, y el tiempo de prensado de 1 a 3 minutos para paneles de 6 mm (2 mm a la línea de pegamento más interna). Se utilizan de 3 a 5 minutos para paneles de 12 mm (4 mm a la línea de pegamento más profunda), y de 10 minutos o más para paneles con espesores mayores de 16 mm, (Baldwin, 1975¹⁸; Knight, 1952¹⁹ y Siau, *op. cit.*).

2.3. Efecto de la presión de los platos de la prensa en la formación y compactación del tablero.

Una de las funciones principales de la presión de los platos de la prensa en la formación del triplay, es la de aplicar una carga uniforme sobre las superficies de las chapas para forzarlas a establecer un buen contacto con el adhesivo, para facilitar que fluya y humedezca las áreas de la línea del pegamento. Si las superficies de la chapa fueran tersas y uniformes en espesor, se podría lograr un buen contacto con el

¹⁴Bodig J., and B.A. Jayne. 1982. *Mechanics of wood and wood composites*. 712 p.

¹⁵Klein, A.J. 1979. "Controlling glue costs and hot press production to improve construction plywood quality and profitability", pp. 4.

¹⁶Rudnicki, Z. 1975. "Effect of temperature and setting time on strength and durability of phenolic or resorcinol base gluelines". pp. 62-173.

¹⁷Sellers, T. Jr. 1985. "Plywood and adhesive technology", pp. 653.

¹⁸Baldwin R., F. 1975. "Plywood manufacturing practices". pp. 149-232.

¹⁹Knight, R.A.G. 1952. "Adhesives for wood". pp 58-105.

pegamento y se facilitaría su adhesión con presiones no mayores de 50 psi (Freeman, 1959²⁰ y Knight, *op. cit.*).

Otra función de la prensa es mantener unidas las chapas durante el proceso de curado del adhesivo, especialmente cuando la fuerza (presión) del vapor en las líneas del pegamento está aumentando y tiende a separar la chapa del conglomerado. La influencia destructiva de la presión de vapor acumulada dentro del tablero tiene que ser contrarrestada por la carga de los platos de la prensa, (Humphrey y Bolton, *op. cit.*).

En la producción de triplay, se sugiere utilizar tanta presión o carga, de los platos como pueda resistir la chapa sin que se presente una compresión excesiva de la estructura de la madera. La definición de la presión de la prensa depende de la densidad de la madera utilizada y del efecto combinado que tiene el C.H. y la temperatura en la compactación de la chapa. Para maderas densas, como el encino, se sugiere utilizar presiones de 150 a 250 psi, y para maderas de densidad moderada como la mayoría de las coníferas, generalmente no revasan 175 psi (Baldwin, *op. cit.*; Chow *et al.*, 1973²¹; Erb, 1968²² y Knight *op. cit.*).

Con la finalidad de recuperar parte del volumen perdido por la compactación del conglomerado durante el prensado, algunas empresas aplican agua rociada en las caras del tablero inmediatamente después de salir de la prensa. La recuperación de espesor del tablero se logra por la propiedad de elasticidad de la madera, que se manifiesta en regresar a su forma original cuando aún no se ha revasado su fase plástica donde la deformación ya es permanente. (Balwin, *op. cit.*; Sellers, *op. cit.* y Wellons *et al.*, 1983²³).

Para lograr un equilibrio entre estos dos parámetros, (compactación y transferencia de calor), la nueva tecnología sobre prensado de triplay, se ha enfocado al desarrollo de equipos que permitan aplicar presiones en 2 o 3 fases, sometiendo el tablero a presiones altas (175 psi) durante el inicio del proceso para forzar el contacto entre la chapa y el pegamento, liberando paulatinamente esta presión conforme avanza el prensado (150 - 125 psi), con la finalidad de recuperar parte del volumen comprimido de la chapa, (Wellons, *et al.*, *op.cit.*).

²⁰Freeman, H.G. 1959. "Relation between physical and chemical properties of wood and adhesion". pp. 451-458.

²¹Chow S.; G.E. Troughton; W.V. Hancock and H.N. Mukai. 1973. "Quality control in veneer drying and plywood gluing", pp. 14.

²²Erb, C. 1968. Basic of gluing. 10 p.

²³Wellons, J.D., R.L. Kraemer, M.D. Sandoe, and R.W. Jokerst. 1983. "Thickness loss in hot-pressed plywood". pp. 27-34.

3. MATERIALES Y METODOLOGÍA

Los materiales y actividades realizadas para este estudio consistieron en: la preparación y acondicionamiento de la chapa; la colocación de sensores para medir la distribución de la presión del vapor, de la temperatura, de la compactación del tablero, la preparación y aplicación de adhesivo a las chapas, la integración del conglomerado, el prensado del tablero, la captura y el análisis de la información.

3.1. Características y preparación de la chapa

Para la realización del presente trabajo se utilizó chapa de abeto Douglas (*Pseudotsuga menziesii* Mirb Franco), procedente del estado de Oregon, E.U.A., en secciones de 2"x 2" y de 1/8" de espesor.

Las chapas se secaron a 6, 12 y 16% de contenido de humedad (C.H.), en cuartos de acondicionamiento con las temperaturas y humedades relativas requeridas para lograr los contenidos de humedad en equilibrio especificados. Se utilizó chapa con C.H. más alto que el tradicional en la manufactura de triplay (12% y 16%), con la finalidad de analizar su efecto en la transferencia de calor, en la presión interna de vapor y en la compactación del tablero.

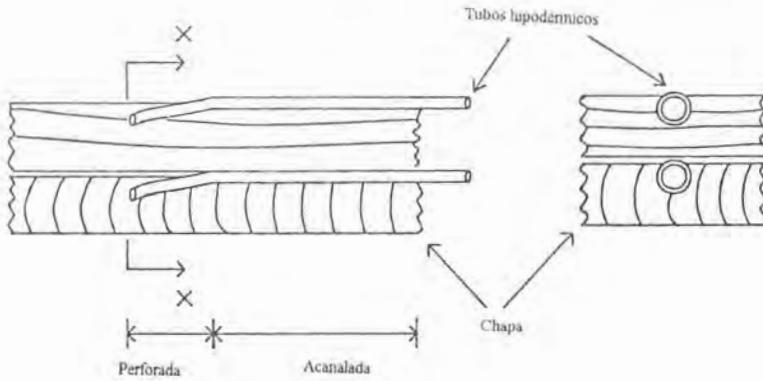
En el 50% de las chapas acondicionadas se perforaron orificios de 1.5 mm de profundidad en la cara de la chapa, con un taladro eléctrico y una broca de 1.5 mm de diámetro y 25 cm de longitud, con la finalidad de colocar en estos orificios los tubos hipodérmicos para determinar la presión del vapor. La ubicación de las perforaciones se realizaron a una distancia de 3, 6, 9 y 12 pulgadas de la orilla de la chapa (Figura N° 2).

3.2. Tubos hipodérmicos y determinación de la presión de vapor durante el prensado

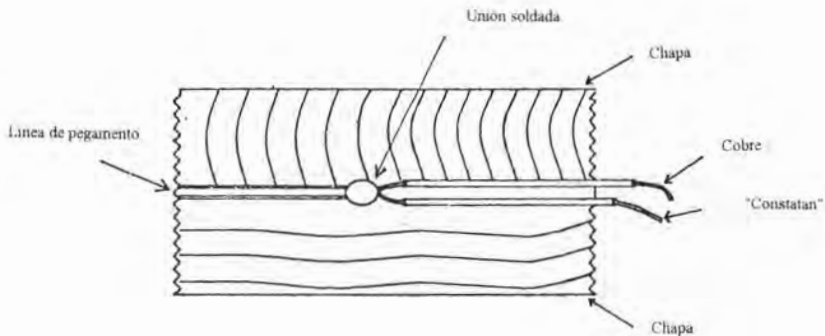
Para medir la presión del vapor en el interior del tablero durante el prensado, se utilizaron 100 tubos de acero con 0.91 mm de diámetro externo y de 0.5 mm de diámetro interno, con longitud de 8, 10, 14 y 18 pulgadas, para conducir el vapor generado dentro del tablero a sensores de presión de gases.

Los sensores tienen un diafragma de acero inoxidable, que se protegió de la humedad y del calor por medio de un tubo en forma de "U", el cual se llenó con aceite de silicón que sirvió como barrera entre el vapor y el diafragma (Figura N° 3).

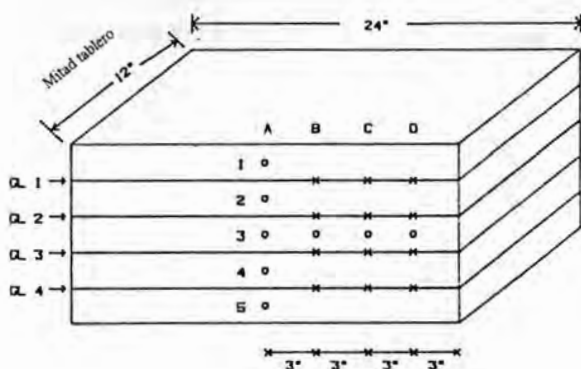
Los tubos en "U" y los sensores de vapor se montaron en un marco especial de aluminio, que permitió mover y ajustar los sensores en relación a la ubicación de los tubos hipodérmicos. Este marco se colocó en un costado de la prensa (Figura N° 4).



a) Ubicación de tubos hipodérmicos



b) Ubicación de termopares.



X Termopares
 O Tubos hipodérmicos
 GL Líneas de pegamento

c) Ubicación de tubos hipodérmicos y de termopares en el triplay.

Figura N°. 2. Ubicación de tubos hipodérmicos y de termopares en la chapa y en el triplay.

La distribución de la presión del vapor se midió en el sentido horizontal para los tres C.H. indicados, y en las chapas del centro de los tableros, a una distancia de 3, 6, 9 y 12 pulgadas de la orilla de los tableros. La distribución del vapor en sentido vertical se determinó únicamente en las chapas con 6% de C.H.

Se utilizaron dos tubos hipodérmicos por cada tablero prensado, que se colocaron en los orificios de las chapas perforadas con la finalidad de protegerlos de posibles obstrucciones del adhesivo. El extremo opuesto de los tubos se conectó a dos sensores de presión de vapor. Las lecturas de los sensores de presión, se realizaron con una frecuencia de 0.8 segundos, a través de una computadora.

La presión del vapor generada en el tablero durante el prensado, actuó sobre el aceite de silicón transfiriendo la presión al diafragma del sensor, que la convirtió en energía eléctrica en forma de señal analógica, la cual se transformó en digital por medio de una tarjeta adaptada a la computadora (convertidor de analogía a digital) y se almacenó en

un disket en forma numérica para su análisis posterior. Los tubos hipodérmicos se desecharon con el tablero una vez que se determinó la presión del vapor.

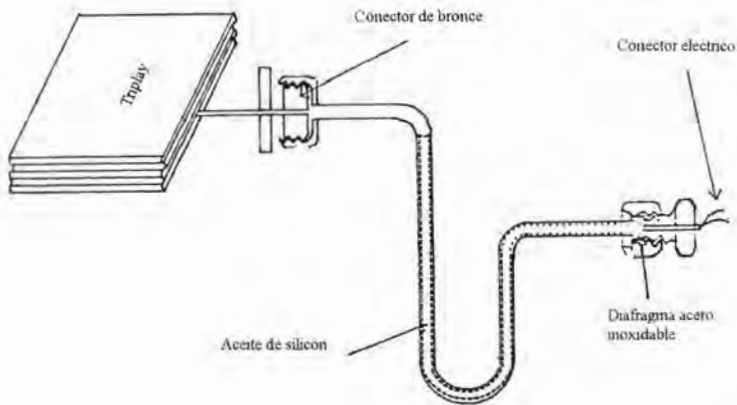


Figura N°. 3. Componentes del sistema de medición de la presión del vapor durante el prensado de triplay.

3.3. Termopares y determinación de la temperatura del tablero durante el prensado

Para la determinación de la variación de la temperatura en las líneas del pegamento de los tableros durante el prensado, se utilizaron 200 termopares de cobre "constantan" de alambre calibre 0.010", con longitud de 12 a 18 pulgadas. Un extremo de los alambres de los termopares se unieron con soldadura de alta temperatura y en el extremo opuesto se les colocó conectores miniatura para unirlos con el sistema de captación de datos de la computadora (Figura No. 2).



Figura N°. 4. Integración del equipo utilizado durante el prensado de triplay.

Los termopares se colocaron a 3, 6, 9 y 12 pulgadas de la orilla del tablero y en cada línea de pegamento para medir la distribución horizontal y vertical de la temperatura, y se fijaron cuidadosamente en las chapas por medio de grapas pequeñas.

Se utilizaron cuatro termopares en cada tablero procesado, con una frecuencia de lectura de la temperatura por la computadora de 0.8 segundos. La señal eléctrica generada por el termopar se envió al convertidor de analogía a digital y se comparó con una referencia fría electrónica ubicada en el circuito de la tarjeta adaptada a la computadora. La señal digital se almacenó en un disket para su análisis posterior.

Una vez que se obtuvieron los datos de distribución de la temperatura, los termopares se desecharon junto con el tablero.

3.4. Determinación de la compactación o espesor del tablero durante el prensado

La compactación del tablero durante el prensado se asocia con el comportamiento viscoelástico de la madera, el cual depende de la temperatura, del C.H. y de la presión de los platos de la prensa. La compactación del triplay se determinó con un Convertidor de Variables Lineales Diferenciales (LVDT). La compactación total también se midió directamente a través del espesor de la chapa antes del prensado y del grosor del tablero después de prensado.

El LVDT se montó en el marco de la prensa y se activó para determinar la compactación del tablero durante el prensado, al momento de cerrar la prensa, (Figura No.4). La frecuencia de las lecturas del LVDT fué de 0.8 seg. controladas a través de la computadora. La información recopilada se almacenó en diskets para su análisis posterior.

3.5. Preparación de la mezcla del adhesivo

Para la elaboración de los tableros se utilizó resina de fenol formaldehído. La formulación de la mezcla del adhesivo se preparó de acuerdo a las indicaciones del fabricante, reduciendo el porcentaje original de sólidos de la resina de 41 a 28%, a través de la siguiente secuela de mezclado, (Cuadro N° 1).

Componente	Porcentaje del total (por peso)	Tiempo de mezclado
Agua a 32.4 °C	16.09	
Resina	6.90	2 minutos
Rellenador	4.60	5 minutos
Harina de trigo	6.90	
Resina	11.50	2 minutos
Solución caústica al 50 %	3.45	10 minutos
Resina	50.56	10 minutos

Cuadro N° 1. Componentes y tiempo de mezclado para el adhesivo.

La cantidad de adhesivo aplicada a la chapa se definió de acuerdo a las especificaciones del fabricante de la resina para operaciones industriales: 60 libras por millar de pies cuadrados en doble línea de pegamento para temperatura de prensado de 148.8 °C.

3.6. Formación del conglomerado y prensado del tablero

Se formaron conglomerados con 5 chapas para definir con mayor precisión la distribución de la temperatura y de la presión del vapor. Las chapas adyacentes entre sí, se colocaron en sentido perpendicular respecto a la orientación de las fibras.

Posteriormente se colocó el conglomerado en la prensa y se conectaron todas las terminales de los sensores del sistema de captura de datos de la computadora al tablero, procediendo a cerrar la prensa e iniciar la colecta de datos (Figura No. 4).

El prensado de los tableros se realizó en una prensa de una sola luz de 2' x 2', con sistema de calentamiento por medio de vapor, (Figura N° 4).

La temperatura que se aplicó al conglomerado fue de 148.8°C, y se mantuvo constante durante el proceso de prensado, siguiendo las indicaciones del fabricante de la resina.

La presión de los platos de la prensa en la producción industrial de triplay de coníferas es de 175 psi. y fue la que se aplicó a los tableros que se consideraron como estandar en este estudio. Adicionalmente se analizaron presiones de 100 y 125 psi en otra serie de tableros con C.H. mas alto que el tradicional, con la finalidad de evitar la compactación excesiva de las chapas.

El tiempo de prensado recomendado por el fabricante de la resina para operaciones industriales para tableros similares al estandar es de 4.5 a 6 minutos. Sin embargo, de acuerdo a los objetivos de este estudio, el tiempo de prensado se extendió de 600 a 1000 segundos, con la finalidad de obtener una definición clara de la distribución de la temperatura, de la presión del vapor y de la compactación del tablero.

3.7. Captura de datos

Para la captura de la información del proceso de prensado: temperaturas, presión del vapor y compactación del tablero, se utilizó una microcomputadora, a la cual se le adaptó una tarjeta para transformar las corrientes eléctricas generadas por los sensores, de analogía a digital (Figura N° 4).

El número de canales para la toma de datos del triplay durante el prensado, por las características del equipo estuvo limitado a ocho, cuatro se utilizaron para medir la distribución de la temperatura, dos para la presión de vapor, uno para la compactación del tablero y otro para el control del tiempo de prensado.

El control del sistema de captura de datos se realizó a través de un programa de cómputo en BASIC. El programa incluyó tres componentes:

- a). La frecuencia de las lecturas.
- b). La conversión de datos, de señales eléctricas a unidades científicas (analogía a digital).

c). El almacenamiento de datos en diskets de acuerdo a especificaciones para su análisis posterior (Figura N° 5).

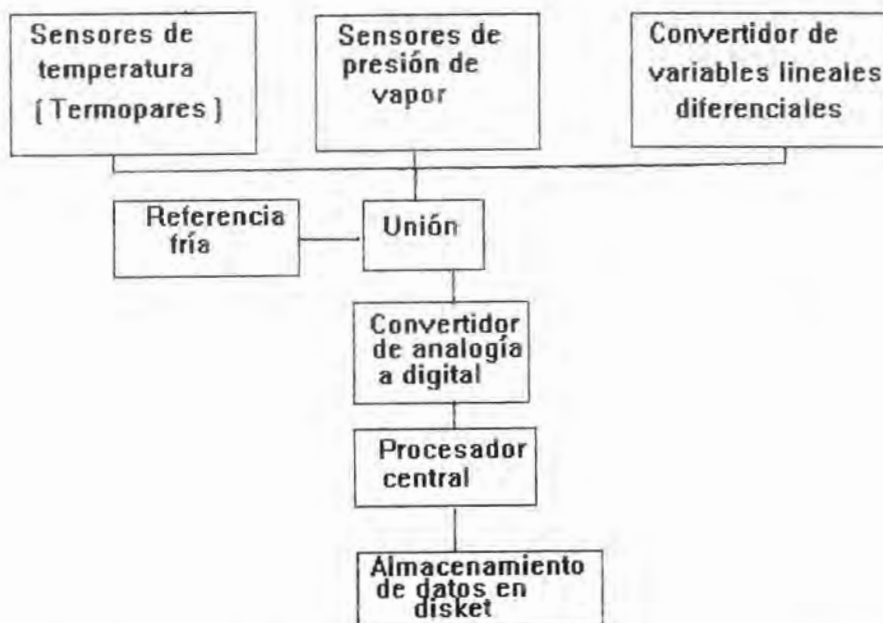


Figura N°. 5. Diagrama del sistema de captura de datos.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como se indicó anteriormente, la función principal de la presión de los platos de la prensa en la formación del triplay, es aplicar una carga uniforme sobre las superficies de las chapas y proporcionar la fuente de calor necesaria para la polimerización del adhesivo. Con la presión de los platos, se puede compactar el tablero aumentando su densidad y el coeficiente de conductividad térmica reflejado en mayores temperaturas. Sin embargo, cuando se aplica una presión alta, puede generarse una compactación excesiva del conglomerado, que se manifiesta en la pérdida de espesor de la chapa y consecuentemente en el volumen final del tablero, repercutiendo en la rentabilidad del proceso al reclasificarlo en una categoría en espesor inferior a la programada. A continuación se señalan los resultados más relevantes de este trabajo relacionados con los conceptos anteriores.

4.1. Distribución de la temperatura en el tablero durante el prensado

La temperatura en diferentes líneas de pegamento del conglomerado cambia en función del C.H. de la chapa y de la presión de los platos de la prensa, manifestándose en gradientes de temperatura que tienden a reducirse conforme avanza el proceso de prensado, como se muestra en la figura 6a, en la que se grafica el comportamiento de transferencia de calor en un tablero estándar (6% de C.H. y 175 psi de presión de los platos), de 5 chapas con 4 líneas de pegamento.

Al colocar el conglomerado de chapas en la prensa, la línea de pegamento de la cara del tablero más cercana al plato es la primera en activarse, manifestándose un incremento rápido en la temperatura debido al efecto combinado de la transferencia de calor por conducción y por convección, este último por el movimiento del vapor de la periferia hacia el interior del tablero (Figura N° 6a, línea de pegamento 4). La rápida evaporación de la humedad de la chapa que hace contacto con el plato de la prensa, crea un gradiente de presión de vapor, generando la conducción de humedad y la transferencia de energía a la primera línea de pegamento.

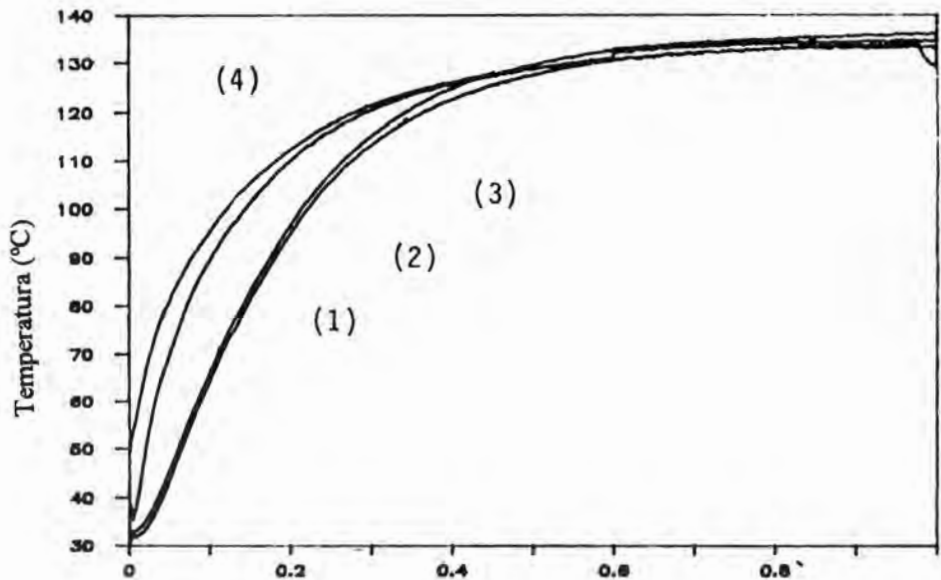
Al cerrarse la prensa, con el contacto del plato superior sobre el conglomerado, se presenta un fenómeno similar al descrito en el párrafo anterior, manifestándose un incremento rápido de temperatura en la línea de pegamento (L.P.) de la cara superior del tablero (Figura N° 6a, L.P. 1). Después de transcurrido un tiempo relativamente corto del cerrado de la prensa, la transferencia de calor es casi simétrica en ambas caras del conglomerado.

En general, las 2 líneas de pegamento más externas del tablero, muestran un comportamiento similar, aunque en una forma retardada por la diferencia de tiempo en que hacen contacto los platos de la prensa con ambas caras del conglomerado. Las líneas de pegamento más internas, muestran un retraso en el aumento de la temperatura debido, obviamente, a la mayor lejanía de la fuente de calor generado por los platos. Conforme avanza el tiempo de prensado, esta diferencia alcanza su máximo valor a los 100 segundos, después de este lapso, las temperaturas tienden a converger, lográndolo en aproximadamente 400 segundos de prensado del tablero (Figura N° 6a, L.P. 1 y 4, con 2 y 3). La diferencia de temperaturas entre las líneas externas y las del centro, tienen un impacto muy significativo en la cinética de la adhesión y por lo tanto en la eficiencia de los sistemas de prensado de tableros.

Se considera que las resinas de urea y de fenol formaldehído fraguan en forma instantánea a los 110-120 °C, sobretodo cuando no hay interferencia por exceso de

humedad en la línea de pegamento (Chow, 1969²⁴, Chow, *op. cit.*, Wellons, 1977²⁵). El tiempo de prensado, por lo tanto, está determinado por el lapso requerido por la línea de pegamento más interna del conglomerado para alcanzar los 110-120 °C, en ese momento se podría abrir la prensa sin problemas de delaminación del tablero.

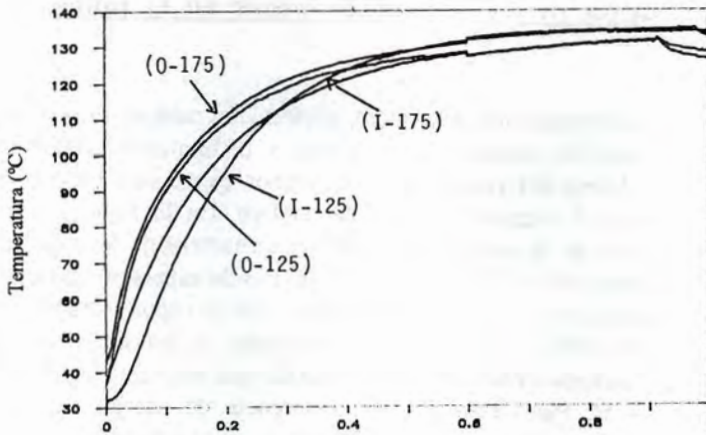
Analizando el efecto de la carga de los platos de la prensa en tableros con chapa con 6% y 12% de C.H., en ambos casos se aprecian temperaturas un poco mayores para presiones de 175 psi en relación a 125 psi., y muy poca diferencia en las temperaturas entre los dos C.H. señalados (Figuras No. 6b y 6c).



Tiempo de prensado (segundos)
a) Tablero estandar C.H. 6% y presión de 175 psi.

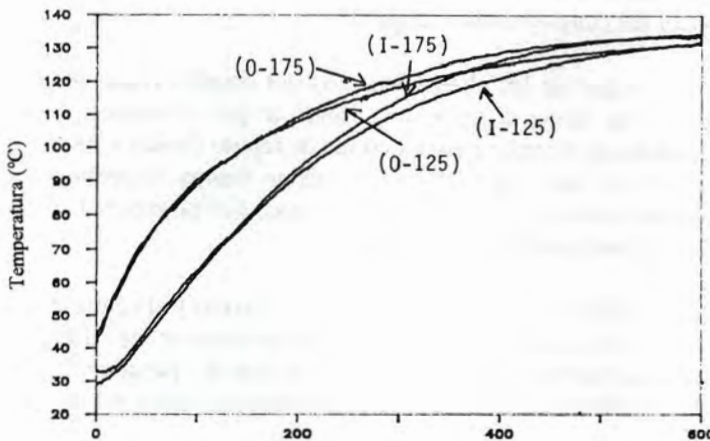
²⁴Chow S.,Z. 1969. "A kinetic study of the polymerization of phenol-formaldehyde resin in the presence of cellulosic materials". pp. 215.221.

²⁵Wellons, J.D. 1977. "Adhesion to wood substrates". pp. 150-167.



Tiempo de prensado (segundos)

b) Tablero con 12% de C.H. y presión de 125 y 175 psi.



Tiempo de prensado (segundos)

c) Tablero con 16% de C.H. y presión de 125 y 175 psi.

Figura N°. 6. Distribución de la temperatura en las líneas de pegamento durante el prensado de triplay

4.2. Distribución de la presión de vapor en el tablero durante el prensado

Durante el proceso de prensado del tablero, el efecto del calor de los platos de la prensa transforma en vapor la humedad de la chapa y la humedad proporcionada por el adhesivo en las líneas del pegamento. Este vapor ejerce una presión que tiende a separar las chapas al intentar liberarse del tablero. En la figura 7a se muestra la distribución vertical de la presión del vapor en un tablero de 5 chapas producido en condiciones estandar (6% C.H. y 175 psi). Como es de esperarse, durante el prensado del conglomerado se presenta un gradiente de presión de vapor entre las capas externas y las internas del tablero. Al inicio del prensado, la presión del vapor aumenta rápidamente en la chapa externa del conglomerado que hace contacto con el plato de la prensa (chapa # 5). Por efecto de la transferencia de energía de los platos a la superficie de la chapa, el agua de absorción se convierte rápidamente en vapor. Posteriormente se presenta una migración de este vapor hacia el centro del tablero en respuesta al gradiente de presión entre el exterior y el interior del conglomerado.

El gradiente de vapor del exterior al interior del conglomerado aumenta al cerrarse la prensa, iniciándose un comportamiento similar al descrito en el párrafo anterior en la chapa superior del conglomerado (chapa # 1).

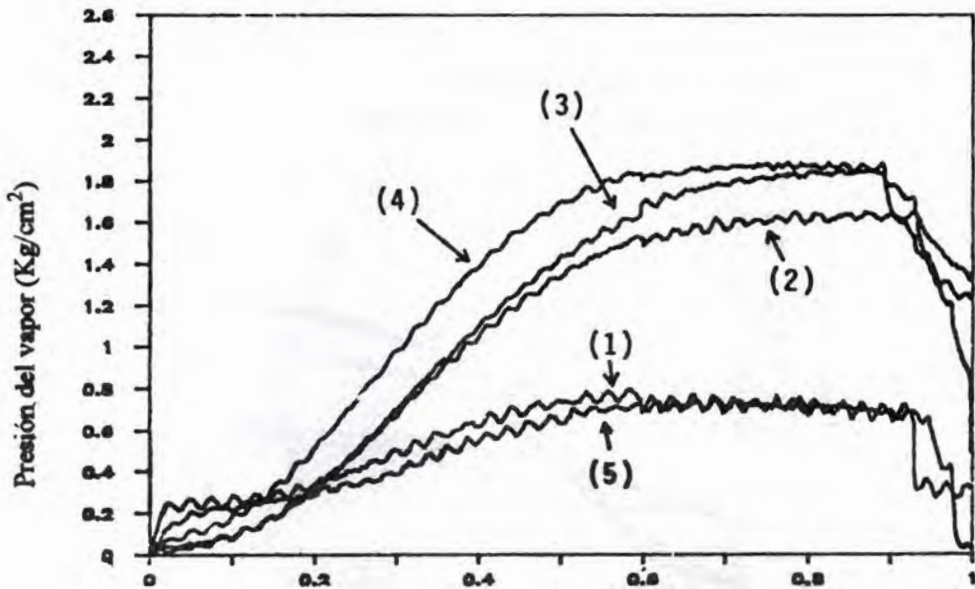
La presión del vapor en las chapas externas del conglomerado declina rápidamente después de que se inicia el prensado, debido a que el abastecimiento de agua de absorción disminuye, alcanzándose un estado de reposo (Bodig y Jayne, *op. cit.*; Chow, *op. cit.* y Chow, *op. cit.*). Sin embargo, al mismo tiempo, la presión del vapor en las chapas más internas empieza a aumentar, y al poco tiempo supera la presión alcanzada en las caras del conglomerado, (Figura No. 7a).

La diferencia de presión de vapor entre las capas externas y el centro del conglomerado, se debe a que en esta parte la adherencia del pegamento es mas débil, al retardarse la formación de una barrera constituida por las líneas del pegamento entre las chapas, permitiendo el movimiento del vapor de la superficie al centro del tablero.

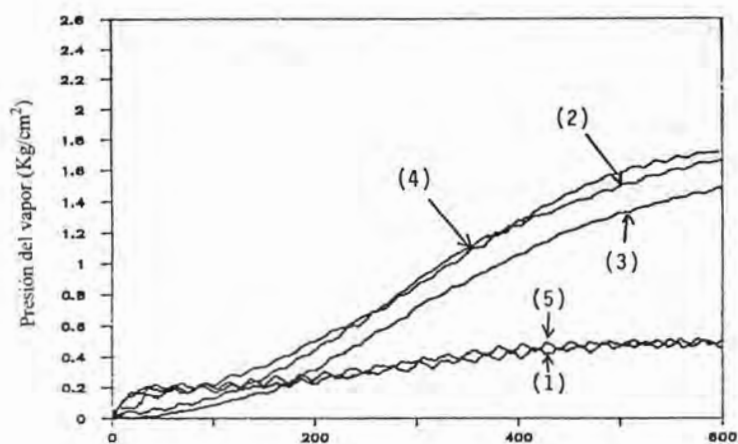
La mayor concentración de humedad en el centro del tablero y la menor transferencia de calor a las líneas de pegamento mas internas por la mayor distancia de la fuente de calor proporcionada por los platos de la prensa, repercuten en una polimerización mas lenta del adhesivo en la parte interna del tablero.

Conforme avanza el proceso de prensado, se espera que la presión del vapor en el centro del tablero decline a medida que la humedad del conglomerado se vaya

disipando. Esta fase, sin embargo, no se manifestó después de los 1 000 segundos de prensado en los tableros analizados en el laboratorio (Figuras No. 7a, b, y c). En la producción de tableros a escala industrial, es probable que la presión del vapor en el centro esté siempre aumentando durante el ciclo de prensado. De aquí la importancia de determinar el momento en el cual la resistencia del adhesivo supera a la fuerza del vapor para poder abrir la prensa, eliminando el riesgo de delaminaciones del tablero.

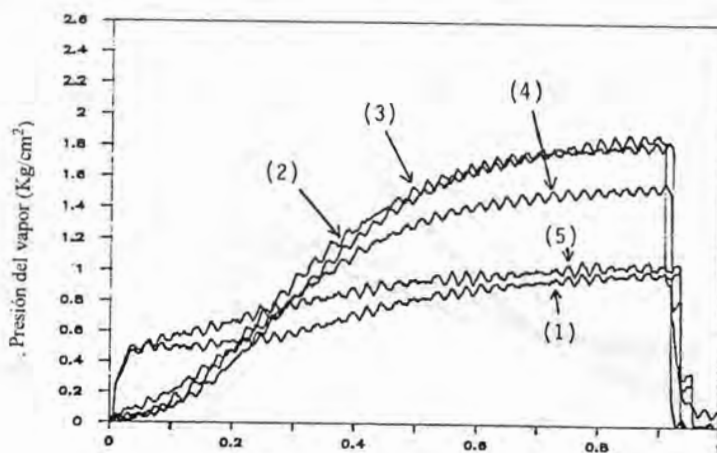


Tiempo de prensado (segundos)
a) Tablero estándar (C.H. 6% y presión de 175 psi).



Tiempo de prensado (segundos)

b) Tablero con 12% de C.H. y presión de 125 psi.



Tiempo de prensado (segundos)

c) Tablero con 16% de C.H. y presión de 100 psi.

Figura N°. 7. Distribución de la presión de vapor en el conglomerado durante el prensado.

4.3. Efecto de la interacción del C.H. de la chapa y de la presión de los platos en la compactación del tablero

Con la finalidad de ejemplificar el efecto de la presión de los platos de la prensa en la compactación de los tableros, en la figura 8 se muestra el comportamiento de distintos tipos de conglomerados integrados por 5 chapas y prensados bajo las diferentes condiciones indicadas en cada curva de la gráfica. En el tablero estándar, utilizando chapa con 6% de C.H. y presión o carga de los platos de 175 psi, la compactación durante los primeros 5 minutos de prensado representó aproximadamente 9% de la pérdida del espesor inicial del tablero. Este porcentaje de compactación coincide con el reportado en otros trabajos para tableros contrachapados en condiciones estándar de C.H. de la chapa y presión de los platos de la prensa, que varía de 4 a 10% (Currier, 1963²⁶ y Wellons, *op. cit.*).

Como se aprecia en la misma figura No. 8, la compactación de los conglomerados es bastante drástica durante los primeros 400 segundos de prensado, tanto para el tablero estándar como para los producidos en condiciones diferentes al tradicional (chapa con 12 y 16% de C.H. y presiones de los platos de 100, 125 y 175 psi). En general, de los 400 a 600 segundos de prensado, la proporción de compactación disminuye, para permanecer prácticamente estable después de los 600 segundos. La pérdida en espesor por compactación del tablero estándar representó un 20% del espesor original cuando el tiempo de prensado se prolongó por 1 000 segundos.

Analizando el efecto de compactación del tablero por la aplicación de diferentes cargas de presión de los platos de la prensa, sobre conglomerados con C.H. más altos que el estándar (Figura N° 8), como es de esperarse, la compactación es mayor. Utilizando chapas con 6, 12 y 16% de C.H., y presiones de los platos de 175 psi, durante 400 segundos, el tablero estándar se compactó un 12.5%, el elaborado con chapa con 12% de C.H. perdió un 23% de espesor, y el de 16% de C.H. se compactó 29%. Si se utiliza chapa con un C.H. de 16%, pero se reduce la presión de los platos a 125 psi, la compactación del tablero es menos drástica, como se aprecia en la figura No. 8.

²⁶Currier, R.A. 1963. "Compressibility and bond quality of western softwood veneers". pp. 98-106.

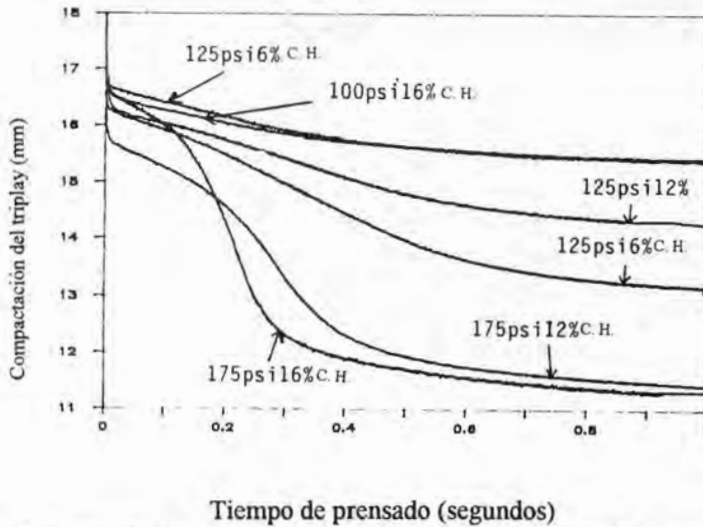


Figura N° 8. Compactación del triplay en diferentes condiciones de prensado.

4.4. Efecto de la interacción de la transferencia de calor y de masas en la integración del tablero

En la manufactura de tableros, las condiciones termodinámicas para la polimerización de los adhesivos, son dependientes de la transferencia de calor y de masas durante el prensado del conglomerado, que se manifiestan a través de los fenómenos de conducción y convección, los cuales a su vez dependen de las características de la madera y de los parámetros del prensado.

Al inicio del ciclo de prensado, la temperatura de la superficie del conglomerado se iguala con la de los platos de la prensa, en esta etapa la velocidad de transferencia de calor hacia la madera se rige por el gradiente de temperatura que se presenta en el tablero, a través de la conducción de la superficie al centro. Sin embargo, conforme avanza el prensado, la velocidad a la cual se mueve el calor a través del tablero, depende principalmente del movimiento del vapor proveniente de la humedad de la chapa y del adhesivo (convección). La humedad en las capas externas del tablero se convierte en vapor segundos después de que se cierra la prensa (cambio de fase), aumentando el gradiente de presión de vapor de las chapas de la superficie del conglomerado a las chapas más internas, acelerando el flujo de humedad hacia el centro del tablero, (Figura N° 7).

El efecto positivo del C.H. del conglomerado en la transferencia de calor, puede convertirse en un aspecto negativo al reducir la velocidad de curado de la resina, sobretodo cuando excede ciertos límites (Kollmann, *et. al.*, 1975, Nothcott, *et. al.*, 1962 y Wellons, *op. cit.*). En los casos en donde el C.H. de la chapa es más alto que el convencional, los problemas de delaminación aumentan, por la mayor presión que ejerce el vapor en las líneas del pegamento y la reducción de la polimerización del adhesivo. Para contrarrestar los problemas de delaminación, es necesario prolongar el tiempo de prensado de los tableros elaborados con C.H. más alto que el tradicional, lo cual repercute en una reducción de la capacidad de producción de la prensa.

El tiempo óptimo de prensado, definido como el mínimo requerido para lograr una adhesión adecuada de las chapas que permita la máxima producción de la prensa, se debe determinar en función de la reactividad o adhesión del pegamento y la presión interna del vapor. En las figuras N° 6 y 7 se aprecia que en la parte interna del tablero la transferencia de calor es más lenta y la presión del vapor es más alta, retardando la reactividad del adhesivo; por lo que se considera que el grado de polimerización de la resina en esta parte del tablero es la que determina el tiempo mínimo de prensado para lograr la integración del tablero. El efecto total de la línea de pegamento y su cambio de propiedades conforme avanza el fraguado, sin embargo, son difíciles de cuantificar (Currier, *op. cit.*, Strickler, *op.cit.* y Subramanian, 1981²⁷).

Hasta ahora no existe un método que permita evaluar directamente la velocidad de fraguado del adhesivo conforme avanza el prensado. Por esta razón las secuelas de prensado se han desarrollado a base de ensayo y error, lo que manifiesta la necesidad de continuar investigando sobre la cinética de los adhesivos y su interrelación con la chapa durante el prensado de triplay .

CONCLUSIONES

La transferencia de calor en el triplay durante el prensado, aumenta rápidamente en las líneas externas de pegamento, manteniendo un gradiente en relación a las líneas internas que se elimina al converger las temperaturas aproximadamente a los 400 segundos de prensado. La transferencia de calor entre diferentes C.H. de la chapa y

²⁷Subramanian, R.V. 1981. "The adhesive system". pp. 93.

diferentes cargas o presiones de los platos de la prensa, es muy similar y aparentemente no repercute en las secuelas de prensado.

La presión de vapor en el conglomerado durante el prensado aumenta rápidamente en las chapas externas en los primeros 50 segundos, y posteriormente disminuye su tendencia manteniendo un ascenso leve. En contraste, la presión del vapor en las chapas internas del tablero, al inicio del prensado muestra valores bajos, pero después de 200 segundos aumenta rápidamente y en forma continua ascendente hasta los 600 segundos.

Las chapas con alto contenido de humedad, combinadas con presiones de prensado altas, (16% de C.H. y presiones de 175 psi), se compactan excesivamente, afectando el espesor del triplay hasta en un 30% del grosor original. En el mismo tipo de chapas con presiones de prensado bajas (100 psi), la compactación se reduce significativamente (a un 5%).

La menor transferencia de calor y la mayor concentración de humedad en las líneas de pegamento más internas del tablero, afectan la polimerización de la resina retardando la adhesión entre las chapas y el pegamento. Para definir por lo tanto las secuelas de prensado, se puede utilizar como indicador el lapso en el que las líneas más internas del tablero alcanzan los 110- 120 °C, en chapas con C.H. de 4 a 6%. Para C.H. más altos, seguramente será necesario prolongar el tiempo de prensado para evitar delaminaciones o "ponchaduras" en el triplay al momento de abrir la prensa.

Para definir con mayor precisión las secuelas de prensado, se considera necesario determinar el grado de polimerización del adhesivo durante el proceso, en las diferentes líneas de pegamento del triplay. Debido a que a la fecha no existe ningún procedimiento que determine directamente la polimerización de la resina durante el prensado, la forma como se definen las secuelas para diferentes espesores de tableros es a base de ensayo y error, por lo que se considera conveniente continuar investigando sobre este tema.

BIBLIOGRAFÍA

- Baldwin, R. F. 1975. "Plywood manufacturing practices". Miller Freeman Publications, Inc. pp. 149-232.

- Bodig, J. and B.A. Jayne. 1982. Mechanics of wood and wood composites. Van Nostrand Reinhold Inc. 712 p.
- Chow, S. Z. 1969. "A kinetic study of the polymerization of phenol-formaldehyde resin in the presence of cellulosic materials". *Wood Sci.* 2(4): 215-221.
- Chow, S.; and H.M. Mukai. 1972. "Polimerization of phenolic resin at high vapor pressure". *Wood Sci.* 5(1): 65-72.
- Chow, S.; G.E. Troughton; W.V. Hancock and H.N. Mukai. 1973. "Quality control in veneer drying and plywood gluing". *Can. For. Serv. WFPL. Inform. Rep. VP-X-122*. pp. 14 .
- Currier, R.A. 1963. "Compressibility and bond quality of western softwood veneers". *Wood Fiber.* 8(2): 98-106.
- Erb, C. 1968. Basic of gluing. American Plywood Association. 10 p.
- Freeman, H.G. 1959. "Relation between physical and chemical properties of wood and adhesion". *For. Prod. J.* 9(12): pp. 451-458.
- Gould, F.O. 1959. "Phenolic resins". Reinhold Publising Corporation. New York. pp 26-125.
- Humphrey, P.E. and A.J. Bolton. 1979. "Urea formaldehyede resin bond strength development with reference to wood particle-board manufacture". *Holzforschung.* 33(4): 129-133.
- Klein, A.J. 1979. "Controlling glue costs and hot press production to improve construction plywood quality and profitability". Society Meeting. San Francisco, Cal. pp. 4.
- Knigth, R.A.G. 1952. "Adhesives for wood". London. Chapman and Hall LTD. pp. 58-105.
- Kollmann, F.F.P. and W.A. Côté. 1968. Principles of wood science and technology. I. Solid wood. Springer-Verlag Berling. 592 p.

- Kollmann, F.F.P.; Kuenzi W.E. and Stamm, J.A. 1975. Principles of wood science and technology. II. Wood based materials. Heidelberg, New York. Springer-Verlag, Berlin. 703 p.
- Lewis, W.C. 1967. Thermal conductivity of wood-based fiber and particle panel materials. USDA. For. Serv. FPL. Resech. Pap. 77 p.
- Marian, J.E. and D.A. Stumbo. 1962. "Adhesion in wood. Part I and II". *Holzforschung*, 16(5):134-148. and (6): 168-180.
- Northcott, P.L.; W.V. Hancock and H.G.M. Colbeck. 1962. "Water relations in phenolic (plywood) bonds". *For. Prod. J.* 12(10): 478-486.
- Rudnicki, Z. 1975. "Effect of temperature and setting time on strength and durability of phenolic or resorcinol base gluelines". Proceedings of the IUFRO conference on wood gluing. USDA For. Serv. FPL. Madison, Wi. Sept. 1975. pp. 62-173.
- Sellers Jr., T. 1985. "Plywood and adhesive technology". Marcel Dekker, Inc. N.Y. 653 p.
- Siau, J.F. 1984. "Transport processes in wood". Springer-Verlag, N.Y. pp. 151-232.
- Strickler, M.D. 1959. "Effect of press cycles and moisture content on properties of Douglas-fir flakeboard". *Forest Prod. J.* 9(7): 203-215.
- Subramanian, R.V. 1981. "The adhesive system". Washington State University. 93 p.
- U.S. Forest Products Laboratory. 1974. Wood handbook: "Wood as an engineering material". USDA. Agr. Handb. 72. Rev. 3- 19. pp. 3-22.
- Wangaard, F.F. 1969. "Heat transmissivity of southern pine wood, plywood, fiberboard, and particleboard". *Wood Sci.* 2(1): 54-60.
- Wellons, J.D. 1977. "Adhesion to wood substractes". American Chemical Society. ASC. Symposium Series No. 43. San Francisco, Calif. pp. 150-167.
- Wellons, J.D. 1981. "The adherends and their preparation for bonding." Georgia Pacific Corporation. 54 p.

Wellons, J.D.; R.L. Krahmer; M.D. Sandoe and R.W. Jokerst. 1983. "Thickness loss in hot-pressed plywood". For. Prod. J. 33(1): 27-34.

Zavala Z., D. 1984. "Factors controlling the adhesion characteristics of phenolic resins on veneer for plywood production". Oregon State University. 12 p. Inédito.

Zavala Z., D. 1986. "Analysis of processes operative within plywood during hot pressing". Ph. D. Thesis. Oregon State University. 201 p.