

MIGUEL LUIS SALAZAR PÉREZ

**PERFIL DEL PROCESO DE SECADO DE PULPA Y SUS EFECTOS EN LAS
PROPIEDADES DEL PRODUCTO FINAL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação do Mestrado Profissional em Tecnologia de Celulose e Papel, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2011

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

S159e
2011

Salazar Perez, Miguel Luis, 1952-

Perfil del proceso de secado de pulpa y sus efectos en las propiedades del producto final / Miguel Luis Salazar Perez. – Viçosa, MG, 2011.

x, 65f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Orientador: Rubens Chaves de Oliveira.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 63-65.

1. Polpação alcalina por sulfato. 2. Polpa de madeira - Branqueamento. 3. Polpa de madeira - Secagem. 4. Polpa de madeira - Propriedades mecânicas. 5. Polpa de madeira - Morfologia. 6. Propriedades físicas. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDO adapt. CDD 634.986

MIGUEL LUIS SALAZAR PÉREZ

**PERFIL DEL PROCESO DE SECADO DE PULPA Y SUS EFECTOS EN LAS
PROPIEDADES DEL PRODUCTO FINAL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação do Mestrado Profissional em Tecnologia de Celulose e Papel, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Aprovada: 21 de julho de 2011

Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho
(Coorientador)

Teresa Cristina Fonseca da Silva

Rubens Chaves de Oliveira
(Orientador)

**A mis hijas Carolina y Katia por el apoyo,
confianza y motivación que me dieron para
hacerme sentir un estudiante de nuevo
y a Ana por su paciencia durante mis
ausencias por el tiempo dedicado
a realizar este trabajo.**

AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer al personal técnico del laboratorio de fibras y muy especialmente a la Sra. Ninette Aravena Técnico Químico y la Srta. Patricia Vásquez analista de fibras de la Superintendencia Técnica de Planta Arauco, quienes contribuyeron con su experiencia y aporte técnico en la preparación y realización de los experimentos realizados en el laboratorio, la recolección de datos y todas las mediciones que realizaron para preparar la información necesaria para este trabajo.

Asimismo deseo agradecer a mi hija Carolina que me aportó con su experiencia y conocimiento a establecer la base matemática fundamental para la interpretación de los datos de todas las experiencias que se realizaron como asimismo su contribución y recomendación en las conclusiones del contenido experimental de esta investigación.

Deseo también agradecer y dejar testimonio de reconocimiento en este trabajo- a la Empresa Arauco y Constitución S. A.,- a sus ejecutivos por esta loable iniciativa de apoyar este curso de post grado económicamente y facilitar los medios para crear esta instancia de perfeccionamiento profesional y técnico al interior de la empresa y en particular un especial reconocimiento a Planta Arauco y su gerente por su confianza en hacerme partícipe de este programa de especialización entregada por el Departamento de Ingeniería Forestal de la prestigiosa Universidad Federal de Viçosa de Brasil, por ello hago propicia la ocasión de agradecer esta oportunidad única e invaluable dentro de mi carrera profesional.

A todos mis más sinceros reconocimiento por este apoyo.

ÍNDICE

NOMENCLATURA.....	vii
RESUMO.....	vii
ABSTRACT.....	ix
RESUMEN	x
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	4
2.1 Objetivo General.....	4
2.2 Objetivos Específicos.....	4
3. REVISION BIBLIOGRAFICA	5
3.1 Importancia de la Pulpa de Fibra Corta en las Propiedades del Papel.....	5
3.2 Calidad de La Pulpa	5
3.3 Proceso Kraft e Influencia en la Resistencia de las Fibras y sus Propiedades.....	6
3.4. Etapas Proceso Típico Kraft y Control de Características del Producto.....	10
3.4.1 Características de la Materia Prima	10
3.4.2 Proceso Cocción	11
3.4.3 Lavado y Deslignificación.....	12
3.4.4 Blanqueo de la Pulpa.....	13
3.4.5 Proceso de Secado de la Pulpa	14
3.4.6 Caracterización del Producto.....	16
3.4.6.1 Características Ópticas.....	16
3.4.6.2 Propiedades Físico-Mecánicas.....	17
3.4.6.3 Morfología de la Fibra y Otras Características.....	21
3.4.6.4 Análisis Químico de la Pulpa	21
4. MATERIALES Y MÉTODOS	23
4.1 Pulpa Usada en la Experiencia.....	23
4.2 Características Principales de la Pulpa de Eucaliptus	23
4.3 Etapa (I). “Efectos de la Temperatura de Secado Sobre las Propiedades de la Pulpa A Ph 4,5”.....	24
4.4 Etapa (II). “Efectos de la Temperatura de Secado Sobre las Propiedades de la Pulpa Ajustada a Diferentes Ph de la Suspensión de Fibra”	24

4.5 Etapa (III). “Efectos de la Humedad Final de Secado Sobre las Propiedades de la Pulpa ajustada a un mismo Ph de la Suspensión de Fibra”	25
4.6 Etapa (IV) Experiencia Industrial “Comportamiento de Propiedades de una misma Pulpa Procesada en Dos Maquinas Secadoras con Tiempos de Secado Distintas”	26
4.7 Diseño Experimental	29
4.8 Optimización	31
5. RESULTADOS Y DISCUSION	33
5.1 Resultados: “Efectos de la Temperatura de Secado Sobre las Propiedades de la Pulpa a Ph 4.5.”	33
5.1.1 Efectos de la Temperatura Sobre las Propiedades Físico-Mecánicas	33
5.1.2 Efectos de la Temperatura Sobre las Propiedades Ópticas y el WRV	35
5.1.3 Efectos de la Temperatura Sobre las Propiedades Biométricas.....	37
5.2 Resultados: “Efectos de la Temperatura de Secado Sobre las Propiedades de la Pulpa Ajustada a Diferentes Ph de la Suspensión de Fibra”	38
5.2.1 Efectos de la Temperatura de Secado a Distintos Ph de la Pulpa en las Propiedades Físico-Mecánicas.	38
5.2.2 Efectos de la Temperatura de Secado a Distintos Ph de la Pulpa en las Propiedades Ópticas y el WRV.....	40
5.2.3 Efectos de la Temperatura de Secado a Distintos Ph de la Pulpa en las Propiedades Biométricas.	42
5.3 Resultados: “Efectos de Sobre las Propiedades de la Pulpa Ajustada a Diferentes Secos”	43
5.3.1 Efecto de la Pulpa Secada a Diferentes Secos Finales Sobre las Propiedades Físico-Mecánicas.	43
5.3.2 Efecto de la Pulpa Secada a Diferentes Secos Finales Sobre las Propiedades Ópticas y el WRV.....	45
5.3.3 Efecto de la Pulpa Secada a Diferentes Secos Finales Sobre las Propiedades Biométricas.	46
5.4.2 Optimización de la Tensión	48
5.4.3 Optimización del Rasgado.....	49
5.4.4 Optimización del Coarseness	49
5.4.5 Optimización del Ancho de Fibra	50
5.5 Resultados Experiencia Industrial: “Comportamiento de las Propiedades de una misma Pulpa Procesada en Dos Maquinas Secadoras Distintas”	51
5.7 Discusión Final.....	57
6. CONCLUSIÓN.....	59

6.1 Consideraciones Técnicas	59
6.2 Consideraciones Económicas	61
7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	66

NOMENCLATURA

Símbolo	Definición
ECF	Elemental Chlorine Free
BKP	Bleached Kraft Pulp
D	Etapa de blanqueo con dióxido de cloro
E(OP)	Etapa de extracción alcalina de blanqueo con oxígeno y peróxido de sodio
ISO	International Organization for Standardization
°ISO	Grados Estandarizados de Blancura
°SR	Grados Schopper Riegel
PFI	Refinador de laboratorio
WRV	Water Retention Value
DCM	Dicloro Metano
TAPPI	Technical Association Pulp & Paper International

RESUMO

SALAZAR PÉREZ, Miguel Luis, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2011. **Performance do processo de secagem de polpa celulósica e seus efeitos nas propriedades do produto final.** Orientador: Rubens Chaves de Oliveira. Coorientadores: Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho e Adair José Regazzi.

No Chile, a produção de polpa celulósica é a principal atividade econômica no setor florestal. São normalmente comercializadas em formas de fardos secos ao ar (Air Dry 90%). Na avaliação de sua qualidade final está implícito o envolvimento não só das características da madeira, mas também o tipo de processo utilizado, insumos químicos envolvidos, a forma como é produzida e como é gerenciado o processo de produção. Em geral, os mecanismos por trás dos problemas de controle de qualidade em nossa indústria abrangem vários aspectos no setor celulósico produtivo. As principais etapas envolvidas: O digestor, o sistema de deslignificação com oxigênio, branqueamento e máquina de secagem. Este trabalho consiste em avaliar o efeito da etapa de secagem na qualidade do produto final, principalmente avaliando as características ópticas, biométricas, físicas e mecânicas da polpa celulósica. Estas propriedades são avaliadas com a celulose branqueada antes da secagem e comparadas com a da fase final da máquina de secagem. De acordo com os resultados obtidos, as propriedades da polpa obtida no final da etapa de branqueamento, são afetadas pelo processo de secagem, modificando suas propriedades estruturais e de resistência. Estas alterações de propriedades são consideradas relevantes em sua produção e conseqüentemente em sua comercialização. O aumento significativo na energia de refino utilizada para produção de papéis é considerado um parâmetro que pode nos colocar em desvantagem em relação aos concorrentes internacionais. O grande responsável pela perda de propriedade como conseqüência de secagem drástica é atribuído ao fenômeno de *hornification* (enrijecimento) das fibras e a conseqüente redução da ativação da superfície externa das fibras para formação de ligações interfibras na formação de papéis. Neste estudo o conhecimento de informações técnicas obtidas nos permite tomar ações de como alterar a qualidade e quantidade de polpa no processo de secagem, contribui com melhorias do controle de qualidade e reduzem as diferenças de desvantagens em comparação com outras polpas celulósicas de mercado permitindo tornar a cadeia produtiva com valor mais competitivo no mercado internacional.

ABSTRACT

SALAZAR PÉREZ, Miguel Luis, M. Sc., Universidade Federal de Vicosa, July, 2011. **Pine pulp dry process profile and its effects on final product properties.** Adviser: Rubens Chaves de Oliveira. Co-Advisers: Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho and Adair José Regazzi.

In Chile, the production of cellulose is the main economic activity in the forestry sector, all this pulp is sold in form of bales dried to 90% air dry. In the quality obtained in the final product, it is not only implied the characteristics of the wood, the type of process used, the chemicals involved, but also the way this is treated and managed in the production process. The mechanisms behind the quality problems have been analyzed in various researches. According to these ones, the principal areas of the process involved in the quality problems are: the digester, oxygen delignification and drying machine. The purpose of this work is to evaluate the effect of the drying step on the quality of the final product, mainly by measuring optical characteristics, biometrical, physical and mechanical properties. We compare these properties between bleached pulp never dried and bleached pulp dried and sampled at the final stage of the drying machine. According to the results, it is shown that the properties of the quality of long-fiber pulp, Arauco Mill, obtained at the end of the bleaching stage, are affected in the drying process by changing its structural properties and resistance as seen in the physical-mechanical properties and optical biometric measures. Increased refining energy is found after the drying of the pulp. This parameter is very important for the customer because it is a disadvantage in cost respect to other international competitors. The greatest cause of loss of property is assigned to the "hornificación (stiffening) of the fibers and inactivation of its external surface due to the dramatic drying, weakening the bond between the fibers. Knowing how much and how the characteristics of the pulp have been altered by this process, we can propose some improvements to enhance the quality of the pulp in those characteristics which have disadvantaged compared to other market pulp and make the value chain more competitive for the pulp mill.

RESUMEN

SALAZAR PÉREZ, Miguel Luis, M. Sc., Universidade Federal de Vicosa, Julio, 2011. **Perfil del proceso de secado de pulpa y sus efectos en las propiedades del producto final.** Orientador: Rubens Chaves de Oliveira. Consejeros: Ana Márcia Macedo Ladeira Carvalho y Adair José Regazzi.

En Chile, el rubro de la celulosa es la principal actividad económica del sector forestal, esta se comercializa en su totalidad en forma de fardos secada al 90% AD. En la calidad final obtenida de la celulosa, no solo está implícita las características de la madera, sino también el tipo de proceso utilizado, los insumos químicos que intervienen, la forma en que ésta se lleva a cabo y como se maneja en el proceso productivo. Los mecanismos que hay detrás de los problemas de calidad de la pulpa, han sido tratados en distintos trabajos de investigación. Según estos, las principales etapas del proceso que intervienen en mayor o menor grado en este deterioro son: El digestor, la deslignificación con oxígeno y la máquina de secado. Este trabajo consiste en evaluar el efecto que tiene la etapa de secado sobre la calidad del producto final, midiendo principalmente sus características ópticas, biométricas, y físico mecánicas. Estas propiedades se comparan en la pulpa líquida blanqueada previa al secado y en la etapa final de la máquina secadora. Según los resultados obtenidos, se demuestra que las propiedades de la calidad de la pulpa obtenidas al final de la etapa de blanqueo, se ven afectadas en el proceso de secado, modificando sus propiedades estructurales y de resistencia, tal como se observa en las características físico-mecánicas, propiedades biométricas y ópticas medidas. Como factor relevante se observa, un importante incremento de la energía de refinación, parámetro que nos representa en desventaja frente a otros competidores internacionales. El mayor responsable de la pérdida de propiedades se asigna a la "hornificación" (rigidización) de las fibras y a la inactivación de su superficie externa como consecuencias del secado drástico, debilitando la unión entre ellas. Conociendo como se alteran las características cualitativas y cuantitativas de la pulpa en el proceso de secado, se pueden proponer algunas mejoras y potenciar la calidad de esta, en aquellas propiedades que se tienen desventajas frente a otras pulpas de mercado y hacer que la cadena de valor sea más competitiva para la planta de celulosa.

1. INTRODUCCIÓN

La mayor parte de la pulpa de mercado que se comercializa en el mundo es vendida en forma de fardos seca (once-dried) con aproximadamente entre un 85-90% de sólidos (fibras de celulosas) y el resto es agua.

La pulpa que se exporta de Chile al mercado europeo y asiático no es la excepción, considerando su lejanía de estos mercados los costos de flete impactan fuertemente en su costo final, lo que da una idea que el contenido de seco del producto final se acerca a lo absoluto para maximizar esta logística de su transporte hacia los clientes y llegar con precios competitivos al mercado.

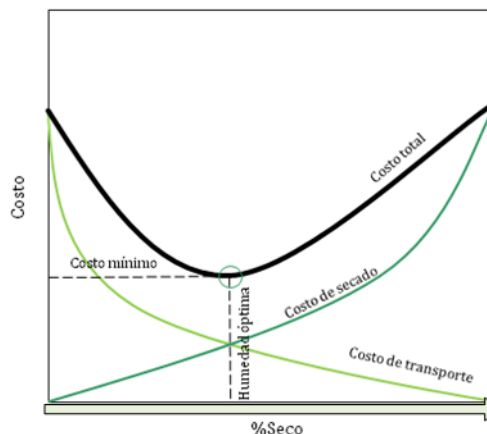


Fig1. Comparación del costo de secado y el costo del transporte de la pulpa

Para llevar a cabo este proceso de comercializar en forma de fardos, la planta de celulosa tiene un proceso que se encarga de formar la pulpa líquida proveniente del blanqueo en un lámina continua de celulosa y secarla mediante eliminación del agua por drenaje, prensado y secado con aire caliente, terminando esta hoja seca formateada en dimensiones apropiadas para su manejo y con un seco final del orden de 88% BD.

La respuesta de las propiedades físico mecánicas al refinarlas, en relación a las pulpas líquidas (never dried) con respecto a las secas (dried) son ampliamente conocidas por trabajos técnicos de varios autores (ver referencia bibliográfica), y se ha demostrado que al secarse la pulpa en mayor ó menor medida se pierden propiedades físico mecánicas, se alteran las propiedades ópticas y cambia la estructura biométrica de la fibra, al estar sometida a un stress térmico en el secador para eliminar el contenido de agua remanente de la hoja de celulosa después del prensado, de allí la importancia que tiene este proceso de secado de considerar una etapa posterior de enfriamiento de la hoja de celulosa, porque las altas temperaturas que se alcanzan de 70-80°C saliendo del secador tiene un efecto negativo sobre la calidad final de la pulpa.

Por otro lado, se sabe que estos ciclos de secar la pulpa y posteriormente hidratarla causan contracciones de las fibras debido a la formación de puentes de hidrógeno. Este efecto irreversible es conocido como “Hornificación” y es cuantificado como el % de reducción del water retention values (WRV) por lo que al disminuir este valor significa que la fibra pierde la capacidad de hinchamiento por absorción de líquidos generando posteriormente pérdida de capacidad de refinabilidad de la pulpa durante la fabricación de papeles.

Dado estas consideraciones técnicas entonces el secado de la pulpa, pasa a ser un factor económico importante tanto para el cliente como para el productor de esa pulpa, por los efectos económicos involucrados y especialmente el de uso óptimo de la “Energía”.

En la actualidad, las Plantas de Celulosa que se instalan son de alta producción, sobre el 1.000.000 de toneladas anuales, esto hace que los secadores de pulpa sean de tamaños de cierta consideración, con un alto costo de capital, por lo que los fabricantes tienden a producir secadores con estructuras los más compactas posibles. Este hecho hace que se tienda a acelerar la velocidad de evaporación del agua para extraerla rápidamente de la superficie e interior de la hoja de celulosa sin aumentar considerablemente el área de calefacción. Esta relación tiene que ver entonces con la temperatura del aire del secador y por ende la cantidad de energía que uso para calentar ese aire.

Por otro lado, existe en la actualidad un interés creciente en los papeles con pH alcalino, y gran parte de su mercado es para usos que requieren permanencia y durabilidad, las fibras que se usan como composición del papel tienden a tener un nivel de acidez asociada a la secuencia de blanqueo utilizada (etapa final con dióxido de cloro), por lo anterior, se sabe que los efectos de la refinación de la pulpa se ven ampliamente beneficiados a un pH alcalino, ya que la pulpa se hidrata mejor y se reduce el consumo de la energía de refinación, también la pulpa en estas condiciones de alcalinidad facilita la fabricación de estos papeles, obligando entonces al productor de celulosa a la necesidad de satisfacer este mercado y diversificar su producción de pulpa a este tipo de producto lo que significa pensar en la última etapa de blanqueo con peróxido. Esta condición, aparece como una variable más que el productor de celulosa debe conocer y analizar sus efectos para el secado de la pulpa, ya que si bien en este medio se conserva mejor las propiedades físico –

mecánicas, tiene dificultades para el productor en drenar, prensar y secar, lo que impacta también en el uso eficiente de la energía.

Dado estos escenarios y considerando el uso eficiente de la energía en la planta de celulosa, se plantea con esta investigación analizar tres escenarios que relacione el uso eficiente de esta energía, con las propiedades de la pulpa para buscar su óptimo económico.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

El objetivo principal de este trabajo es analizar el efecto que tiene el pH final de la hoja en la hidratación de la pulpa seca y su resultado en el consumo de energía de refinación y propiedades de resistencia. Ya que la condición de PH de la suspensión de pulpa en la etapa de formación de la hoja tiende a favorecerse el pH bajo para optimizar el drenaje del agua, situación que se contrapone, a la facilidad de hinchamiento de la fibra por hidratación en un medio alcalino.

Se debe analizar, el efecto de la humedad final del fardo en la facilidad de hidratación de la pulpa y su efecto en el consumo de energía de refinación y propiedades de resistencia, ya que en su proceso de secado se tiende a favorecer un seco alto para evitar mayores costos de transporte por mayor contenido de agua.

Se debe analizar, el efecto que tendría sobre el consumo de energía de refinación y propiedades de resistencia de la celulosa, si esta es secada utilizando temperaturas de aire más baja (vapor de baja presión en el secador, de manera de hacer un secado "Extendido" (menos drástico).

2.2 Objetivos Específicos

Escenario1.- Como influye la distinta temperatura del aire de secado en las propiedades de la pulpa.

Escenario2.- Como influye los distintos pH de la pulpa en las propiedades finales de la pulpa.

Escenario 3.- Como influye el seco final de la hoja en las propiedades de la pulpa.

En cualquiera de estos escenarios la evaluación técnico económica para este tipo de planta de celulosa, se fundamenta en la posibilidad de ahorrar vapor de media presión que usa en el secador, para reutilizarla en la generación de energía eléctrica.

3. REVISION BIBLIOGRAFICA

3.1 Importancia de la Pulpa de Fibra Corta en las Propiedades del Papel.

Las pulpas Kraft dominan hoy el mercado de la celulosa (producción de más del 90% de pulpa química en el mundo). Estas son muy estables, limpias y muy resistentes, en comparación a otras pulpas comerciales de madera. Estas características las hacen ideales para la fabricación de papeles de alta calidad. (Folleto Corporativo Arauco, Reporte Anual, 2009)

En los últimos años se ha incorporado en forma creciente la madera de eucalipto como materia prima para la fabricación de celulosa, además su desarrollo y mejoras en el manejo forestal ha permitido que esta celulosa reúna una serie de atributos que la transforman en la materia prima ideal para la producción de papeles tissue de alta calidad y papeles finos para impresión y escritura, incluyendo sus propiedades de resistencia, lo que ha permitido aumentar su porcentaje de participación en la composición de los papeles respecto de la fibra larga, permitiendo reducir el costo final (Corma, Chile Forestal, Reporte Anual, 2009).

Esto se ha traducido en muchos estudios destinados a mejorar las propiedades de resistencia (Karlsson, 2002, Bjork *et al*, 2002, Horn, 1974, Sutton & Crossely, 1990). Todos estos esfuerzos de investigación que se han realizado, son porque las fibras provenientes de eucaliptos principalmente han evolucionado con la tecnología y junto a otros atributos la resistencia es considerada la propiedad más importante de la pulpa kraft ya que permite reemplazar fibras más caras.

Por estas características, la resistencia debe tratar de ser preservada integralmente en todas las operaciones utilizadas por el proceso de fabricación de celulosa, teniendo en cuenta que hoy la pérdida no controlada de ésta se traduce en un consumo mayor de madera, siendo este hoy, un bien de mucho valor en el sector forestal.

3.2 Calidad de La Pulpa

La calidad de la pulpa puede ser medida por el concepto conocido como "Strength Delivery", el cual tiende a cuantificar en porcentaje, la pérdida de resistencia de una pulpa ideal (laboratorio) comparada con la correspondiente pulpa produ-

cida industrialmente en una planta de celulosa. El strength delivery en pulpas kraft medida como índice de rasgado para una tensión dado (par rotura-rasgado) oscilan en el rango de 65- a 85% (Martin *et al*, 2001, Brannval y Lindstrom, 1999).

La operación del digestor es la que contribuye principalmente en esta pérdida de resistencia, siendo responsable de un 25% en esta relación rotura-rasgado de una producción industrial típica de pulpa blanqueada, ya que esta parte del proceso logra más del 90% de la deslignificación de la madera. Estudios han demostrado que en el interior del digestor, la pulpa tiene mayor resistencia que la monitoreada después del soplado, debido a que las fibras son dañadas mecánicamente en la descarga de la pulpa por las válvulas de soplado y su bombeo. Las altas temperaturas que se logran, también afectan esta resistencia incluso con soplados bajo los 100°C. Dado estos antecedentes, es natural hacerse la pregunta acerca de qué pasa con el deterioro de la fibra en los procesos posteriores hasta llegar al producto terminado, como son las etapas de, deslignificación con oxígeno, blanqueo y finalmente en el secado de la pulpa. (Nyholm *et al*, 2001, Joutsimo, 2004).

La degradación química de la celulosa, ha sido una de las razones para explicar la pérdida de resistencia. Esta generalmente se evalúa indirectamente a través de la pérdida de viscosidad de la pulpa, sin embargo, al no estar estrechamente relacionada, la diferencia se puede explicar por la forma que adoptan las fibras durante su paso por las distintas etapas del proceso, más curvadas y dislocadas (curl, kinks, twist). (Karlsson, 2006; Bjork, 2002; Joutsimo, 2004; Martin *et al*, 1995).

Las fibras rectas pueden soportar una acción mecánica en todo su extensión, sin embargo, las fibras dislocadas o curvadas no son tan fuertes para soportar un stress mecánico. Las deformaciones y daños de la fibra aumentan a lo largo de la línea de producción, desde la pulpa café hasta el blanqueo, por lo tanto, las características de equipamiento de la planta y el tipo de proceso utilizado para obtener esta pulpa, es importante considerarla, por su efecto en la calidad final. (Martin *et al*, 1995, Tikka, 2007).

3.3 Proceso Kraft e Influencia en la Resistencia de las Fibras y sus Propiedades.

Durante el pulpaje químico y las operaciones de blanqueamiento, las propiedades de las fibras cambian debido al tratamiento químico y mecánico que se em-

plee e incluyen cambios en las dimensiones, el potencial de la capacidad de enlace (bonding) y la resistencia intrínseca de la fibra. La longitud de la fibra en la cocción, no se ve afectada significativamente (2-6%). El principal efecto es una reducción importante, alrededor del 50%, en el espesor de la pared celular, y la consiguiente reducción en la anchura de fibra, alrededor de un 15%. La remoción de lignina durante la fabricación de pulpa, sólo conduce a la reducción en las dimensiones transversales, i, e., el espesor de la pared celular y el ancho de la fibra, que se resumen definitivamente en una reducción del coarseness de la fibra. (Li, 1999).

El efecto de la hemicelulosa en el potencial de enlaces interfibrilares, está relacionada con varios aspectos distintos; la cantidad y calidad de uniones que pueden existir entre fibra-fibra por unidad de área, y del potencial de enlace de la fibra. Diferentes composiciones de hemicelulosas generan distintas características de la fibra, la pulpa con alto contenido de xilanas tiene una baja resistencia medida como índice de rasgado-tensión, pero pueden soportar mejor el tratamiento mecánico. Las pulpas con bajo contenido de xilanas son más propensas a dañar su pared celular en las etapas de bombeo y agitación, lo que conlleva a mediciones del índice de tensión menores. (Brannval & Lindstrom, 2007).

Alto contenido de hemicelulosa aumenta la plasticidad de la fibra, confirmado por el aumento de la capacidad de absorción de agua (water retention value) lo que permite uniones interfibrilares más fuertes. El mayor potencial de unión interfibras, es una propiedad controlable durante la fabricación de pulpa porque la resistencia medida como zero-span (medida intrínseca de la fibra) es directamente proporcional al contenido de celulosa (Li, 1999).

En el caso de la deslignificación con oxígeno, algunos trabajos muestran resultados de strength delivery en las plantas, del orden del 5% ó más. No está claro cuánto de este problema puede ser atribuido a la química del proceso y cuánto se debe al daño físico de la fibra. (MacLeod *et al*, 1995).

Como se ha indicado anteriormente, el daño en la pulpa, por lo general se caracteriza como fibras que presentan defectos de formas, dislocaciones y pérdidas de resistencia. Todos estos fenómenos tienden a disminuir la capacidad de la fibra lo que se transmite en menor resistencia. Los daños en las fibras se producen principalmente en las capas de la pared celular denominadas S1 y S2, cuando la microestructura de las fibras cambia, debido a las acciones mecánicas y químicas durante el

procesamiento de la pulpa. La deformación de la fibra comienza en condiciones alcalinas la que conduce a un aumento de éstas, hinchándolas. Cuando el álcali es removido, los sitios reactivos de las fibrillas tienden a formar nuevos sitios, debido a las fuerzas mecánicas, hemicelulosa y la eliminación de la lignina. Producto de esto la fibra cambia de forma, aumentando su curvatura y las dislocaciones (Nyholm *et al*, 2001, Joutsimo, 2004).

Según varios estudios, los procesos alcalinos, las altas temperaturas, las altas fuerzas de cizalla y la deslignificación prolongada, promueven la formación de daños de fibra. Cuanto más severas son estas condiciones, más daños ocurren. En el caso de la deslignificación, el defecto parece estar relacionado principalmente en la disolución de carbohidratos. Se ha observado que las hemicelulosas, especialmente la presencia de xilano, protegen las fibras contra la degradación de ésta y las pérdidas de la viscosidad. Por lo tanto, la disolución de hemicelulosas durante una cocción muy extensa, puede promover la aparición de daños en la fibra en la deslignificación con oxígeno. Por otra parte, si la deslignificación con oxígeno se extiende, con el acompañamiento de alto-corte en la agitación de la pulpa por bombeo, más daños y perjuicios se generan en la fibra. (Rauvanto, 2003).

Otro estudio muestra que la acción mecánica en procesos de pulpaje con consistencias más altas (10%) en las plantas puede incrementar fuertemente la aparición de deformaciones y dislocaciones en las fibras. (Sutton, *et al*, 2001)

En el blanqueo no se observan cambios en el largo de la fibra, pero por la pérdida de rendimiento, se observa una degradación de las moléculas que forman la celulosa, traduciéndose en que hay más fibras por unidad de peso en la pulpa blanqueada. Esto tiene un efecto favorable en la resistencia al rasgado. Gracias a la remoción de lignina, la fibra se dilata más fácilmente y se incrementa la plegabilidad y la flexibilidad. Esto facilita la cohesión de la red de fibras mejorando la refinabilidad de la pulpa en el blanqueo.

Los efectos del coarseness de la fibra en las propiedades de la pulpa también se han analizado (Ramezani & Nazhad 2004). Si bien la reducción de longitud de la fibra o la reducción de la resistencia, puede afectar al producto final, los cambios en el coarseness de la fibra influye prácticamente en todas las propiedades de la pulpa, en la capacidad de drenaje, en la resistencia en húmedo, en la resistencia

estructural, en la capacidad de enlace entre fibras y en las propiedades ópticas de las hojas seca (Ramezani & Nazhad 2004).

El coarseness depende del diámetro de fibra, el espesor de la pared celular, la densidad de la pared celular y la sección transversal de la fibra. Un valor elevado, indica que la fibra tiene un alto espesor de pared, dando fibras rígidas incapaces de colapso. Fibras de paredes más delgadas tienen un valor bajo de coarseness y generan fibras flexibles y una hoja más densa. El grosor de las fibras, es importante para la fabricación de papeles de embalaje y tiene desventaja para la fabricación de papeles de impresión. Las fibras con alto coarseness causan irregularidad en la superficie y una mala formación de la hoja.

A nivel mundial, la comercialización de la celulosa se hace en su forma de fardos casi seca, por lo que la producción de papel en muchos casos, se efectúa a partir de fibra que ha sido sometida a un proceso de secado. Los cambios que ocurren en este proceso corresponden a un fenómeno investigado en fibra virgen por Jayme (Jayme, 1994), al que se denominó Hornificación. Este término se refiere a las alteraciones que sufren las capas externas de la fibra celulósica, durante el proceso de secado en la fabricación de papel y durante su exposición al medio ambiente. Estos cambios inducen a diferencias en propiedades de resistencia del papel, en comparación con el papel que se ha estructurado a partir de pulpa que no se ha secado nunca, especialmente cuando se evalúan propiedades que están directamente relacionadas con la hidratación e hinchamiento de la fibra celulósica.

La naturaleza hidrofílica de las fibras celulósicas desempeña un papel importante, ya que el proceso de estructuración de la hoja de papel ocurre en un medio acuoso, por lo que las fibras absorben agua y se dispersan fácilmente. (James, 1990). Cuando las fibras húmedas se unen, los enlaces se promueven por la atracción polar de las moléculas de agua con los grupos hidroxilo que cubren la superficie de la celulosa. Cuando se evapora el agua, los grupos hidroxilo se unen por medio de puentes de hidrógeno. (Turrado, *et al*, 2008).

El proceso de Hornificación es inducido por el prensado y secado de la pulpa. Este fenómeno produce un cambio en la estructura porosa de la fibra. Los resultados muestran que la refinación para una fibra de celulosa sin secar, actúa principalmente agrandando los poros de la pared celular, teniendo un ligero efecto sobre los microporos. El secado de la fibra cierra los poros de mayor tamaño y también una canti-

dad sustancial de los pequeños. En este caso, el refinado no solo amplía el tamaño de los poros sino también logra abrir parte de los microporos a una cierta medida que estaba totalmente cerrado. Aunque el volumen de los poros de la pulpa secada puede ser recuperados por refinado (reswollen), algunos pequeños poros que se cierran durante el secado no se vuelven a abrir por los niveles normales de refinación. En otras palabras, el refinado de la pulpa seca no logra revertir completamente el fenómeno de Hornificación (Haggkvist, Li, & Odberg 1998).

El secado y su posterior desintegración en las plantas papeleras, disminuye la capacidad de hidratación de la pulpa y aumenta el consumo de energía de refinación. Por esto es importante analizar como el proceso de hornificación afecta las propiedades de la celulosa. (Scallan & Tigerström, 1992, Wang, 2006).

3.4. Etapas Proceso Típico Kraft y Control de Características del Producto *(Fuente: Manual de Productos Planta Arauco, 2009)*

3.4.1 Características de la Materia Prima

La celulosa partir de madera contiene variados y diferentes compuestos químicos, los cuales pueden ser divididos en cinco grandes grupos:

- 1. Celulosa**
- 2. Hemicelulosa**
- 3. Lignina**
- 4. Extraíbles**
- 5. Inorgánicos**

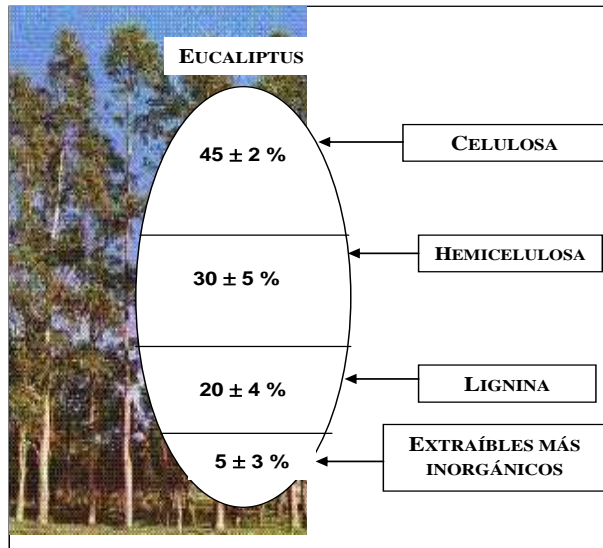


Fig. 2 Características de la Madera Eucalipto (Fuente: *Manual de Productos de Planta Arauco, 2009*)

El proceso comienza con la recepción de rollizos para el descortezado y astillado, continúa con la cocción de las astillas, para la disolución de la lignina. Las astillas alimentadas al digestor tienen un 30% de astillas externas procedentes de aserraderos, con ello se obtiene una densidad media de 380 Kg/m³.

3.4.2 Proceso Cocción

Usando un Digestor Continuo Hidráulico de dos vasos la madera es impregnada con una solución de soda cáustica y sulfuro de sodio (licor blanco), con una carga de álcali 14% para permitir la separación de la celulosa o las fibras de la madera de la lignina, para obtener una Kappa promedio de 15 ±1. La cocción utilizada es del tipo Low solids.

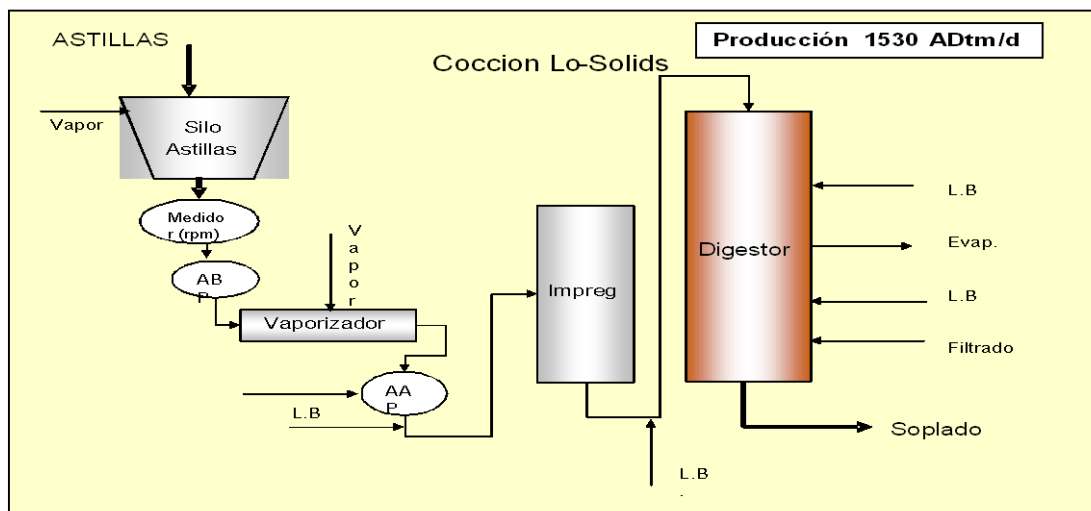


FIG. 3 Esquema de la etapa de alimentación de astillas, impregnación y Digestor
(Fuente: Manual de Productos de Planta Arauco, 2009)

3.4.3 Lavado y Deslignificación

Posteriormente, las astillas cocidas pasan a una etapa de soplado y lavado que se realiza en el Difusor Atmosférico para luego separar los nudos. Sucesivamente, en las etapas de lavado a través de dos Deckers con un sistema de harneros centrífugos, la mezcla de fibras, residuos de productos químicos, material orgánico disuelto y algunas impurezas, se clasifica, limpia y espesa, dando origen a la pulpa cruda que se almacena en estanques de alta consistencia.

En la etapa de deslignificación por oxígeno, la pulpa cruda es sometida a una deslignificación adicional antes del blanqueo, a una temperatura de 90°C, en presencia de oxígeno y licor blanco oxidado o, eventualmente, soda cáustica. Esta se realiza en dos reactores de oxígeno (Oxytrac) seguido por una prensa de lavado.

A la salida de esta etapa, la pulpa cruda tiene menos lignina residual (kappa 10) la que es más clara y consume menor cantidad de reactivos para ser blanqueada (57 a 60 % deslignificación).

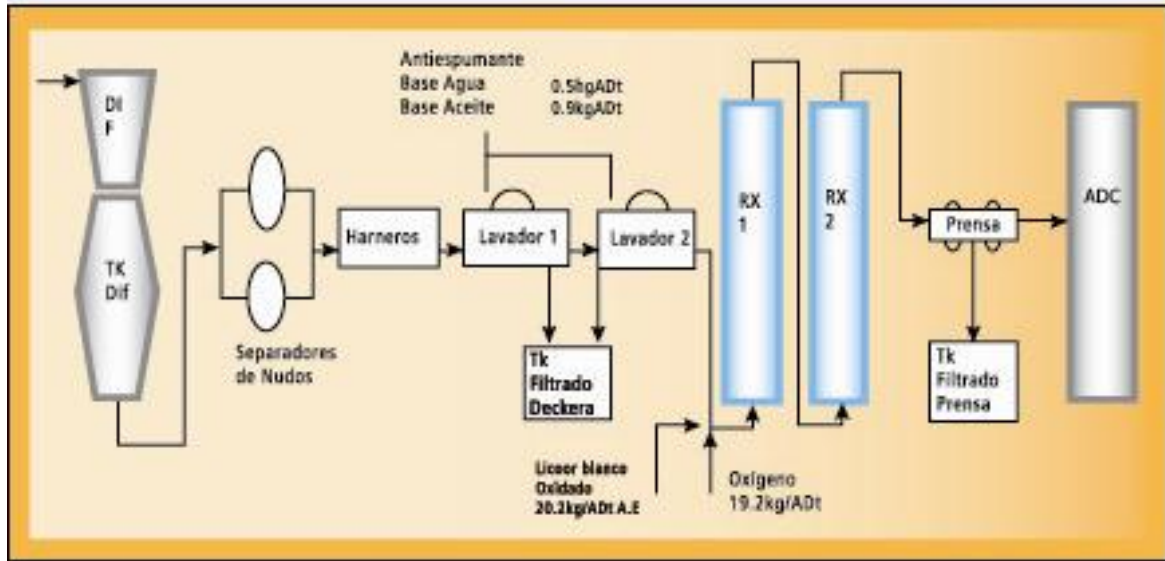


FIG. 4 Esquema general de la etapa de lavado de pulpa y deslignificación con oxígeno.

(Fuente: Manual de Productos de Planta Arauco, 2009)

3.4.4 Blanqueo de la Pulpa

El blanqueo, permite dar a la pulpa algunas características físicas y químicas deseables, especialmente blancura. Para esto, es necesario remover y/o modificar algunos de los constituyentes de la pulpa sin blanquear. El blanqueo de la celulosa se puede lograr de dos formas:

- Destruyendo los grupos coloreados, sin extraer la lignina que es su portadora,
- Extrayendo la lignina.

La secuencia utilizada es: DE(OP)DED

La celulosa y la hemicelulosa son inherentemente incoloras. Generalmente, se acepta que “los grupos cromóforos” de la lignina son los principales responsables del color.

Efecto del Secado en las Propiedades de la pulpa final. Las primeras etapas del blanqueo se pueden considerar como una continuación del proceso de deslignificación iniciado en la cocción. Las últimas etapas emplean agentes oxidantes para destruir y eliminar el color residual. El proceso de blanqueo se debe realizar en condiciones tales que se mantengan las propiedades de resistencias mecánicas, físicas, y de estabilidad en el color logrado.

El blanqueo se realiza normalmente en una secuencia de varias etapas sucesivas, utilizando productos químicos y condiciones diferentes en cada una de ellas con un lavado entre etapas. Los tratamientos químicos utilizados y sus designaciones abreviadas se enumeran a continuación:

- Dióxido de Cloro (D): Oxida y extrae la lignina y sus derivados, presenta un bajo efecto sobre la hemicelulosa y celulosa. Es un reactivo tan efectivo como el cloro elemental, pero es cuatro veces más caro que el cloro. La principal diferencia con el cloro es que no genera componentes organoclorados tóxicos, como dioxinas y furanos
- Soda Cáustica (E, extracción alcalina): Solubiliza los derivados sustituidos y oxidados de la lignina, bajo condiciones normales no produce efecto sobre la hemicelulosa, pero eventualmente podría degradarla y removerla; no presenta efecto sobre la celulosa. Es usada en la etapa de extracción, acompañado con otro reactivo para ayudar a extraer la lignina, como oxígeno o peróxido.
- Peróxido de hidrógeno (P): Es un estabilizador de la blancura se utiliza en un medio alcalino. Es decir, soda cáustica más peróxido.
- Oxígeno (O): Es un fuerte oxidante de la lignina, se utiliza oxígeno elemental a alta presión y medio alcalino.

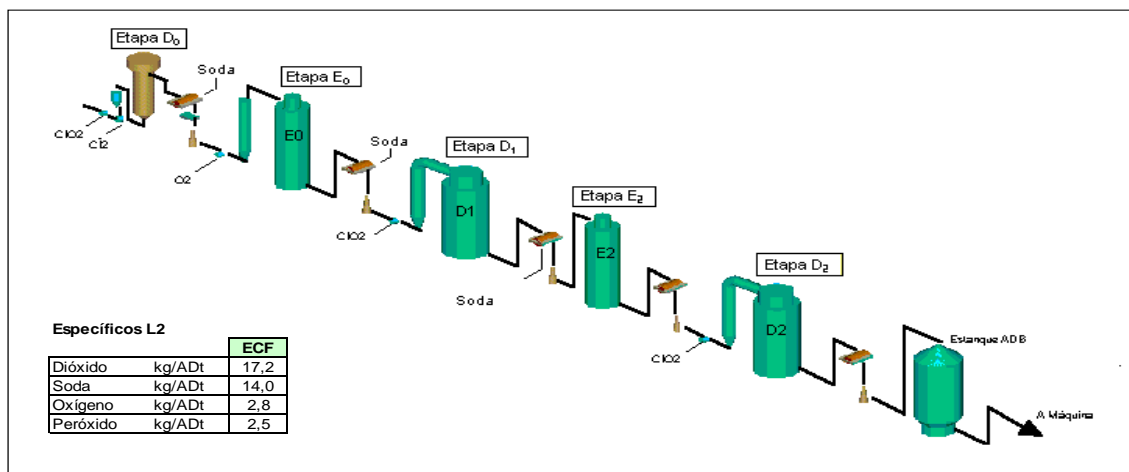


FIG.5 Esquema general de una secuencia de blanqueo de cuatro etapas.
(Fuente: Manual de Productos de Planta Arauco, 2009)

3.4.5 Proceso de Secado de la Pulpa

La máquina secadora consiste en un número de componentes con diferentes funciones: El cajón de entrada, donde la suspensión de pulpa es depositada sobre

una tela en movimiento para formar una lámina continua de fibras por retención de ellas y con elementos que permiten drenar el agua. Sección de prensas, para remover toda el agua que no fue removida anteriormente, en esta parte la estructura de la hoja se ve influenciada por el prensado. Secador de aire Flakt, donde el agua remanente es removida, usando radiadores con vapor que permiten calentar el aire. Prensado y Embalado, donde la lámina cortada se utiliza para formar los fardos de celulosa.

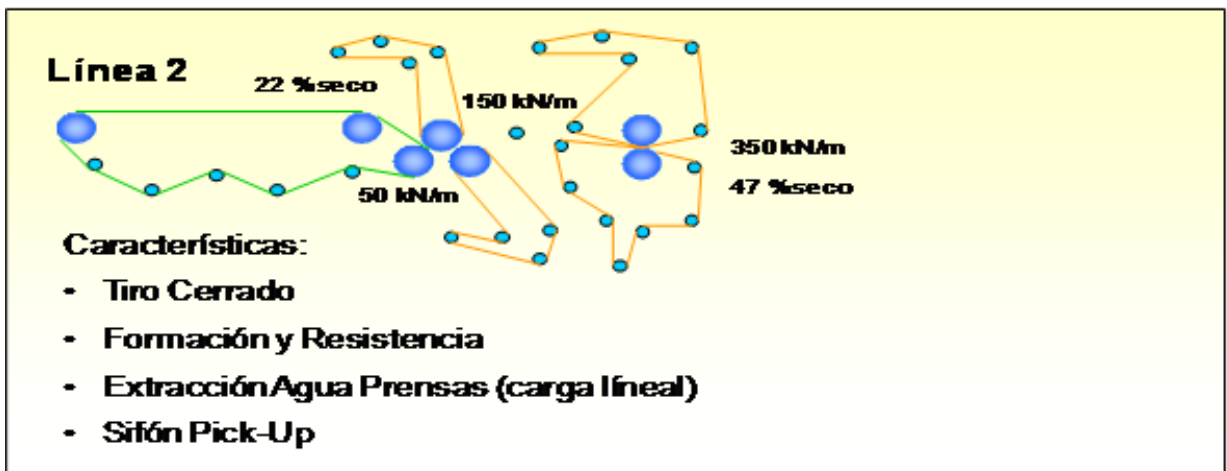


FIG.6 Esquema general de la mesa fourdrinier y sección de prensas de una máquina seca. (Fuente: Manual de Productos de Planta Arauco, 2009)

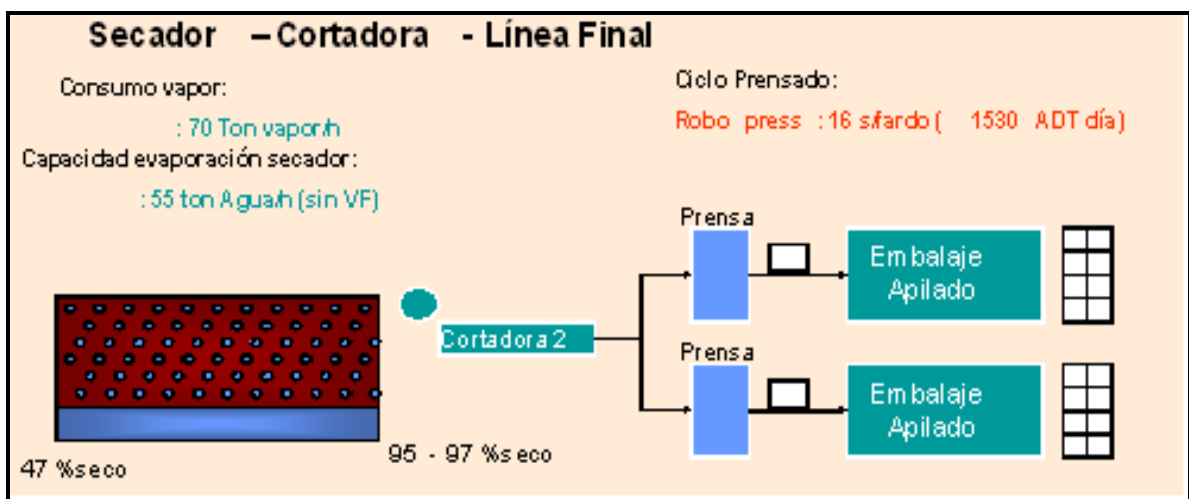


FIG.7 Esquema general del secador y línea finales de embalado de una máquina secadora. (Fuente: Manual de Productos de Planta Arauco, 2009)

3.4.6 Caracterización del Producto

Las características que definen el producto “Celulosa en Fardos”, se pueden clasificar en ópticas, físico-mecánicas, morfológicas, parámetros ambientales y propiedades químicas.

3.4.6.1 Características Ópticas

Blancura

Especifica la intensidad con que la hoja de celulosa refleja un haz de luz incidente de una determinada longitud de onda. Su determinación se efectúa en medidores de reflectancia de luz difusa como el Datacolor Elrepho 2000 o el Technidyne Color Touch II, usando como base la norma ISO 2470. El valor de la blancura se expresa como porcentaje, en una escala en que el 0% indica la carencia de reflectancia, y el 100% se asocia al reflector ideal (patrón).

Reversión de Blancura

El ensayo pretende estimar la disminución de blancura a lo largo del tiempo, factor importante a considerar durante la comercialización de la celulosa. Esto pretende dar una idea de la blancura final que recibe el cliente después de su fabricación.

Se envejece artificialmente una muestra de producto, tomando como referencia lo indicado en la norma ISO 5630-1, y se compara la muestra así procesada, con la blancura original.

Opacidad

Especifica la resistencia que opone una hoja de celulosa al paso de luz de una determinada longitud de onda. Se determina utilizando como base la norma ISO 2471. Es decir, se mide como la “razón de contraste” entre el valor de la reflectancia de una sola hoja apoyada sobre una superficie negra no reflectante y la de una “pila” de las mismas hojas. Se expresa como porcentaje (%).

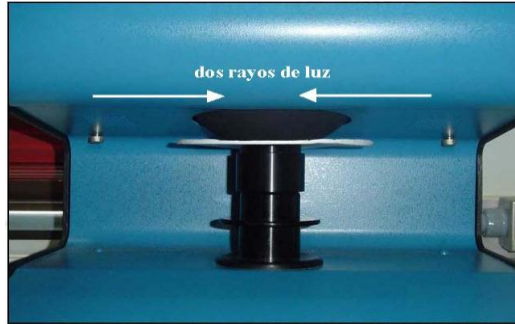


Fig.8 Fotografía indicando porta muestra de un en equipo Touch color para medir opacidad. (Fuente: Manual de Productos de Planta Arauco, 2009)

Pintas

Especifica las impurezas de características fibrosas y no fibrosas que presenta la hoja de celulosa y que son apreciables a simple vista. En ellas se incluye los shives (material de naturaleza fibrosa, tales como pequeñas astillas y haces de fibras) y los dirt (impurezas de carácter no fibroso, tales como: arena, micas, carboncillo, óxido férrico, pitch, etc). Su determinación se efectúa utilizando como base la norma ISO 5350/2. El ensayo consiste en examinar hojas de celulosa en una mesa de luz transmitida donde se determinan tanto las impurezas superficiales como las contenidas en el interior de la hoja. Se expresa como contenido total de impurezas por unidad de peso de celulosa 100% seca, esto es en mm²/kg.

3.4.6.2 Propiedades Físico-Mecánicas (Fuente: Manual de Productos de Planta Arauco, 2009)

Las propiedades físico-mecánicas de una celulosa se indican mediante la *curva de refinación*, que es de gran importancia para el cliente, pues permite predecir el comportamiento industrial de una celulosa determinada.

Refinabilidad

La refinación en el laboratorio es realizada en un equipo llamado refinador ó molino PFI. El tratamiento mecánico sobre la fibra produce: hidratación, hinchamiento, fibrilación y corte. Al depositar la pasta resultante sobre un formador de hoja es-

tandarizado, las fibras se entrelazan, y dan origen a una hoja de papel de laboratorio con un peso base aproximada de 60 gr/m². Esta hoja preparada según la norma ISO 5269/1, tiene resistencia a los esfuerzos principales sometidos y es ocupada como probeta de ensayo para efectuar los test incluidos en la Curva de Refinación: tensión, explosión, rasgado, etc.

Drenabilidad ó Freeness

Está expresada como una medida de la velocidad a la cual se podría eliminar el agua de una solución diluida de pulpa. Se ha demostrado que la drenabilidad está relacionada con las condiciones superficiales y con el hinchamiento o engrosamiento de las fibras. Constituye un índice útil para indicar el grado de tratamiento mecánico al cual ha sido sometida la fibra. La unidad empleada es el grado Schopper Riegler (°SR) y su determinación está basado en las norma ISO 5267-1 (TAPPI T248)

La referencia utilizada para evaluar las propiedades físico-mecánicas típicas de la celulosa son: 30°SR para Celulosa de Eucalipto. (*Fuente: Manual de Productos de Planta Arauco, 2009*)

Volumen Específico:

Es el resultado inverso de la Densidad Específica, definida como el peso por unidad de volumen que tiene el papel obtenido a partir de una pulpa determinada. Disminuye con el grado de refinación. Su determinación se efectúa tomando base la norma ISO 534 ó su equivalente TAPPI 220. Como la unidad en que se expresa la Densidad Específica ó el Peso Específico es en g/cm³, entonces:

$$\text{Volumen Específico} = 1/\text{Densidad Específica} = \text{cm}^3/\text{g}$$

Índice de Tensión

El *índice de tensión*, indica la resistencia que soporta una hoja de papel al ser sometida a un esfuerzo de tracción hasta producir la ruptura de una tira de papel. A mayor refinación mayor es el índice de tensión. Se expresa en Nm/g, también en algunos casos como Longitud de Ruptura (km). Para su determinación se emplea la norma ISO 1924, equivalente a TAPPI 220 como método de referencia.



FIG.9 Fotografía de un medidor de tensión, describiendo un ensayo para determinar el Índice de tensión de una muestra de celulosa refinada. (Fuente: Manual de Productos de Planta Arauco, 2009)

Índice de Explosión

El índice de explosión, mide el grado de resistencia de un papel a un esfuerzo multidireccional. Es la presión requerida para producir la ruptura de la hoja de papel cuando la presión se aumenta a una velocidad constante a través de un diafragma de goma sobre un área circular de diámetro definido. Se expresa como kPam^2/g . A mayor refinación mayor es el índice de explosión. Se determina empleando como referencia la norma ISO 2758, equivalente a TAPPI 220.



FIG.10 Fotografía de un medidor de explosión, describiendo un ensayo para determinar el índice de explosión de una muestra de celulosa refinada. (Fuente: Manual de Productos de Planta Arauco, 2009).

Índice de Rasgado

El *índice de rasgado*, mide la resistencia que ofrece un papel frente a un esfuerzo de desgarramiento o cizalla, una vez rota su orilla. Su unidad correspondiente es mNm^2/g . Se determina usando como referencia la norma ISO 1974, equivalente a TAPPI 220.

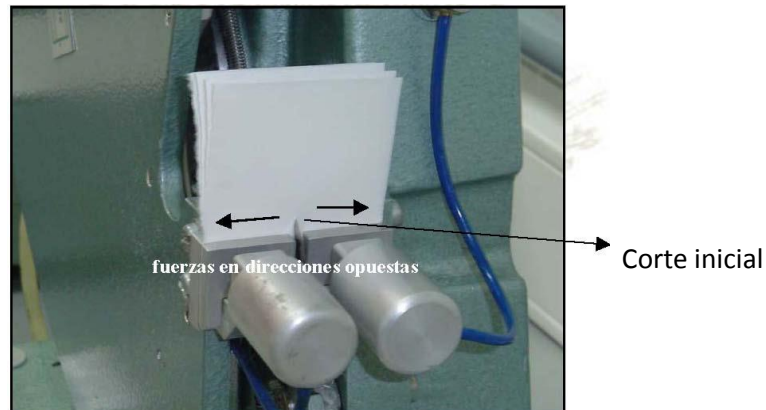


FIG.11 Fotografía de un medidor de rasgado, describiendo un ensayo para determinar el índice de rasgado de una muestra de celulosa refinada. (Fuente: Manual de Productos de Planta Arauco, 2009)

Porosidad

La *resistencia al aire* o *Porosidad Gurley*, correlaciona con la cantidad de espacios intermedios o poros que dejan las fibras entre sí, al formar una hoja de papel. Se determina midiendo el tiempo que demora en pasar una determinada cantidad de aire a través de la hoja (100 ml de aire). La porosidad real disminuye con la refinación (aumenta la porosidad Gurley) y es un buen índice del grado de destrucción de las fibras debido a este proceso. Se expresa como $\text{seg}/100\text{ml}$. A mayor refinación mayor resistencia al aire, es decir, más tiempo se demora en pasar 100 ml de aire por una hoja de papel. Se determina usando como referencia la norma ISO 5636-5, equivalente a TAPPI 460.

En la siguiente figura 12 se observa el ensayo de resistencia al aire Gurley



FIG.12 Fotografía de un medidor de resistencia al aire gurley (porosidad), describiendo un ensayo para determinar la porosidad gurley de una muestra de celulosa refinada al cual se le está pasando un flujo de 100 ml de aire. (Fuente: Manual de Productos de Planta Arauco, 2009)

3.4.6.3 Morfología de la Fibra y Otras Características (Fuente: Manual de Productos de Planta Arauco, 2009)

Las características morfológicas de la fibra son medidas a través de un instrumento llamado L&W FIBERTESTER.

Entre los varios parámetros que mide este instrumento son de particular interés: el largo de la fibra, el coarseness y la población de la fibra. El *largo de la fibra* (*mm*), nos determina si la fibra es de característica larga o corta. El *coarseness* ($\mu\text{g}/\text{m}$) nos determina el peso de la fibra por un metro lineal de fibra. La *población de la fibra* (N°/mg) es otra medición que ayuda a determinar indirectamente la resistencia que se obtendría en el producto final. Además, a mayor cantidad de fibras/mg mejor va ser la calidad final del papel.

3.4.6.4 Análisis Químico de la Pulpa (Fuente: Manual de Productos de Planta Arauco, 2009)

Los análisis químicos de la pulpa de celulosa, cuantifican los compuestos inorgánicos remanentes. Esto se lleva a cabo, para determinar la calidad y el uso

final del papel. En general, estas calidades deben estar exentas de contaminantes y productos químicos perjudiciales y con un pH adecuado.

El análisis de las *cenizas*, es el residuo que queda después de calcinar la pulpa (o celulosa) a 525 ± 25 °C, según norma ISO 1762 (TAPPI 211), es una indicación aproximada del contenido de impurezas tales como sílice, óxido de hierro u otras.

Otras propiedades químicas importantes en la celulosa, son las mediciones del índice Kappa y la Viscosidad.

Índice Kappa

El *índice o número Kappa* se define como la cantidad de lignina residual que contiene la pulpa después de su cocción. Su significancia trasciende en las propiedades de resistencia de la fibra. Valores bajos de Kappa indican una intensa cocción de la madera, la cual afecta en la resistencia de la fibra, pero ahorra en reactivos para el blanqueo. Valores altos indican el fenómeno opuesto. El número Kappa se determina utilizando como referencia la norma ISO 302.

Viscosidad

Otro parámetro importante, dentro de las propiedades químicas de la pulpa, es el *grado de polimerización o Viscosidad*, que especifica indirectamente la longitud de la cadena de la molécula de celulosa. Conociendo el valor de la viscosidad, se puede tener una idea aproximada respecto de la calidad de celulosa, es decir, a mayor viscosidad menor degradación de la cadena de celulosa. Esto asegura mejor resistencia de la fibra. En planta Arauco se usa el concepto de viscosidad intrínseca, que mide la viscosidad de una solución de celulosa disuelta en CED (cuprietilendiamina), cuando la concentración de celulosa tiende a cero. La determinación se basa en la norma ASTM-D 1795 (equivalente ISO 5351/1-1981 (E)).

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Pulpa Usada en la Experiencia.

Para efectos de este estudio la pulpa utilizada fue pulpa industrial obtenida de la línea de producción de kraft blanqueada de Eucaliptus, usando como materia prima una mezcla de madera de Eucalyptus Glóbulus y Eucalyptus Nitens en una proporción de astillas de madera de 80% de glóbulos y 20 % de Nitens en peso. Esta madera es procesada en digestores batch utilizando una cocción de tipo convencional, posteriormente es clasificada y lavada para pasar a un proceso de deslignificación con oxígeno y un blanqueo de tres etapas DEPD para finalmente enviada en forma líquida al 3.5 % de consistencia desde un estanque de almacenamiento a la secadora de pulpa para la formación de hoja, prensado y posterior secado. La pulpa es secada en un secador tipo Flakt airborne para obtener fardos de celulosa con un 96-98% seco al aire y con un peso de 250 kg cada uno.

4.2 Características Principales de la Pulpa de Eucaliptus

TABLA 1 PROPIEDADES BIOMÉTRICAS TÍPICAS DE LA PULPA DE EUCALIPTO MEDIDO EN UN EQUIPO KAJAANI FS 200. (Fuente: *Manual de Productos de Planta Arauco, 2009*)

	UNIDAD	VALORES TÍPICOS	BASADO
LARGO DE FIBRA	(mm)	0.73	Kajaani FS 200
COARSENESS	(mg/m)	0.075	Kajaani FS 200
POBLACIÓN DE LA FIBRA	(Nº/mg)	23500	Kajaani FS 200

TABLA 2 PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS TÍPICAS A 30°SR PARA LA PULPA DE EUCALIPTO
(Fuente: Manual de Productos de Planta Arauco, 2009)

	UNIDAD	PROMEDIO	BASADO
ÍNDICE DE TENSIÓN	(Nm/g)	58.9	T 220 sp-01
ÍNDICE DE RASGADO	(mNm ² /g)	7.0	T 220 sp-01
RESISTENCIA AL AIRE DE GURLEY	(s/100ml)	6.2	T 460 om-02
VOLUMEN ESPECÍFICO (BULK)	(cm ³ /g)	1.59	T 220 sp-01
OPACIDAD	(%)	75.8	T 519 om-02

La organización del trabajo de investigación, en el plano experimental fue dividida en cuatro etapas, que a continuación se detalla

4.3 Etapa (I). “Efectos de la Temperatura de Secado Sobre las Propiedades de la Pulpa A Ph 4,5”.

Consiste en evaluar el efecto que tiene la temperatura y tiempo de secado de la pulpa sobre las propiedades físico-mecánicas y propiedades ópticas de una suspensión de pulpa líquida, secada a un pH constante.

Se tomaron muestras de pulpa líquida (never dried) de eucaliptus y se realizó un estudio para investigar la influencia de temperatura de secado sobre la hoja sin variar las condiciones originales de pH con que viene la suspensión de pulpa a la máquina (4.5), y fueron secadas a seco constante 98% AD a diferentes temperaturas, para luego analizar las propiedades obtenidas con refinación a 30°SR y propiedades obtenidas sin refinar para comparar el efectos de esta variable en estos parámetros.

4.4 Etapa (II). “Efectos de la Temperatura de Secado Sobre las Propiedades de la Pulpa Ajustada a Diferentes Ph de la Suspensión de Fibra”

Consiste en evaluar el efecto que tiene el pH de la pulpa sobre las propiedades físico-mecánicas y propiedades ópticas de una suspensión de pulpa líquida, secada con dos tiempos de secado a distintos pH, estos se tomaron como referencia hacerlo en el rango de 4.0 a 8.0. Este rango tiene relación con la etapa final de blanqueo (D ó P) y las exigencias del proceso a menor pH se drena más fácil y se ahorra vapor en secado y a mayor pH se garantiza al cliente una pulpa seca mas neutra tendencia exigida hoy en la producción de papel.

En la segunda etapa (II), Se tomaron muestras de pulpa líquida (never dried) de eucaliptus y se realizó un estudio para investigar la influencia de dos temperaturas extremas de secado a diferentes pH de la pulpa, y fueron secadas a seco constante 98% AD, para luego analizar las propiedades obtenidas con refinación a 30°SR y propiedades obtenidas sin refinar, para comparar los efectos de esta variable en los parámetros.

4.5 Etapa (III). “Efectos de la Humedad Final de Secado Sobre las Propiedades de la Pulpa ajustada a un mismo Ph de la Suspensión de Fibra”

Consiste en evaluar el efecto que tiene la humedad final de la pulpa sobre las propiedades físico-mecánicas y propiedades ópticas de una suspensión de pulpa líquida, secada con dos tiempos de secado a igual pH.

En la tercera etapa (III), Se tomaron muestras de pulpa líquida (never dried) de eucaliptus y se realizó un estudio para investigar la influencia de dos temperaturas extremas de secado a diferentes tiempos de secado, y a seco variable entre 76% y 88% de seco BD, para luego analizar las propiedades obtenidas con refinación a 30°SR y propiedades obtenidas sin refinar, para comparar los efectos de esta variable en los parámetros.

En todos estos casos para las experiencias realizadas en el Laboratorio las muestras fueron elegidas a la salida del estanque de máquina de la línea 1 (pulpa líquida de 3.5% consistencia). Con esta pulpa se prepararon en el laboratorio hojas de 30 gramos secos para cada experiencia.

Una vez obtenido el volumen para cada hoja equivalente a 30 gramos seco, se ajusta cada set de muestra a diferentes pH, este pH se ajustó con NaOH 0,01 N.

Se filtra cada muestra ya ajustada en la formadora de hoja, luego estas hojas son colocadas en platinas y papeles absorbentes para luego ser prensadas durante 5 minutos.

Una vez prensadas se colocan las hojas en anillos metálicos para luego ser secadas en la estufa con recirculación de aire, imitando las características del secador industrial de la máquina durante 61', 45', 31', 20', 12' minutos hasta obtener un seco de un 97,0 % A.D., para 120 °C; 140°C; 160°C; 180°C y 200°C respectivamente.

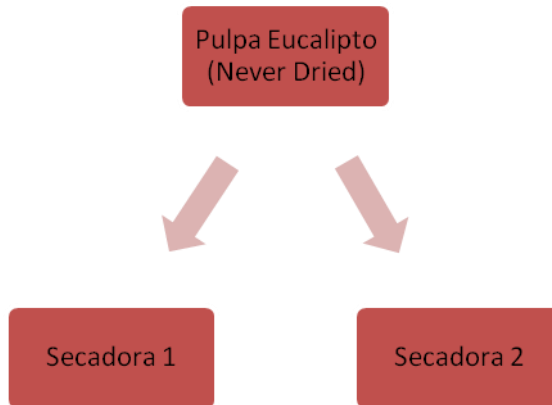
Este estudio de tiempo de secado hasta 97,0 % se realizó con anterioridad a la experiencia, para tener los tiempos reales de secado.

Una vez retirada la muestra de la estufa se remoja durante 4 horas, se procede a desintegrar para posteriormente refinar en un refinador PFI, según norma TAP-PI y obtener los 30°SR.

4.6 Etapa (IV) Experiencia Industrial “Comportamiento de Propiedades de una misma Pulpa Procesada en Dos Maquinas Secadoras con Tiempos de Secado Distintas”

Evaluar el efecto que se tiene sobre las propiedades físico-mecánicas y propiedades ópticas de una suspensión de pulpa líquida, secada industrialmente en dos secadoras de características distintas.

La producción de pulpa de eucaliptus que pasa normalmente por la máquina secadora 1, esa misma pulpa se hizo pasar por la máquina secadora 2. Se monitoreo las condiciones de la pulpa líquida entrando a cada una de las máquinas (never dried pulp) y se tomaron muestras posteriormente de la pulpa de salida en fardos (dried pulp) de cada una de las secadoras para analizar sus propiedades físico-mecánicas y ópticas tanto las pulpas refinadas y sin refinar, para comparar los efectos que se pueden visualizar en sus propiedades con secadoras con distinto curva de secado y tiempo de residencia.



Todo el trabajo de análisis de las de pulpas fueron testeadas en el Laboratorio de Fibras de la Superintendencia Técnica, de Planta Arauco. Para todas las muestras de pulpa, se realizaron ensayos con refinación PFI en un punto (30° SR). Se controlaron propiedades biométricas (Fibertester), de resistencia, propiedades ópticas.

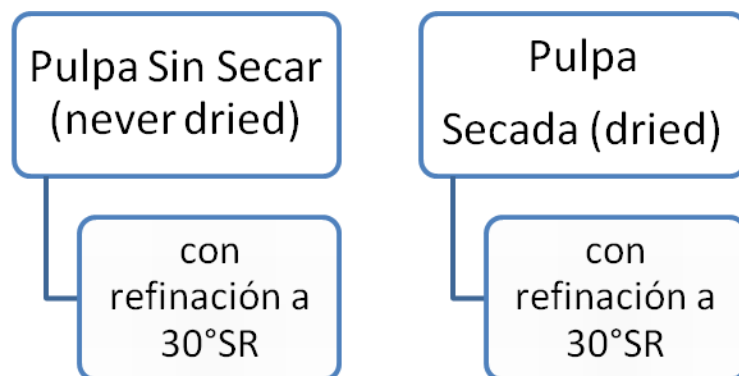


Fig.13 Esquema general del tratamiento de la pulpa a realizar en el laboratorio para analizar y comparar propiedades de resistencia óptica y biométrica.

PROPIEDADES FISICO-MECANICAS	°SR, INDICE DE RASGADO, INDICE DE TENSION, INDICE DE EXPLOSION, VOLUMEN ESPECIFICO, DENSIDAD, POROSIDAD, WRV
PROPIEDADES OPTICAS	BLANCURA, OPACIDAD, REVERSIÓN DE BLANCURA
PROPIEDADES BIOMETRICAS	LONGITUD DE FIBRA, ANCHO, FINOS, N° DE FIBRAS, COARSENESS, SHAPE, KINKS
PROPIEDADES QUÍMICAS	Ph

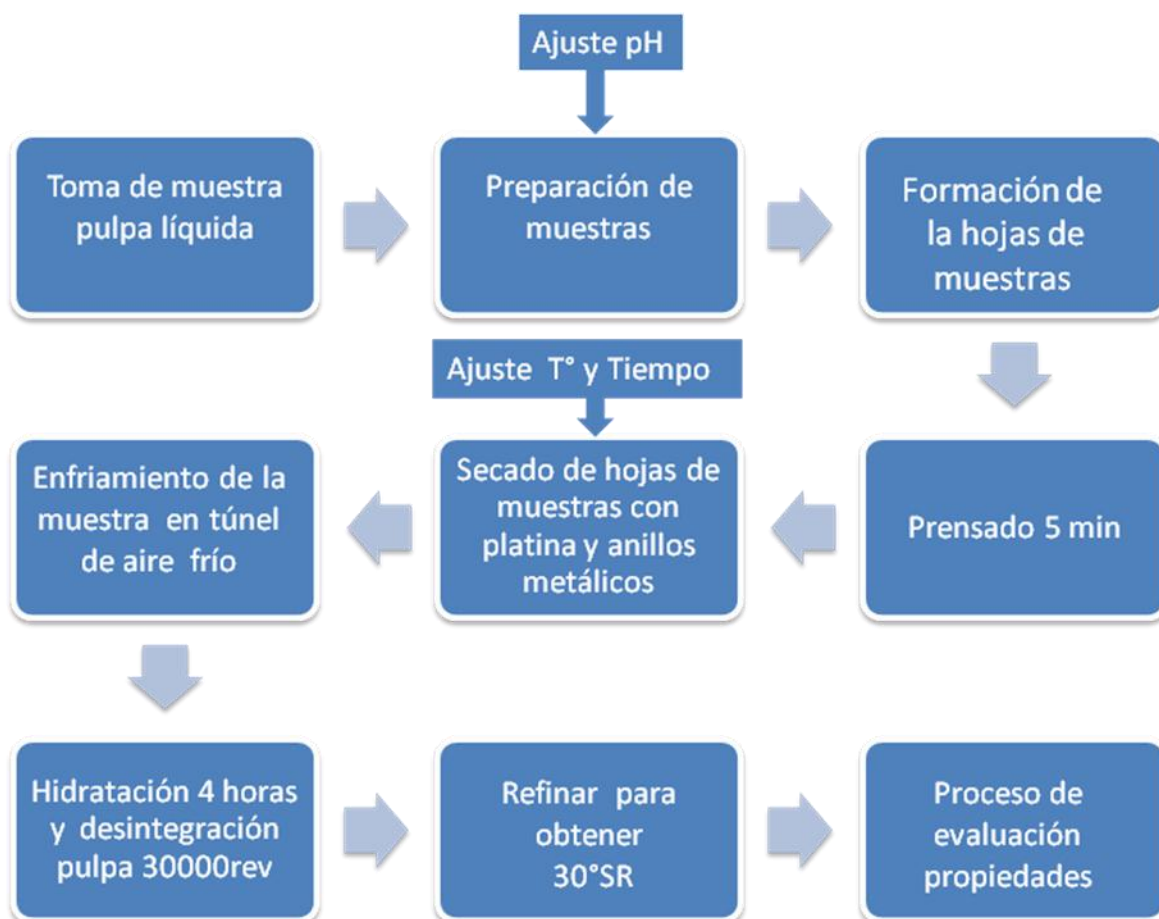
FIG.14 Esquema general de los test físicos realizados a la pulpa para determinar sus principales propiedades de acuerdo a normas ISO

Todas estas propiedades estan basadas en las normas ISO (y su equivalente en normas TAPPI).

- a) Refinabilidad ISO 5264-2 (TAPPI 248)
- b) Drenabilidad ISO 5267-2 (TAPPI 227)
- c) Indice de Tensión ISO 1924-2 (TAPPI 220)
- d) Indice de Explosión ISO 2758 (TAPPI 220)
- e) Indice de Rasgado ISO 1974 (TAPPI 220)
- f) Volumen Específico ISO 534 (TAPPI 220)
- g) Porosidad Gurley ISO 5636-5 (TAPPI 460)
- h) Opacidad ISO 2471 (TAPPI 519)

El pre tratamiento que se realiza a las muestras de pulpa ya secada para realizar los ensayos en el laboratorio, del WRV y los ensayos físicos - mecánicos, fueron hechas de acuerdo al método estándar de desintegración establecido en la norma TAPPI T 248 sp-00 Laboratory beating of pulp (PFI mill method).

TABLA 3 Esquema del protocolo utilizado en el laboratorio para el tratamiento de las muestras de pulpa y su evaluación de propiedades principales.



4.7 Diseño Experimental

El trabajo de Investigación utiliza tres variables independientes que puedan incidir en las características de la pulpa secada con respecto a la pulpa sin secar, en las propiedades físicas mecánicas, propiedades ópticas y propiedades biométricas. Las variables independientes son: pH de la pulpa, temperatura de secado, humedad final del fardo.

Para poder evaluar el efecto de estas variables se utilizó un diseño completamente al azar, con un arreglo factorial analizada en forma independiente por cada variable continua utilizada, esto significa que se va a medir varios factores sobre las mismas variables dependientes.

Se utiliza como herramienta de análisis “el análisis de varianza” (ANOVA) el cual permite evaluar la variación que existe entre las medias de los distintos tratamientos y además se logra encontrar si existen diferencias significativas entre los tratamientos a un 95% de confianza.

Para conocer donde se encuentran estas diferencias se aplica el test de DAM.

A continuación se demuestran los distintos tratamientos efectuados para cada variable

Tabla 4. Tratamientos utilizados para el secado de la pulpa en estufa en función del tiempo y diferente temperatura de secado

Tratamientos	Temperatura °C	tiempo secado min
euca120	120	61
euca140	140	45
euca160	160	31
euca180	180	20
euca200	200	12

Tabla 5. Tratamientos utilizados para el secado de la pulpa en estufa en función del pH de la pulpa y temperatura de secado a 120 ° C y 200 ° C respectivamente

Tratamientos	Temperatura °C	pH	Tratamientos	Temperatura °C	pH
eucaPh1	120	4,0	eucaPh1	200	4,0
eucaPh2	120	5,0	eucaPh2	200	5,0
eucaPh3	120	6,0	eucaPh3	200	6,0
eucaPh4	120	7,0	eucaPh4	200	7,0
eucaPh5	120	8,0	eucaPh5	200	8,0

Tabla 6. Tratamientos utilizados para el secado de la pulpa en estufa en función del contenido de seco final a temperatura de secado de 120°C y 200°C

Tratamiento	Temperatura °C	%Seco	Tratamientos	Temperatura °C	%Seco
eucaseco1	120	76,0	eucaseco1	200	76,0
eucaseco2	120	79,0	eucaseco2	200	79,0
eucaseco3	120	82,0	eucaseco3	200	82,0
eucaseco4	120	85,0	eucaseco4	200	85,0
eucaseco5	120	88,0	eucaseco5	200	88,0

4.8 Optimización

En esta etapa sobre la base de datos que se obtuvo de los experimentos realizados según el diseño experimental simple se determinaron las condiciones óptimas de secado que maximizan las propiedades físico-mecánicas, propiedades ópticas y sus efectos en las propiedades biométricas de las fibras en cualquiera de los dos casos. Las variables estudiadas son temperatura de secado (tasa de evaporación), pH de la pulpa y seco final, estos se variaron en tres niveles.

Para definir el número de combinaciones a realizar y el modelo a utilizar para el análisis de la información se seleccionó el método BOX-BEHNKEN, que consiste en un diseño optimizado de análisis multivariable. En base a este diseño se obtuvo el número de combinaciones. Los valores estudiados para cada variable, unidad se muestran en Tabla 3.2-1 y gráficamente en figura 3.2-1.

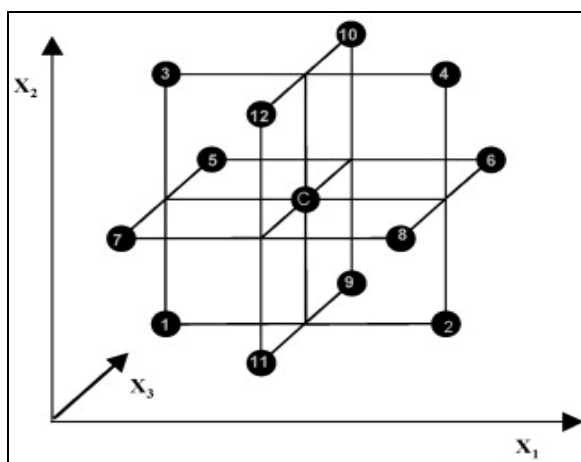


Fig.15. Distribución gráfica del modelo BOX-BEHNKEN (FERREIRA, 2007) utilizado para el diseño de los distintos tratamientos de la pulpa

Tabla 7. Número de experiencias realizadas en el laboratorio para secado de pulpa con dos variables, pH y T°; %seco final y T° con temperaturas de secado en estufa de 120°C, 160°C y 200°C. (Software utilizado: MODE 9)

Exp No	Exp Name	Run Order	Incl/Excl	Tem	pH
1	N1	4	Incl	120	4,5
2	N2	10	Incl	200	4,5
3	N3	3	Incl	120	8,0
4	N4	11	Incl	200	8,0
5	N5	7	Incl	120	6,25
6	N6	1	Incl	200	6,25
7	N7	5	Incl	160	4,5
8	N8	9	Incl	160	8,0
9	N9	2	Incl	160	6,25
10	N10	6	Incl	160	6,25
11	N11	8	Incl	160	6,25

Exp No	Exp Name	Run Order	Incl/Excl	Temp	seco
1	N1	5	Incl	120	76
2	N2	8	Incl	200	76
3	N3	3	Incl	120	88
4	N4	4	Incl	200	88
5	N5	9	Incl	120	82
6	N6	10	Incl	200	82
7	N7	11	Incl	160	76
8	N8	7	Incl	160	88
9	N9	6	Incl	160	82
10	N10	1	Incl	160	82
11	N11	2	Incl	160	82

Tabla 8. Número de experiencias realizadas en el laboratorio para secado de pulpa con tres variables, pH y %seco final y con dos variables T° y %seco final con temperaturas de secado en estufa de 120°C, 160°C y 200°C. (Software utilizado: MODE 9).

Run Order	Incl/Excl	pH	Temp	SECO
2	Incl	4,5	120	82
3	Incl	8,0	120	82
4	Incl	4,5	200	82
13	Incl	8,0	200	82
1	Incl	4,5	160	76
6	Incl	8,0	160	76
8	Incl	4,5	160	88
9	Incl	8,0	160	88
11	Incl	6,25	120	76
10	Incl	6,25	200	76
7	Incl	6,25	120	88
5	Incl	6,25	200	88
12	Incl	6,25	160	82
15	Incl	6,25	160	82
14	Incl	6,25	160	82

Exp	Exp Name	Run	Incl/Exc	Temp	Seco
1	N1	5	Incl	120	76
2	N2	8	Incl	200	76
3	N3	3	Incl	120	88
4	N4	4	Incl	200	88
5	N5	9	Incl	120	82
6	N6	10	Incl	200	82
7	N7	11	Incl	160	76
8	N8	7	Incl	160	88
9	N9	6	Incl	160	82
10	N10	1	Incl	160	82
11	N11	2	Incl	160	82

5. RESULTADOS Y DISCUSION

5.1 Resultados: “Efectos de la Temperatura de Secado Sobre las Propiedades de la Pulpa a Ph 4.5.”

5.1.1 Efectos de la Temperatura Sobre las Propiedades Físico-Mecánicas

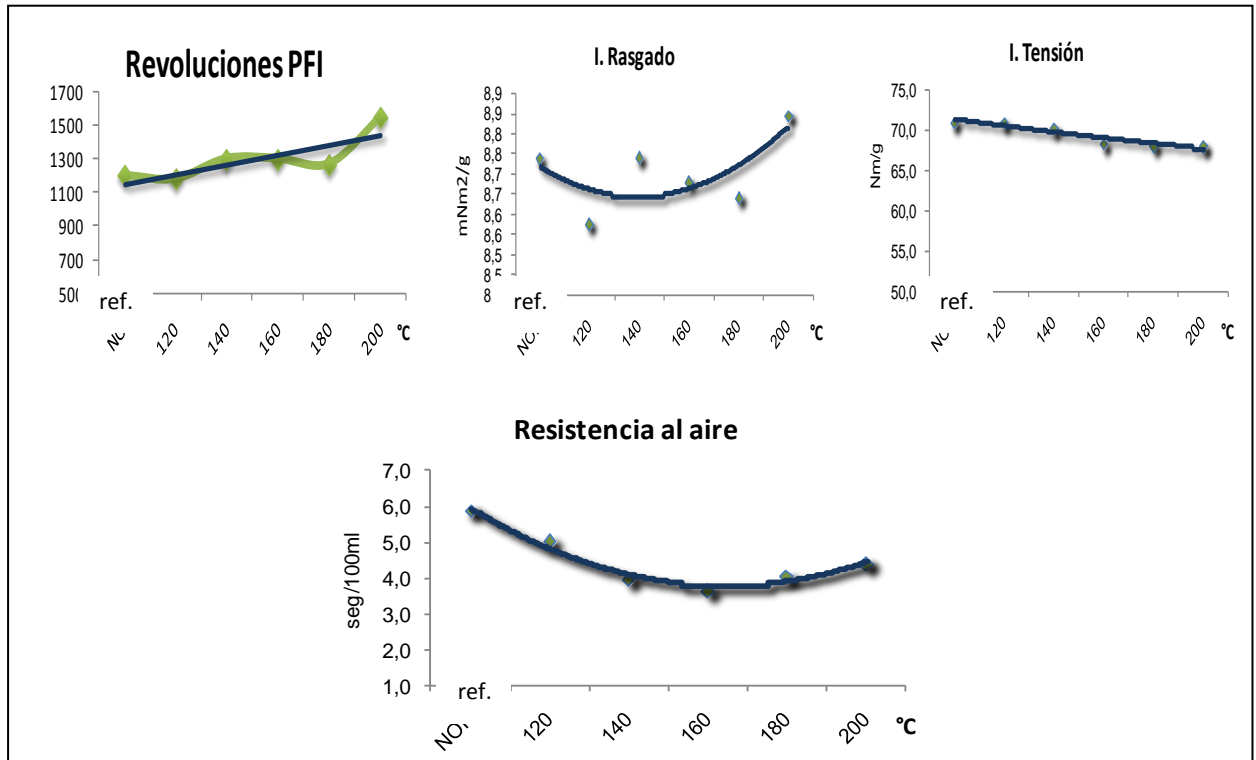


Fig.16. Tendencia de las propiedades físico mecánicas de la pulpa, al ser secadas a la estufa a distintas temperaturas en comparación con la pulpa never dried (ref. en el gráfico) ambas comparaciones en condiciones de refinación a 30°SR.

Respecto a las Fig.16, se ve una clara tendencia que tiene el efecto de las altas temperaturas sobre la refinación mostrando una tendencia alta en las RPM, en la medida que la pulpa se seca con mayor temperatura (proceso de hornificación más drástico).

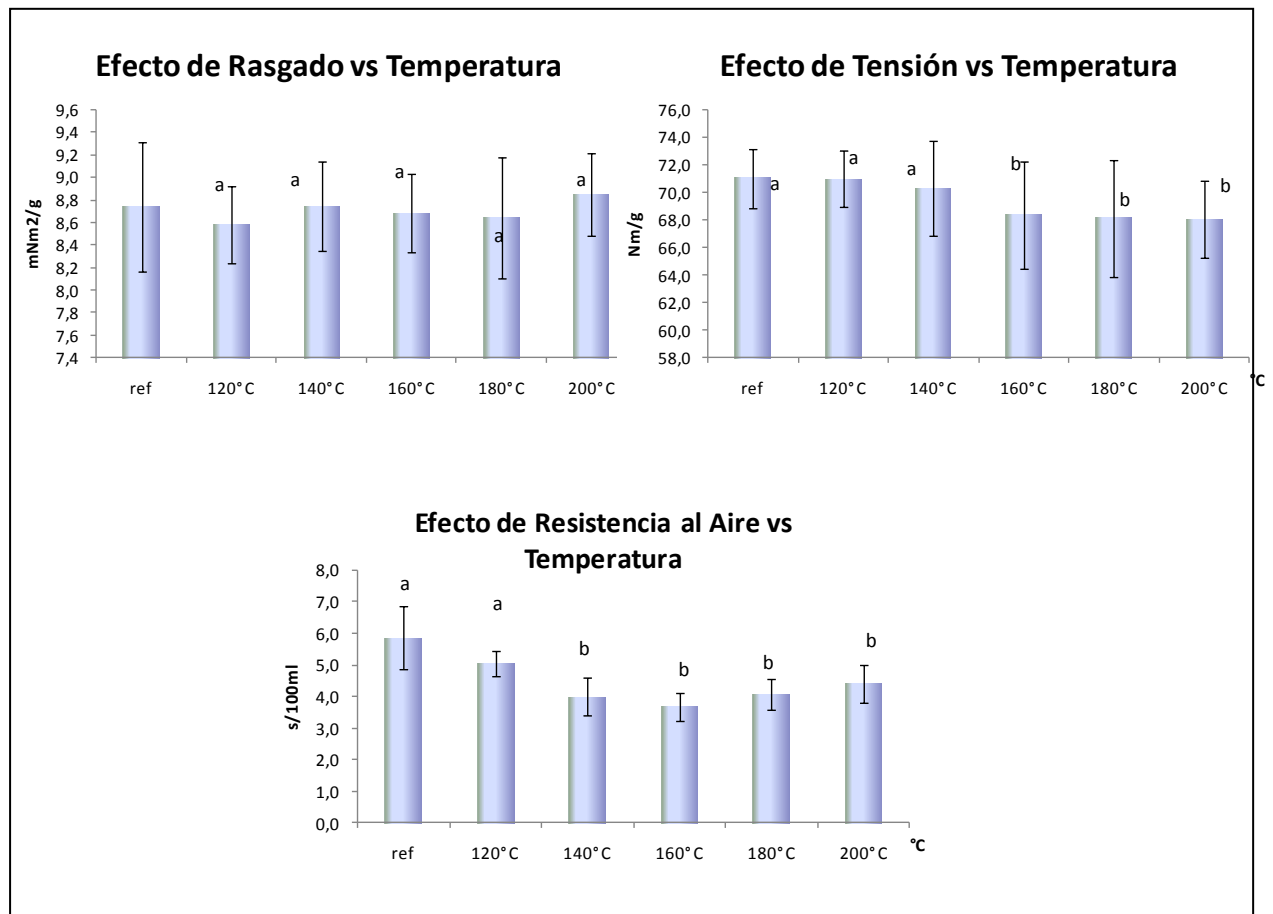


Fig. 17 Comparación entre los distintos tratamientos de temperatura de secado para tres evaluaciones efectuadas de propiedades físico mecánicas a la pulpa dado un pH constante de la pulpa. Las letras distintas muestran las diferencias significativas entre los tratamientos a un 95% de significancia con un test ANOVA ($P < 0,05\%$) y aplicando un test de DAM. Las barras con letras iguales significan que no hay diferencias entre esos tratamientos

Para el rasgado los resultados muestran que no existen diferencias significativas entre los tratamientos aplicados de temperatura en la variable dependiente observando que no existe influencia entre utilizar un tipo de temperatura u otro en los resultados. Para este tratamiento se utilizaron 10 repeticiones un control y 5 tratamientos aplicados (temperaturas) obteniendo un total de 48 observaciones.

Para la tensión y permeabilidad al aire, los resultados muestran que existen diferencias significativas entre los tratamientos aplicados de temperatura en la variable dependiente, observando que existe influencia entre utilizar un tipo de temperatura u otro en los resultados de esta dos variables donde el valor de $P < 0,05$. Para este tratamiento se utilizaron 10 repeticiones un control y 5 tratamientos aplicados (temperatura) obtenido un total de 48 observaciones para cada una.

5.1.2 Efectos de la Temperatura Sobre las Propiedades Ópticas y el WRV

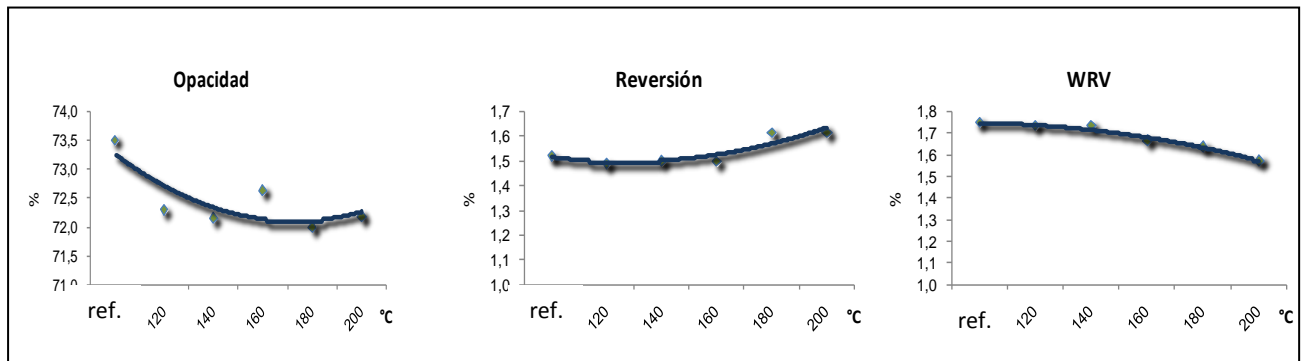


Fig.18 Tendencia de las propiedades ópticas de la pulpa y el WRV, al ser secadas a la estufa a distintas temperaturas en comparación con la pulpa never dried (ref. en el gráfico) ambas comparaciones en condiciones de refinación a 30°SR.

Respecto a las Fig. 18, las tendencias mostradas en los gráficos refuerzan el concepto que a mayor temperatura de secado el proceso de hornificación de la fibra genera mayor reversión, la opacidad cae por el colapsamiento de ella y cae también la capacidad de hidratación medida como % WRV.

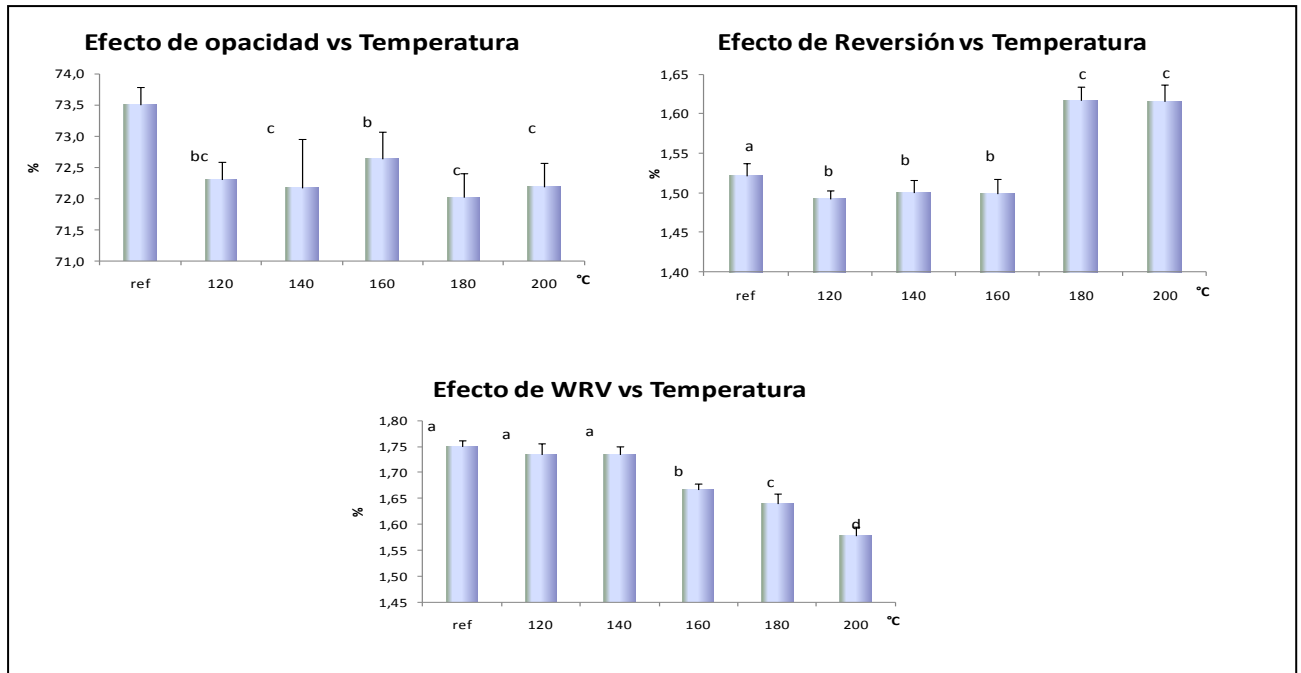
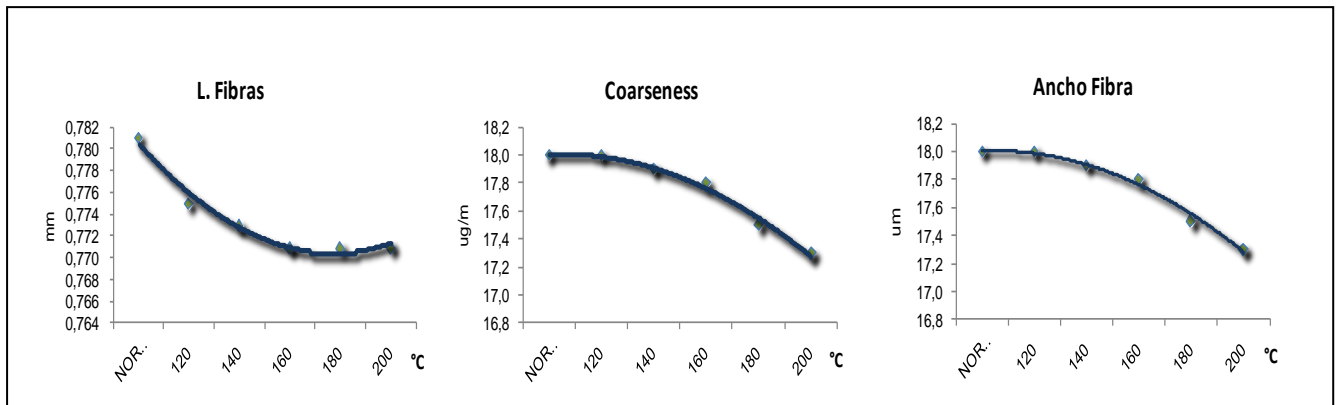


Fig. 19 Comparación entre los distintos tratamientos de temperatura de secado para tres evaluaciones efectuadas de propiedades ópticas a la pulpa dado un pH constante de la pulpa: opacidad, reversión blancura y WRV. Las letras distintas muestran las diferencia significativas entre los tratamiento a un 95% de significancia con un test ANOVA ($P < 0,05\%$) y aplicando un test de DAM. Las letras iguales implican que no hay diferencias entre esos tratamientos.

En la figura 19 están representados los distintos tratamientos y los efectos en la opacidad, reversión de blancura y WRV: Los resultados muestran que existen diferencias significativas entre los tratamientos aplicados de temperatura en las variable dependientes monitoreadas, observando que existe influencia entre utilizar un tipo de temperatura u otro en los resultados de esta dos variables donde el valor de $P < 0,05$. Para este tratamiento se utilizaron 10 repeticiones un control y 5 tratamientos aplicados (temperatura) obtenido un total de 48 observaciones para cada una.

5.1.3 Efectos de la Temperatura Sobre las Propiedades Biométricas



Figs.20 Tendencia de los cambios estructurales de las fibras que son alteradas debido a los distintos tratamientos efectuados en el proceso de secado con distintas temperaturas a un pH constante de la pulpa.

Comentarios Generales del Comportamiento de la Pulpas Never Dried y Secadas a Diferentes Temperaturas de Secado, Refinadas a 30°Sr.

Se observa al comparar las propiedades obtenidas en una pulpa never dried con una pulpa once dried que el secado afecta las propiedades de la pulpa. En este caso los valores físico-mecánicos por efectos de la mayor temperatura de secado (hornificación más drástica) existe una tendencia a disminuir respecto de la pulpa never dried y el mayor efecto se ve en la carga de ruptura y por lo que sabemos la cantidad y calidad de unión de las fibras es el factor más importante entre los que afectan esta propiedad por lo tanto es esta condición la que se ve alterada por efectos del secado. La hornificación genera deformaciones estructurales en la fibra que con el proceso de hidratación no recupera la flexibilidad original y queda demostrado además que la refinación no logra reabrir las uniones micros fibrilares que se generan, ni las compactaciones de la fibra producto del prensado y secado.

La porosidad cae en forma importante en la medida que el secado se hace a mayor temperatura se logra conseguir un poco mas de volumen debido a que la hidratación y posterior refinación logran en parte reactivar la estructura original de la fibra, tiende aumentar los macroporos por esto hay mayor hidratación, esto tiende a mejorar una mayor opacidad.

Queda claro el efecto de la hornificación sobre las RPM ó refinabilidad; aumenta debido a la pérdida de hidratación o hinchamiento de la fibra, medida en el

WRV en la que se ve que a mayor temperatura los valores bajan. En las propiedades biométricas se ve un cambio dimensional de las fibras en la medida que aumenta la temperatura indicadas en las figuras anteriores. La fibra acorta en longitud, se contrae en el ancho, y aumenta el coarseness producto del cambio estructural de la fibra, y al ser el proceso de refinación menos flexible, se tiende a generar más ruptura fibrilar (quiebres).

5.2 Resultados: “Efectos de la Temperatura de Secado Sobre las Propiedades de la Pulpa Ajustada a Diferentes Ph de la Suspensión de Fibra”

5.2.1 Efectos de la Temperatura de Secado a Distintos Ph de la Pulpa en las Propiedades Físico-Mecánicas.

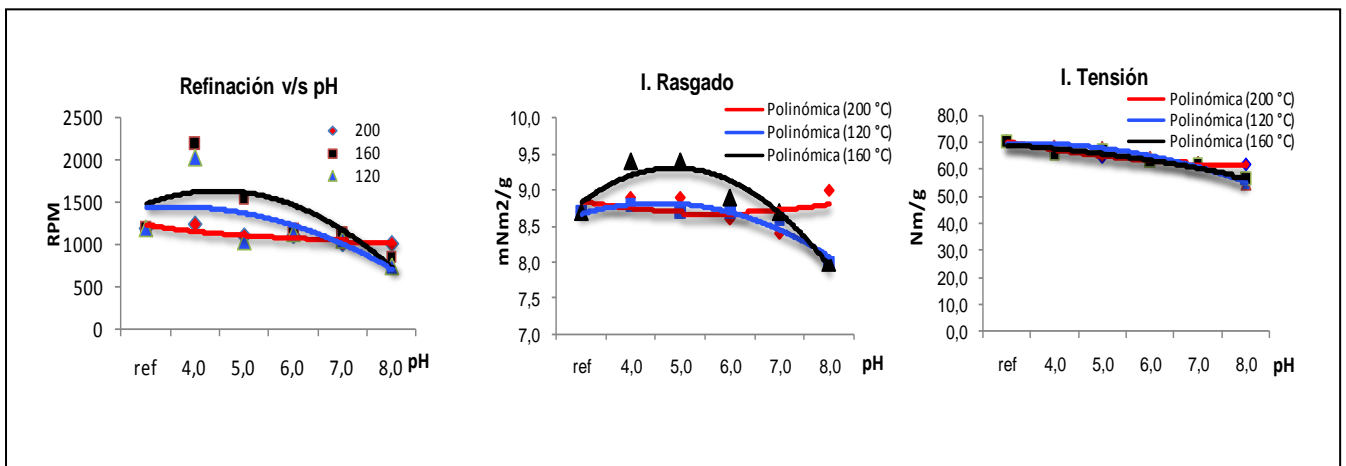


Fig.21 Tendencia de las propiedades físico-mecánicas de la pulpa, al ser secadas a la estufa a distintas temperaturas y a distintos rangos pH en comparación con la pulpa never dried (ref. en el gráfico) ambas comparaciones en condiciones de refinación a 30°SR.

Respecto a las Figs. 21 Se ve una clara tendencia que tiene el efecto de refinar la pulpa en condiciones alcalinas y el efecto final en las propiedades físicas mecánicas, observando que en un medio ácido y alta temperatura la fibra caen en forma importante las propiedades mecánicas intrínsecas.

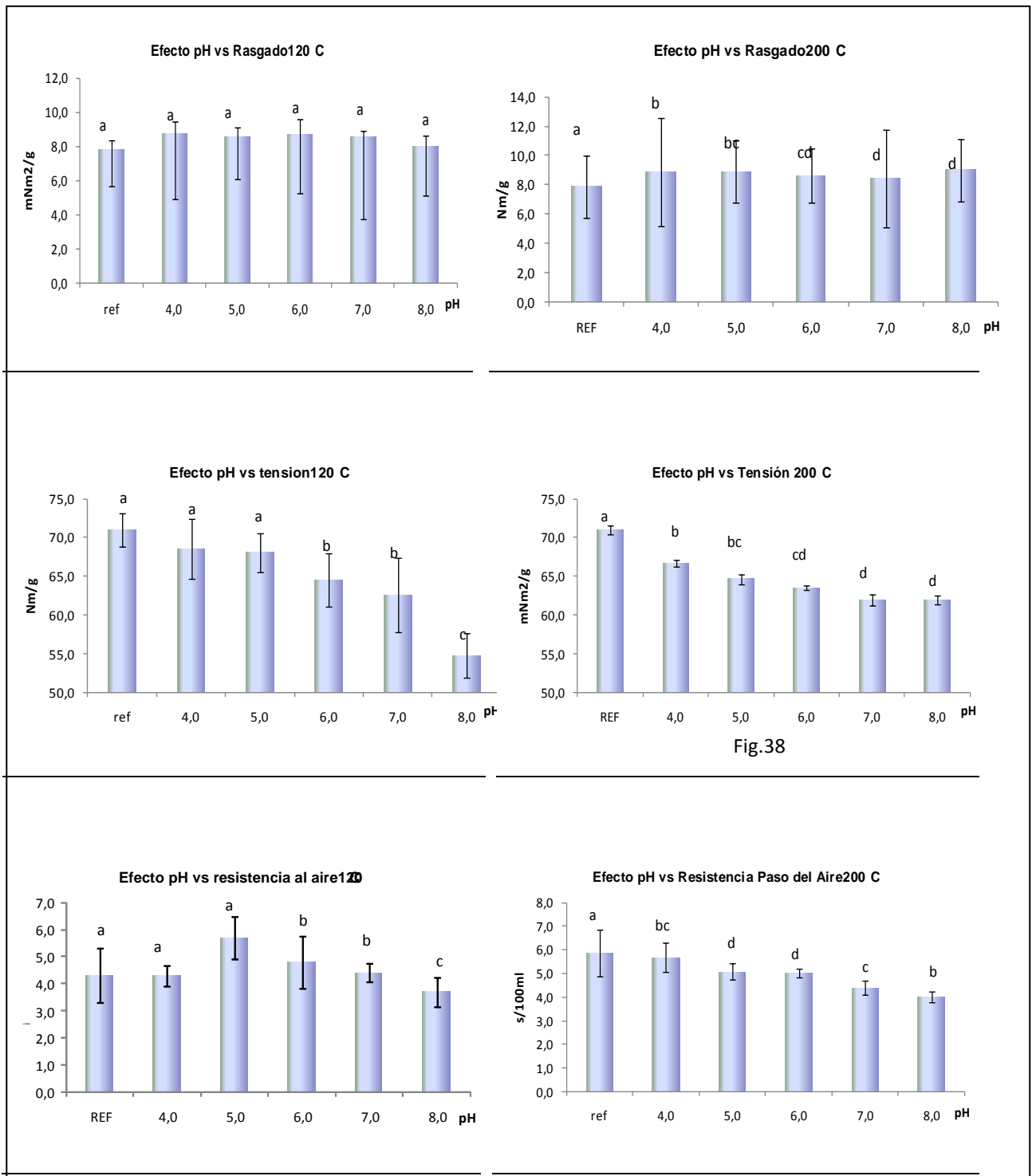


Fig.38

Fig. 22 Comparación entre los distintos tratamientos de pH de la pulpa para tres evaluaciones efectuadas de propiedades físico mecánicas a la pulpa dado una temperatura de secado de 120°C y 200°C respectivamente. Las letras distintas muestran las diferencias significativas entre los tratamientos a un 95% de significancia con un test ANOVA ($P < 0,05\%$) y aplicando un test de DAM. Las letras iguales implican que no hay diferencias entre esos tratamientos.

Para el rasgado los resultados muestran que no existen diferencias significativas entre los tratamientos aplicados de distintos pH de la pulpa en la variable dependiente observando que no existe influencia al utilizar una temperatura de secado de 120°C, sin embargo si esta temperatura de secado sube a 200°C, si existen diferencias significativas utilizar un tipo de pH de la pulpa u otro en los resultados. Para este tratamiento se utilizaron 10 repeticiones un control y 5 tratamientos aplicados (temperaturas) obteniendo un total de 48 observaciones.

Para la tensión y permeabilidad al aire, los resultados muestran que existen diferencias significativas entre los tratamientos aplicados con temperaturas de secado de 120°C y 200°C en las dos variables dependientes, observando que existe influencia entre utilizar un tipo de pH de la pulpa u otro en los resultados. Para este tratamiento se utilizaron 10 repeticiones un control y 5 tratamientos aplicados (pH) obteniendo un total de 48 observaciones para cada una.

5.2.2 Efectos de la Temperatura de Secado a Distintos Ph de la Pulpa en las Propiedades Ópticas y el WRV.

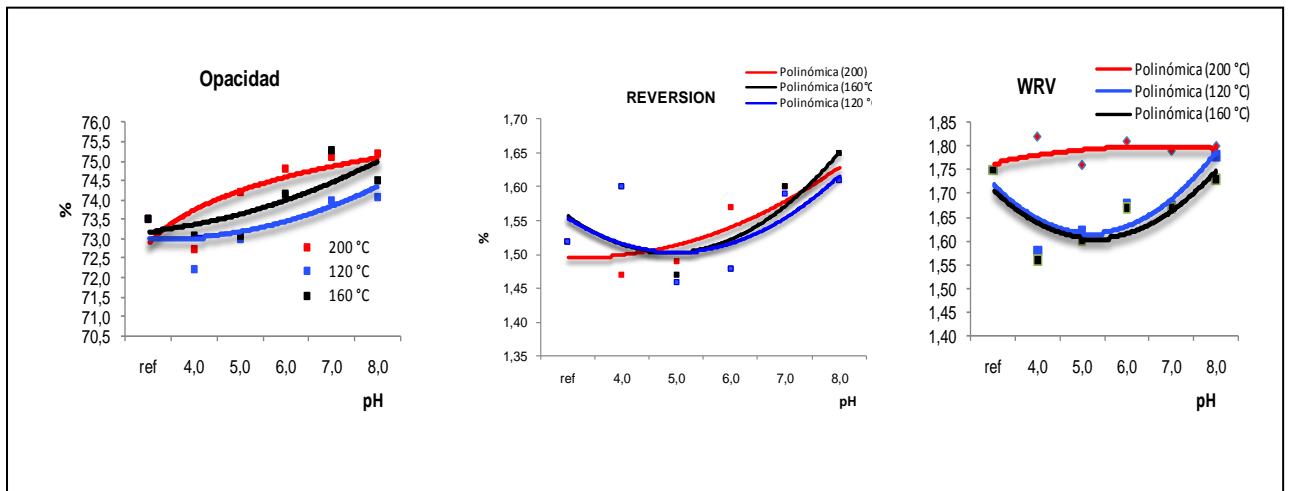
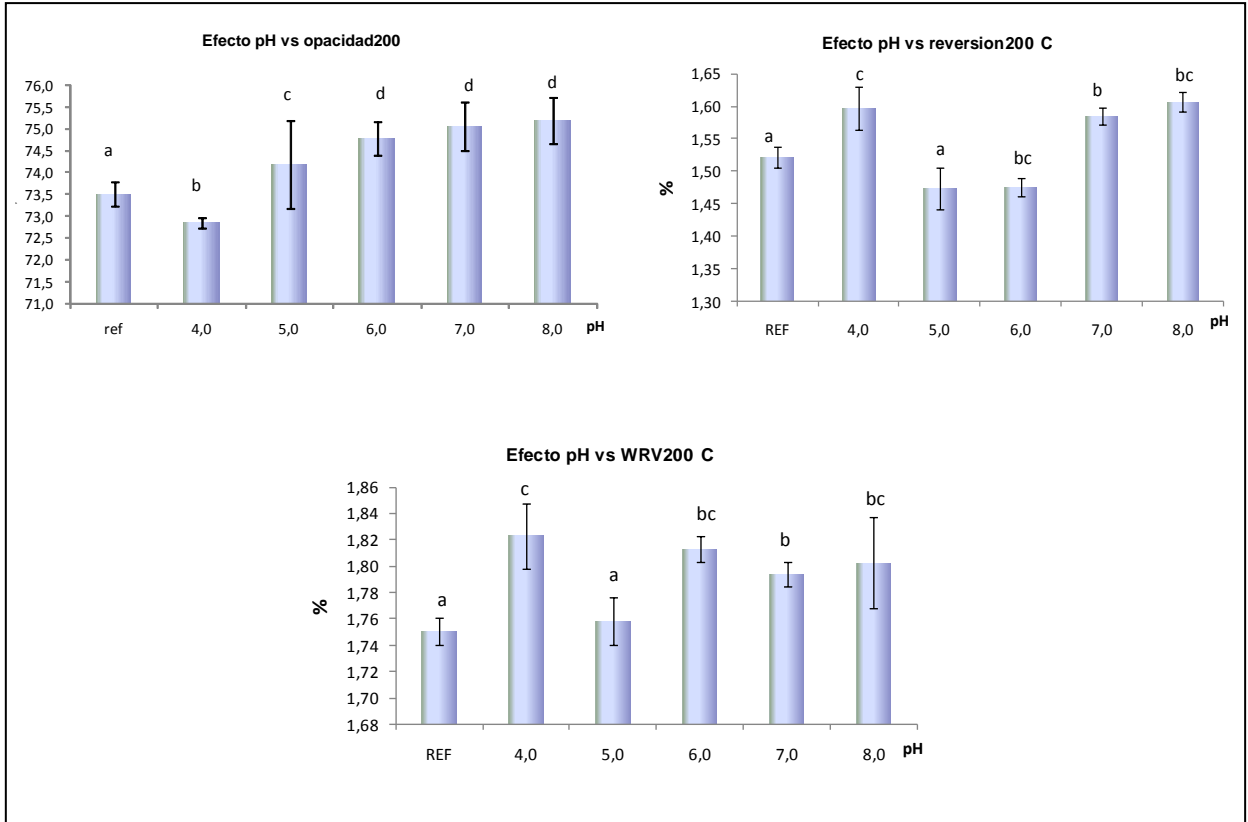


Fig.23 Tendencia de las propiedades ópticas de la pulpa y el WRV, al ser secadas a la estufa a distintas temperaturas y a distintos rangos de pH en comparación con la pulpa never dried (ref. en el gráfico) ambas comparaciones en condiciones de refinación a 30°SR.

Respecto a las Fig. 23, las observaciones indican que la opacidad es mejor con pulpas alcalinas, mientras que la reversión de blancura y el WRV presentan una tendencia alta hacia los extremos del pH de la pulpa tanto ácido como alcalino, dando una idea que la pulpa en su estado neutro se obtendrían los mejores resultados.

Las observaciones no indican alteraciones importantes al usar uno u otra temperatura de secado.



Figs. 24 Comparación entre los distintos tratamientos de pH de la pulpa para tres evaluaciones efectuadas de propiedades ópticas a la pulpa dado una temperatura de secado de 120°C y 200°C respectivamente: opacidad, reversión blanca y WRV. Las letras distintas muestran las diferencias significativas entre los tratamientos a un 95% de significancia con un test ANOVA ($P < 0,05\%$) y aplicando un test de DAM. Las letras iguales implican que no existen diferencias entre esos tratamientos.

Para la opacidad, reversión de blancura y WRV, los resultados muestran que existen diferencias significativas entre los tratamientos aplicados para los distintos pH de la pulpa utilizados en las variables dependientes monitoreadas, observando que existe influencia entre utilizar un tipo de pH u otro en los resultados. Para este tratamiento se utilizaron 10 repeticiones un control y 5 tratamientos aplicados (temperatura) obtenido un total de 48 observaciones para cada una.

5.2.3 Efectos de la Temperatura de Secado a Distintos Ph de la Pulpa en las Propiedades Biométricas.

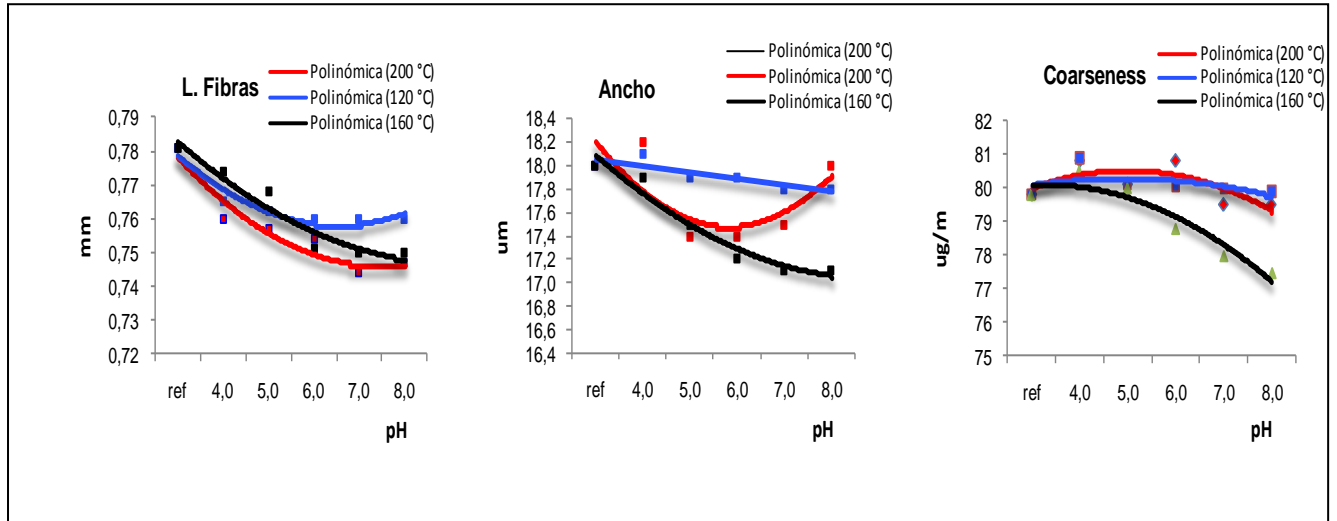


Fig. 25 Comparación de los cambios estructurales de las fibras que son alteradas debido a los distintos tratamientos de pH de la pulpa efectuados en el proceso de secado con temperaturas de 120°C y 200°C respectivamente.

Comentarios Generales del Comportamiento de la Pulpa Never Dried y Once Dried a Diferentes Ph con Temperaturas de Secado de 120°C Y 200°C Respectivamente, Refinadas a 30°SR.

La segunda experiencia, consistió en modificar las condiciones de pH de la pulpa y verificar sus propiedades a dos temperaturas de secado.

Se observa que la mejor condición de refinabilidad se da a mayor pH de la pulpa, esto debido a la mayor retención de agua interna lo que asegura una mayor flexibilidad de la fibra y una mejor y más fácil fibrilación de la fibra. El índice de rasgado sobre pH 5.5 no se ve un efecto diferenciador con la temperatura de secado y el pH de la hoja, por el contrario se ve que a mayor pH (mayor retención de agua interna de la fibra) en la combinación de mayor temperatura a no se logra incrementar los valores de tensión al mismo °SR debido a que es más fácil refinar la fibra (esta más blanda) o sea tiene mayor capacidad de refinabilidad, los °SR se obtienen más fácilmente cambiando la relación rasgado-rotura para ese grado de refinabilidad

El freeness con la pulpa never-dried sube en la medida que sube el pH, para un grado de refinabilidad dado, esto significa que a menor pH se daña mas la fibra (mas fibrilación o finos) que a mayor pH, por eso el freeness aumenta en este último

caso. El efecto de la pulpa secada (once dried) el freeness cae hasta pH 7,0 y después no existe diferencia a diferentes temperaturas de secados.

5.3 Resultados: “Efectos de Sobre las Propiedades de la Pulpa Ajustada a Diferentes Secos”

5.3.1 Efecto de la Pulpa Secada a Diferentes Secos Finales Sobre las Propiedades Físico-Mecánicas.

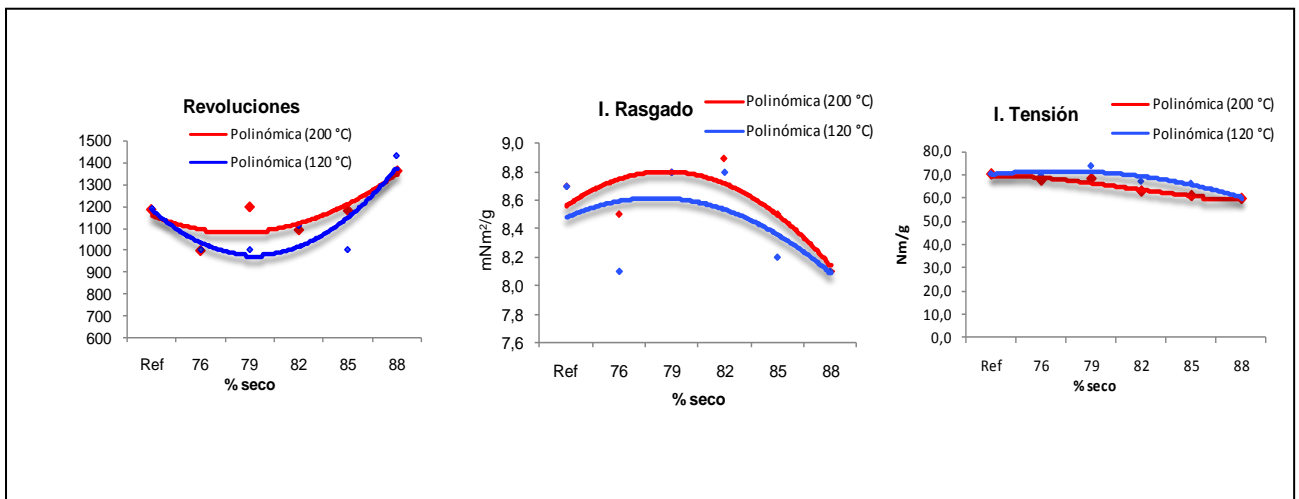
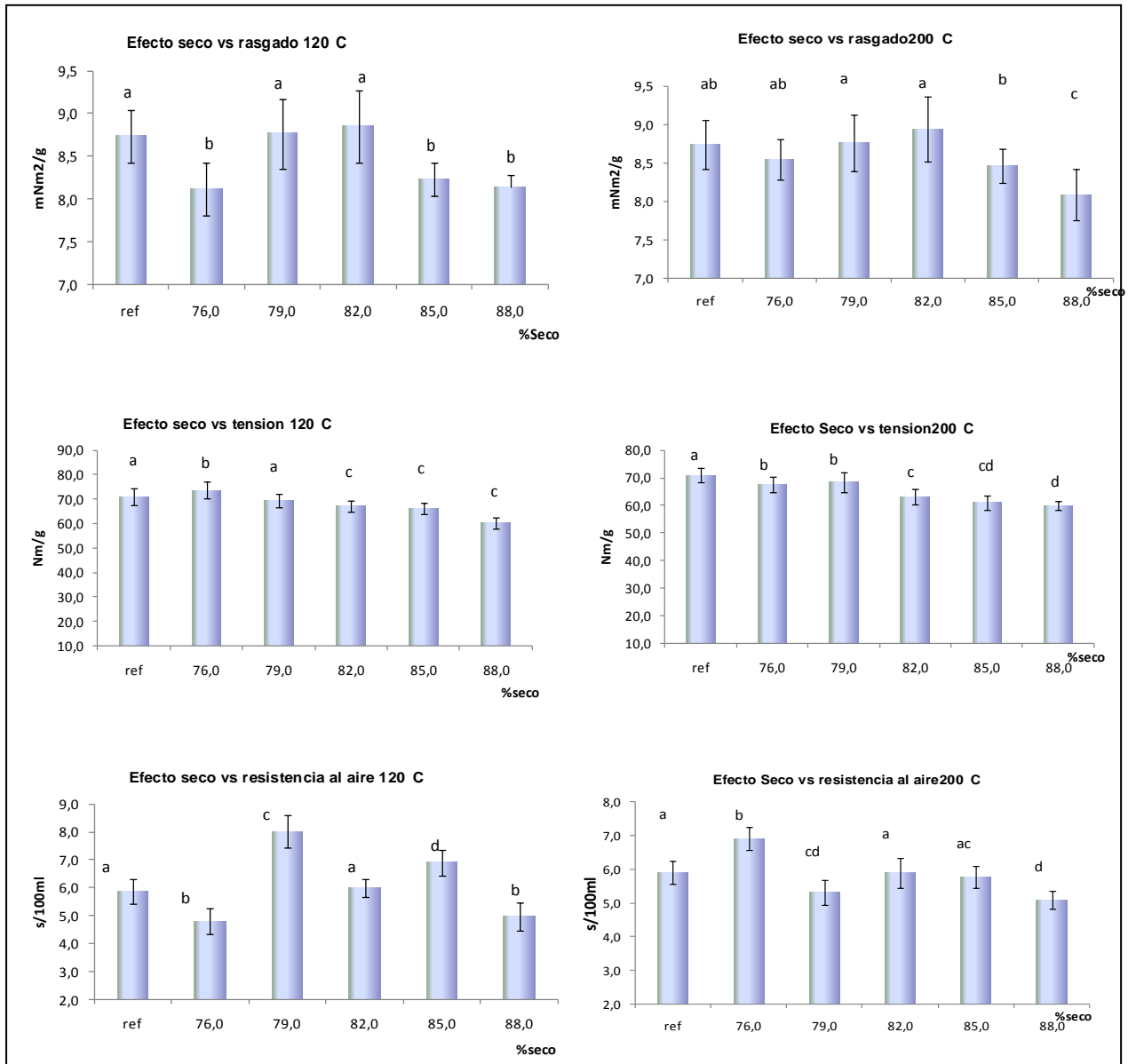


Fig.26 Tendencia de las propiedades físico mecánicas de la pulpa, al ser secadas a la estufa a distintas temperaturas y a distintos contenidos de seco final, en comparación con la pulpa never dried (ref. en el gráfico) ambas comparaciones en condiciones de refinación a 30°SR.

Respecto a las Fig. 26, se observa que la tendencia es a aumentar las RPM en la medida que secamos mas la pulpa y es mayor esta tendencia en la medida que se aumenta la temperatura de secado (proceso de hornificación más drástico), lo mismo sucede con el índice de rasgado y el índice de tensión.



Figs.27 Comparación entre los distintos tratamientos de secado de la pulpa para tres evaluaciones efectuadas de propiedades físico mecánicas dado una temperatura de secado de 120°C y 200°C respectivamente. Las letras distintas muestran las diferencias significativas entre los tratamientos a un 95% de significancia con un test ANOVA (P<0,05%) y aplicando un test de DAM. Las letras iguales implican que no hay diferencias entre esos tratamientos.

Llevando a cabo una comparación entre el rasgado, la tensión y permeabilidad al aire, los resultados muestran que existen diferencias significativas entre los tratamientos aplicados para los distintos secos finales ya sea a la temperatura de secado de 120°C como a las 200°C en la variables dependientes analizadas, observando que existe influencia entre utilizar un tipo de seco u otro en los resultados de

estas tres variables. Para este tratamiento se utilizaron 10 repeticiones un control y 5 tratamientos aplicados (temperatura) obtenido un total de 48 observaciones para cada una. Esto nos lleva a la conclusión final que el porcentaje de seco final influye en estas propiedades lo que resulta muy ventajoso analizarlos dado el efecto en el ahorro de energía que puede considerarse.

5.3.2 Efecto de la Pulpa Secada a Diferentes Secos Finales Sobre las Propiedades Ópticas y el WRV.

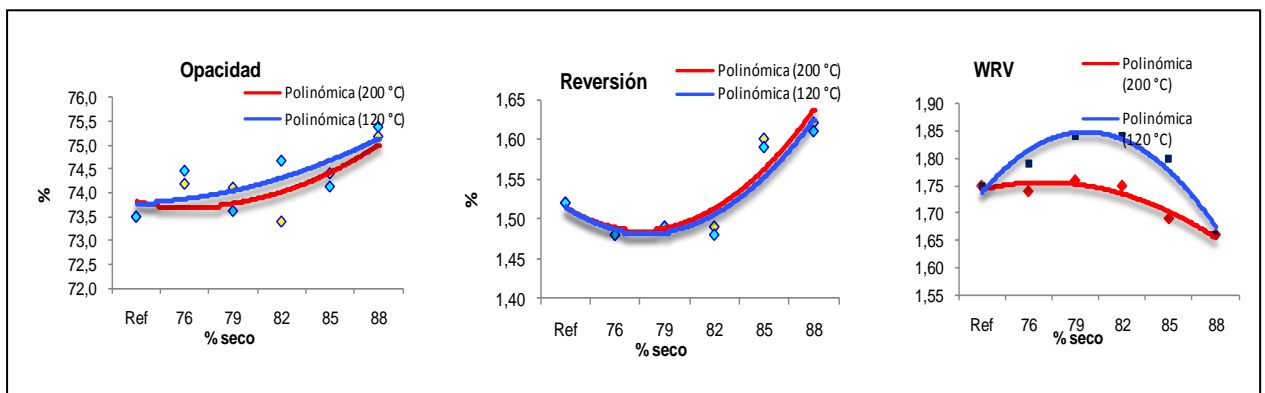


Fig.28 Tendencia de las propiedades ópticas de la pulpa y el WRV, al ser secadas a la estufa a distintas temperaturas y a distintos rangos de seco final en comparación con la pulpa never dried (ref. en el gráfico) ambas comparaciones en condiciones de refinación a 30°SR.

Respecto a la Fig. 28, Las observaciones indican que la opacidad y la reversión de blancura suben cuando sube el seco final, mientras que el WRV presentan una tendencia a caer con el seco final más alto. Las observaciones no indican alteraciones importantes al usar uno u otra temperatura de secado excepto el WRV que en el rango de seco entre 79% y 82% a 120 °C se tiene un óptimo.

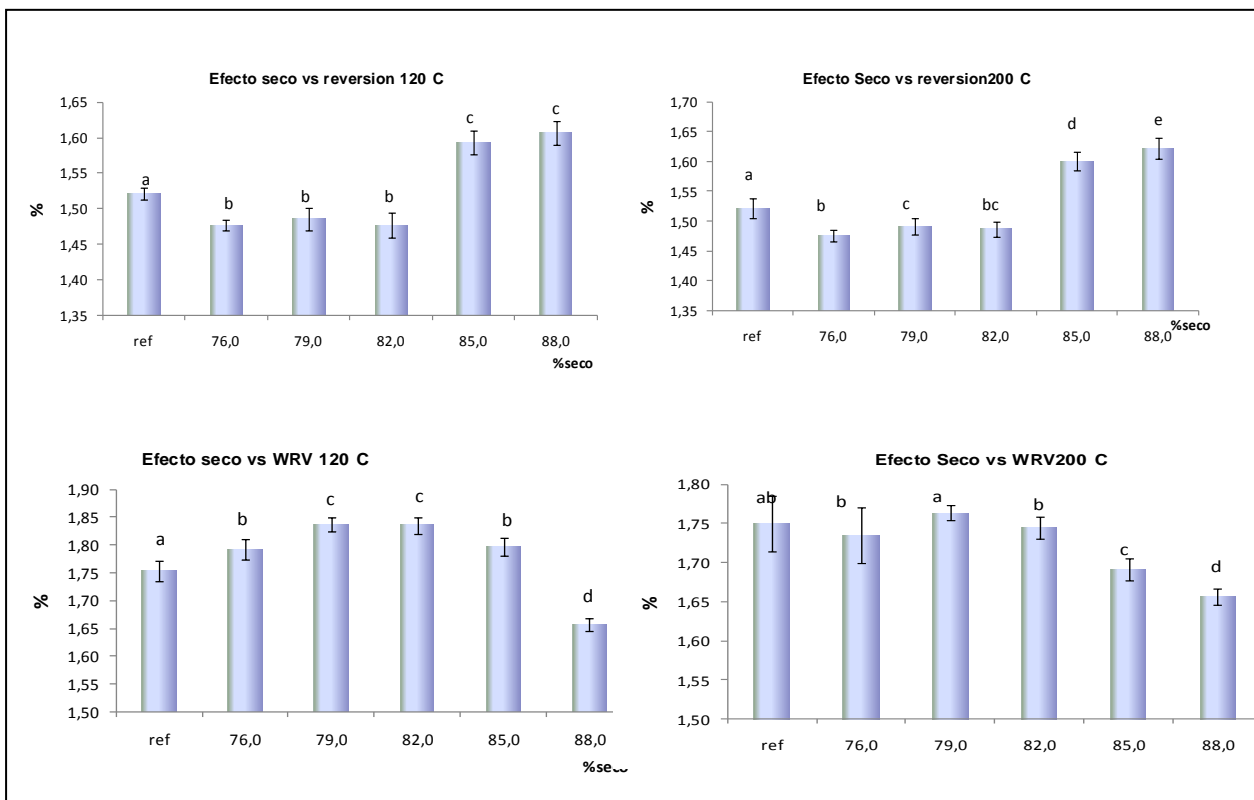


Fig. 29 Comparación entre los distintos tratamientos de secos finales para tres evaluaciones efectuadas de propiedades ópticas a la pulpa dado una temperatura de secado de 120°C y 200°C respectivamente: opacidad, reversión blancura y WRV. Las letras distintas muestran las diferencias significativas entre los tratamiento a un 95% de significancia con un test ANOVA ($P < 0,05\%$) y aplicando un test de DAM. Las letras iguales implican que no hay diferencias entre esos tratamientos.

Para la opacidad, reversión de blancura y WRV, los resultados muestran que existen diferencias significativas entre los tratamientos aplicados (distintos secos) en las variables dependientes monitoreadas, observando que existe influencia entre utilizar un tipo de seco u otro en los resultados. Para este tratamiento se utilizaron 10 repeticiones un control y 5 tratamientos aplicados (temperatura) obtenido un total de 48 observaciones para cada una.

5.3.3 Efecto de la Pulpa Secada a Diferentes Secos Finales Sobre las Propiedades Biométricas.

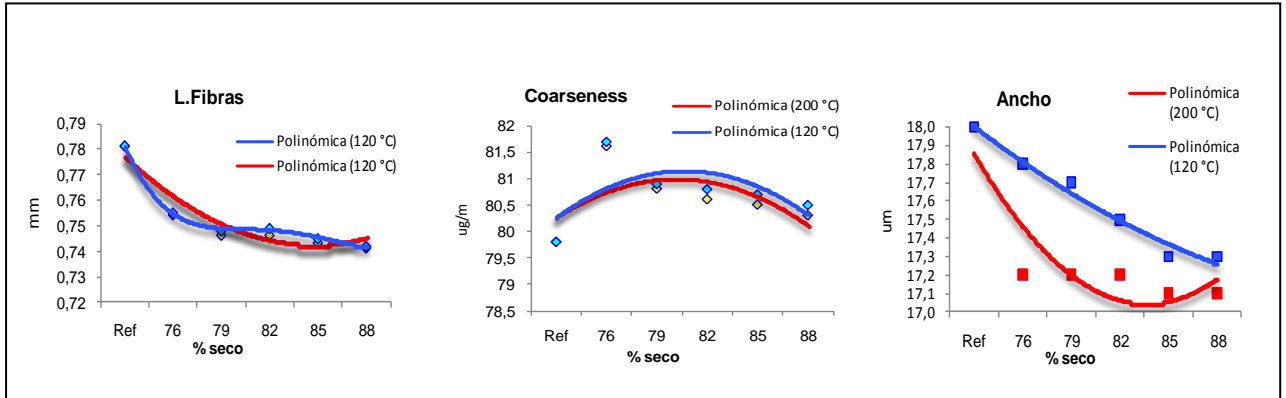


Fig. 30 Tendencia de los cambios estructurales de las fibras que son alteradas debido a los distintos tratamientos de seco final de la pulpa efectuados en el proceso de secado con temperaturas de 120°C y 200°C respectivamente.

Se observa que el cambio estructural de la fibra es drásticamente modificada en la medida que llevamos la pulpa al seco absoluto, independiente de la temperatura de secado utilizada.

5.4 OPTIMIZACIÓN

En función de los distintos tratamientos que se diseñaron para efectuar las experiencias en laboratorio con las variables temperatura del aire de secado de la estufa, pH de la pulpa y contenido de sequedad final y los datos obtenidos de las muestras de pulpa de resistencia, propiedades ópticas y biométricas, se aplicó el software MODE 9 para los efectos de predecir con esta información los mejores valores esperados de algunas propiedades de la pulpa en función de las tres variables estudiadas. Estos resultados son teóricos y no fueron verificados en el laboratorio.

5.4.1 Optimización de la Tensión

Optimo 1.- T: 120°C; pH: 4.6; valor tensión: 66.1 Nm/g

Optimo 2.- T: 140°C; pH: 5.0; valor tensión: 66.1 Nm/g

Investigation: Untitled-3- Tensión + pH (MLR)
Response Surface Plot

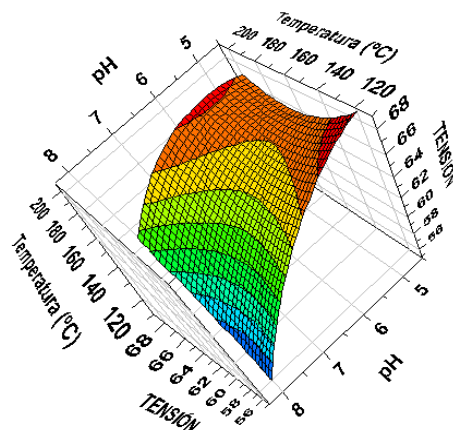


Fig. 31 Diseño predictivo para la estimación de optimización de la tensión en relación a la temperatura de secado y el pH. Estos dos modelos se deben verificar en el laboratorio.

5.4.2 Optimización de la Tensión

Optimo 1.- T: 121,3 °C; Seco: 76 %; valor tensión: 69.9 Nm/g

Investigation: Untitled-6-humedad-tensión (MLR)
Response Surface Plot

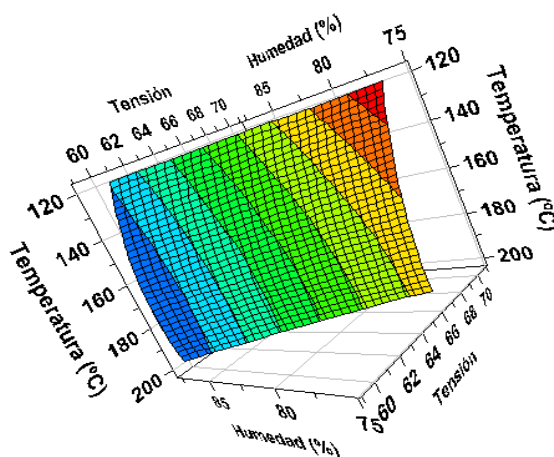


Fig. 32 Diseño predictivo para la estimación de optimización de la tensión en relación al contenido de seco de la pulpa. Este modelo se debe verificar en el laboratorio.

5.4.3 Optimización del Rasgado

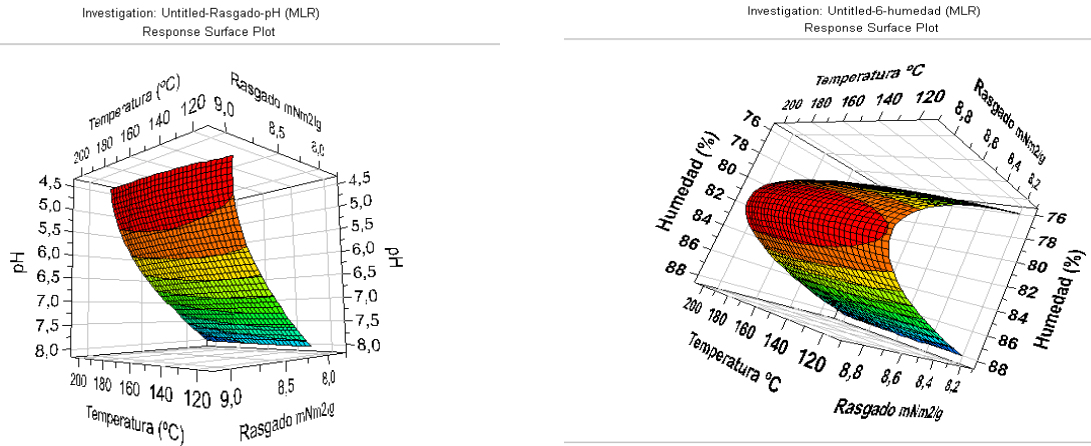


Fig. 33 Diseño predictivo para la estimación de optimización del rasgado en relación al contenido de seco de la pulpa y el pH. Estos dos modelos se deben verificar en el laboratorio.

La superficie de respuesta para el rasgado en función del pH el óptimo puede ser cualquier punto dentro de la zona roja. Tomando el punto central da como Temperatura óptima 157°C a pH=4,6, otro óptimo en la zona roja es a 140 °C y pH=5,0 Como se puede observar a mayor pH se debe disminuir la temperatura para obtener el máximo de Rasgado.

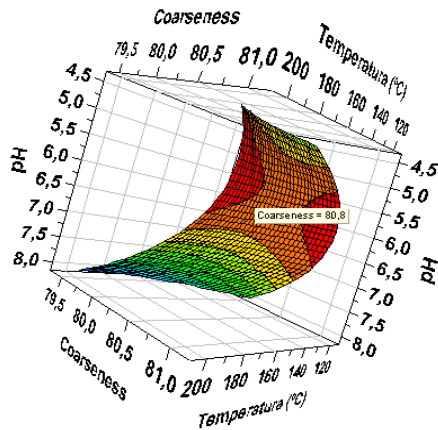
La superficie de respuesta para el rasgado en función de la humedad el óptimo puede ser cualquier punto dentro de la zona roja. Tomando el punto central da como Temperatura óptima 157,4°C a 81,6 de seco. Aquí se puede optimizar en cualquier punto entre 79-83 de seco y entre 158-200 °C. Lo ideal será hacer una matriz incorporando las tres variables, pH, Humedad y temperatura y evaluarlo en el laboratorio.

5.4.4 Optimización del Coarseness

Optimo 1.- T (°C) = 140; pH= 5.6; valor coarseness: 80.8 µg/m

Optimo 2.- T (°C) = 151; pH=6.0; valor coarseness: 80.5 µg/m

Investigation: Untitled-3- coarseness + pH (MLR)
Response Surface Plot



Investigation: Untitled-5- Coarseness + % Seco +pH +Temp. (MLR)
Response Surface Plot

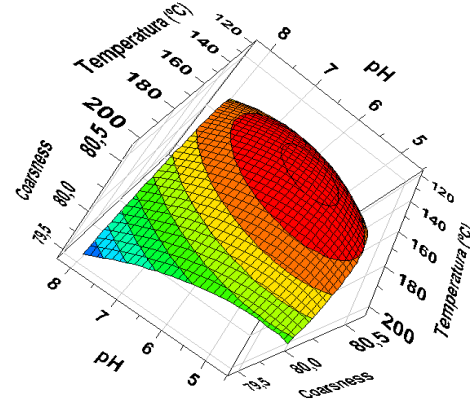


Fig. 34 Diseño predictivo para la estimación de optimización del coarseness en relación a la temperatura de secado y el pH. Estos dos modelos se deben verificar en el laboratorio.

5.4.5 Optimización del Ancho de Fibra

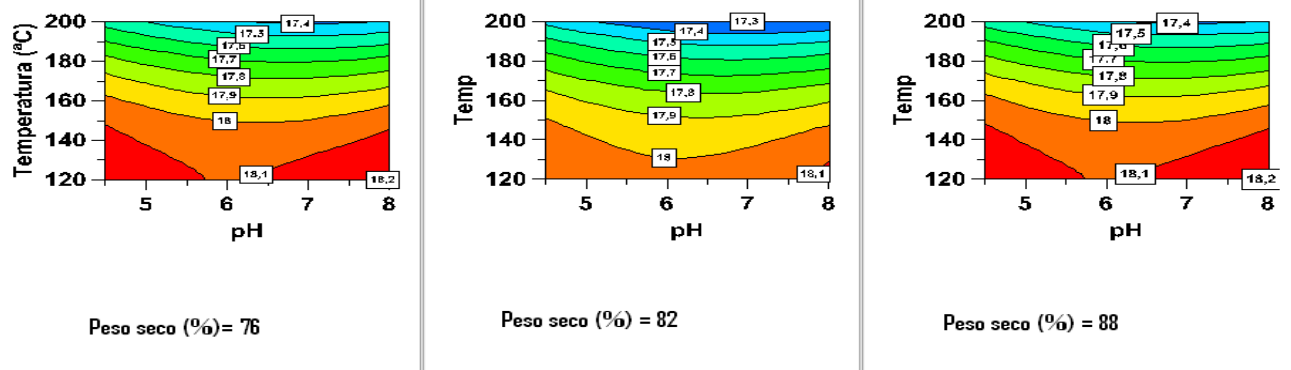


Fig. 35 Diseño predictivo para la estimación de optimización del ancho de fibra en relación a la temperatura de secado, el pH y contenido de seco final de la pulpa. Estos tres modelos se deben verificar en el laboratorio.

Aquí se puede escoger el óptimo que más acomode, dentro de las zonas rojas y /o anaranjadas, con distintos seco. El pH dentro del rango establecido no influye.

5.5 Resultados Experiencia Industrial: “Comportamiento de las Propiedades de una misma Pulpa Procesada en Dos Maquinas Secadoras Distintas”

Tabla 9 Análisis comparativo de pulpa seca industrialmente en dos maquinas secadoras distintas y comparadas en relación a la misma pulpa never dried. Todas refinadas a 30°SR.

	LINEA 1 (EUCALYPTUS)												
	REVOL. PFI	°SR	I. RASG. mNm ² /g	I. EXPL. kPan ² /g	I. TENS. Nm/g	POR. s/100ml	V.E cm ³ /g	OPAC. %	ELON. %	E TOTAL wh	E EFECTIVA wh	BLANCURA %	REVERSION
Never Dried	1116	30	8,8	4,7	78,3	6,8	1,48	70,4	3,35	17,0	13,1	87,9	3,6
Secadora 2	1300	30	8,8	4,3	71,3	8,5	1,5	71,1	3,29	16,5	14,5	88,2	3
Secadora 1	1887	30	9,0	4,2	72,6	4,8	1,53	71,3	3,21	20,0	16,0	89,3	3,4

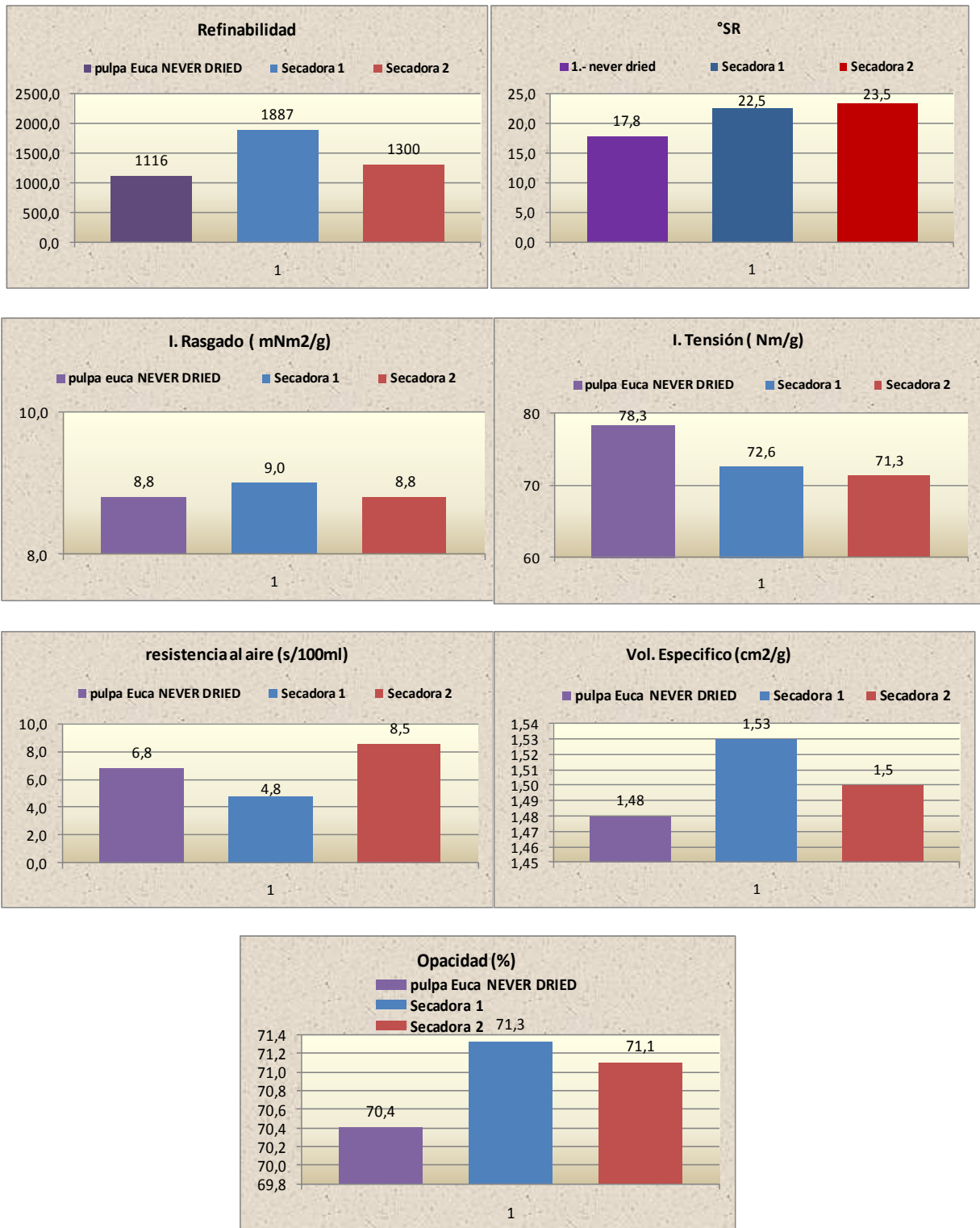


Fig. 36 Efecto del secado industrial en las principales propiedades de la pulpa en relación a diferentes condiciones de secado (secadoras con distinta temperatura de secado y distintas condiciones de prensado) comparadas con la pulpa never dried.

Se puede observar que la Secadora 2 presenta mejor refinabilidad que la Secadora 1 por efectos de una hornificación menos drástica, y nuevamente se ve el

efecto de cambio del par rotura rasgado para un mismo grado shopper riegler, eso hace que para alcanzar la misma tensión que se obtiene en el proceso de secado 1 debería gastarse menos RPM que si la misma pulpa se pasa por la Secadora 2 en las condiciones de operación que se manejó (menor temperatura).

Se obtiene una hoja más densa en la Secadora 2 y por ende tiene a tener una menor opacidad y mayor resistencia al paso del aire, es una hoja mas compactada y más cerrada.

En esta experiencia industrial, sin refinar la pulpa, se ve una clara demostración de los efectos que tiene el prensado en húmedo y el secado de la pulpa ya que los valores físico mecánicos en esta caso caen y además son efectos distintos por efectos de dos configuraciones de secado de la hoja distinta. En los gráficos podemos observar que la Secadora 2 su proceso de hornificación es menos drástico que la misma pulpa obtenida en la Secadora 1 y la razón principal es que la temperatura de operación de la Secadora 2 fue menor ya que el área de transferencia de calor para el secado de la hoja también fue mayor debido a que esta máquina tiene una capacidad de secado de 1550 ton/día, mientras que la Secadora 1 tiene una capacidad de secado de 860 ton/día por lo que se trabajó a mayor temperatura para la misma producción de fibra (830 ton/día).

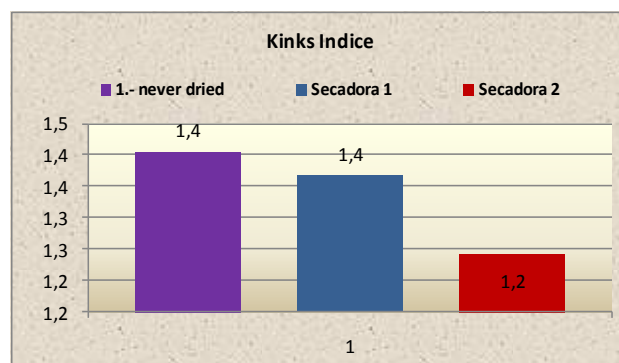
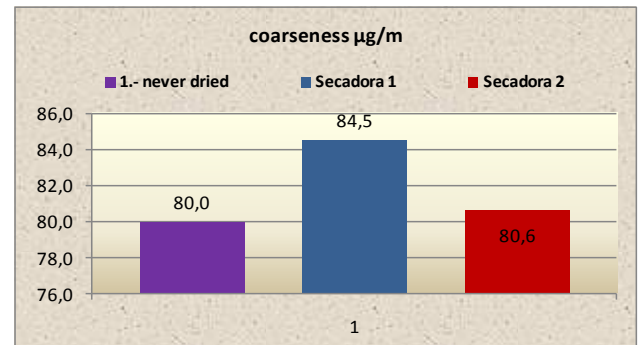
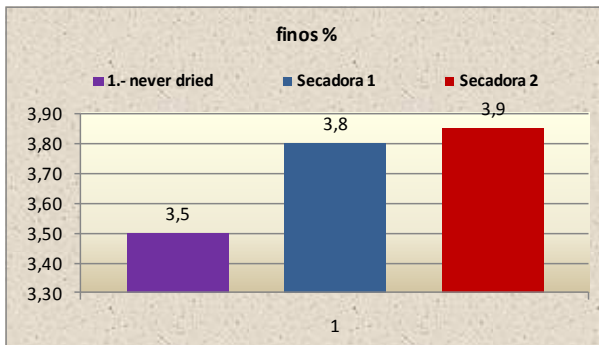
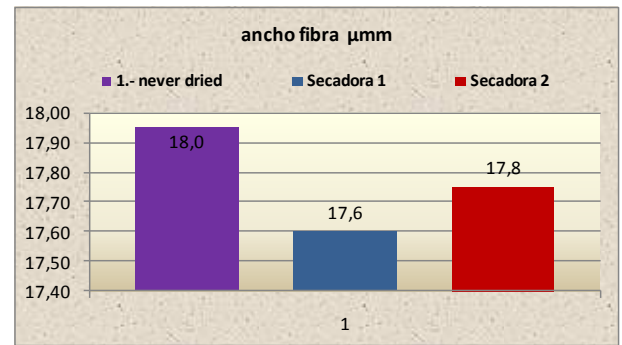
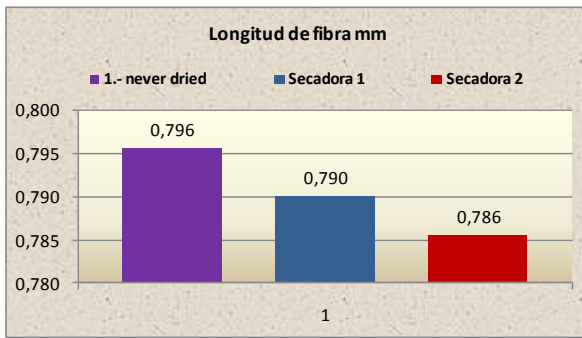


Fig.37 Efecto del secado industrial en las principales propiedades biometricas de la pulpa en relación a diferentes condiciones de secado (secadoras con distinta temperatura de secado y distintas condiciones de prensado) comparadas con la pulpa never dried.

Se puede observar que una de las máquinas (secadora 1) genera mayor deformación que la secadora 2 debido a que tiende a presentar mayores deformaciones ya que tiene un indice kinks mayor.

5.6 Resumen de Resultados.

TABLA 10. Efectos del secado industrial en las propiedades de la pulpa en comparación a la pulpa never dried y sus posibles razones de estos cambios

PROPIEDADES DE LA FIBRA	ASPECTOS POSITIVOS	ASPECTOS NEGATIVOS	POSIBLES RAZONES
Energía de Refinación		Aumenta 12.5%	Coarseness alto, Hornificación, WRVbajo
Tensión		Disminuye 21.9%	Coarseness alto, Hornificación, WRVbajo
Rasgado		Disminuye 19.2%	Longitud de fibra baja, Coarseness alto, ZSPAN?
Explosión		Disminuye	Coarseness alto, Hornificación, WRVbajo
Resistencia al Aire		Disminuye 96.3%	Menos finos, Coarseness alto, menor población de fibras
°SR	Sin cambios		no hay refinación de la pulpa por agitación ó bombeo
Volumen Específico	Sin cambios		Sin alteraciones de forma significativas (Shape, KinKs)
Densidad	Sin cambios		Sin alteraciones de forma significativas (Shape, KinKs)
WRV		Disminuye 32.8%	Hornificación, modificación de los poros
Blancura	Sin cambios		Sin efectos Químicos
Opacidad		Disminuye 1.0%	Menos finos, disminución del ancho de fibra, WRV bajo
Reversión		Aumenta LEVE	Alta temperatura, Hornificación, Variaciones Ph
Viscosidad Intrínseca	Sin cambios		Sin alteraciones químicas
Extraíbles DCM		Disminuye 21.0%	drenaje en la máquina pulpa, aplicación de vapor?
Longitud		disminuye LEVE	Hornificación, WRV bajo
Factor de Forma SHAPE		Aumenta LEVE	Tiros, prensado
Coarseness		Aumenta 5.8%	Hornificación (menor longitud de fibra),
Ancho fibra		disminuye 6.2%	Hornificación, tiros

TABLA 11. Efectos de la temperatura de secado en las propiedades de la pulpa. Experiencias realizadas en estufa de laboratorio

TEMPERATURA	
Refinabilidad	Tendencia a aumentar
Indice Rasgado	No cambia
Indice Tensión	Se altera >160°C
Resistencia al Aire	Se altera >140°C
Opacidad	Se altera >120°C
Reversión	Se altera >120°C
WRV	Se altera >160°C
Longitud Fibra	Tendencia a disminuir
Ancho Fibra	Tendencia a disminuir
Coarseness	Tendencia a disminuir

TABLA 12. Efectos del pH en las propiedades de la pulpa a distintas temperaturas de secado. Experiencias realizadas en estufa del laboratorio

pH de la Pulpa	
Refinabilidad	Tendencia a disminuir
Indice Rasgado	efecta significativamente a T°alta
Indice Tensión	Solo afecta a pH>6 a 120°C y significativamente a T°Alta
Resistencia al Aire	afecta en utilizar un valor de pH u otro en el rango de T° alta y media
Opacidad	Se altera en el rango de pH > 6 a alta T°
Reversión	Se altera en el rango de pH >6 a alta T°
WRV	se afecta con pH >6 a alta T°
Longitud Fibra	Tendencia a disminuir
Ancho Fibra	Tendencia a disminuir
Coarseness	Tendencia a disminuir

TABLA 13. Efectos del contenido de humedad final de secado en las propiedades de la pulpa a distintas temperaturas de secado. Experiencias realizadas en estufa de laboratorio.

	Contenido de seco% final
Refinabilidad	Tendencia a aumentar sobre 82%
Indice Rasgado	efecta sobre 82% en el rango alto de T°
Indice Tensión	Tendencia a bajar sobre 82%
Resistencia al Aire	se afecta en todo el rango de seco
Opacidad	Se altera en el rango mayor a 82% Seco
Reversión	Se altera en el rango mayor a 82% Seco
WRV	Tendencia a disminuir a mayor seco
Longitud Fibra	Tendencia a disminuir a mayor seco
Ancho Fibra	Tendencia a disminuir a mayor seco
Coarseness	Tendencia a disminuir a mayor seco

5.7 Discusión Final

En este trabajo son analizados aspectos fundamentales de la calidad de celulosa, en este caso pulpa de fibra corta producida de madera de eucaliptus, sus ventajas y desventajas sobre algunas propiedades al secarse y comercializarla en forma de fardos. La resistencia de la pulpa y sus propiedades ópticas de fibra corta es uno de los criterios dentro de otros, para definir calidades distintas, pero es uno de los más importantes para la industria papelera, por su importancia económica y el comportamiento del papel en las máquinas papeleras.

La composición química de la pulpa tiene una fuerte influencia en las propiedades de la fibra. La morfología de la fibra también es un factor dominante para la calidad de la pulpa, tanto la estructura de la pared como las dimensiones de la fibra.

La longitud y el coarseness, son otros criterios importantes de calidad para definir la heterogeneidad de los materiales fibrosos.

Diversos trabajos de investigaciones encontradas en la literatura especializada, nos indican que en la obtención de pulpa química a nivel industrial las fibras son dañadas y debilitadas por la acción mecánica, en condiciones distintas de consistencia, temperatura y cambios químicos hasta llegar al proceso de secado. Las estadísticas y los especialistas, aún no logran convenir si existen partes de las fibras que son más susceptibles a degradarse por la acción mecánica ó a la degradación por acción química.

Los resultados obtenidos en este trabajo, que focaliza su análisis en la etapa de secado, refuerza los conceptos anteriormente mencionados y la importancia de conocer mejor su proceso y los cambios que ocurren en la calidad de la pulpa.

6. CONCLUSIÓN

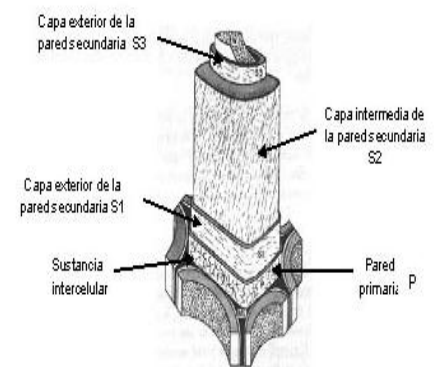
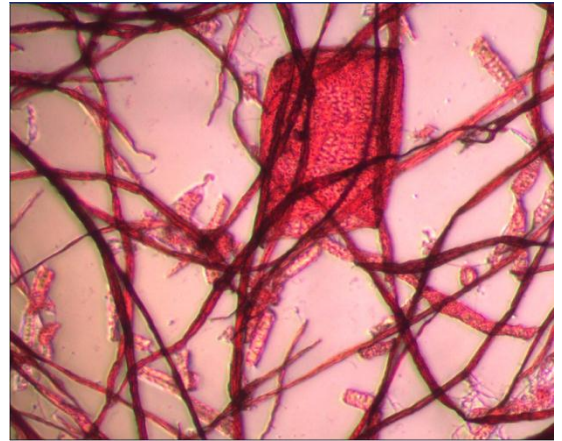
6.1 Consideraciones Técnicas

El proceso de estructura de una hoja de papel ó celulosa ocurre en un medio acuoso.

Las fibras absorben agua y los enlaces (bonding) se promueven por la atracción polar de las moléculas de agua con los grupos hidroxilos que cubren la superficie de la celulosa.

Cuando se evapora el agua, los grupos hidroxilo se unen por medio de puentes de hidrógeno, este proceso es irreversible. La refinación tiende a recuperar parte de este fenómeno generando nuevos espacios para que se incorpore agua. Por otro lado hay mecanismos que permiten disminuir el fenómeno de hornificación buscando formulas como evitar el stress térmico por alto contenido sequedad de la pulpa, aumentar la tiempo de evaporación con temperaturas de secado mas baja y por ultimo modificando el pH de la pulpa hacia la neutralidad

El estudio demuestra que algunas propiedades de la pulpa de Eucaliptus, obtenidas al final del blanqueo (NEVER DRIED), se alteran y se pierde calidad producto del proceso de secado de esta (DRIED). Al revisar los resultados se observa que las fibras modifican sus características estructurales (coarseness), cae la resistencia (par rotura-rasgado) tal como lo muestran los resultados obtenidos en las mediciones físico-mecánicas, algunas características de formas se ven alteradas como también las propiedades biométricas (ancho, longitud), disminuyendo también la opacidad como consecuencia de estos cambios estructurales de la fibra. Lo más impor-



Estructura simplificada de la pared celular de una fibra de celulosa.

tante, es que se visualiza que, La pulpa secada e hidratada nuevamente para evaluar sus propiedades de resistencia al refinarla tienen comportamientos distintos si la temperatura de secado es mayor, si se modifica el pH de la pulpa, y de las condiciones de configuración y condiciones de operación de un proceso de secado (prensado en húmedo y características del secador). La pulpa refinada tiende a disminuir las diferencias observadas en las propiedades de resistencia

El origen de este cambio en las propiedades de la pulpa después del secado, entre una pulpa never dried y once dried (pulpa líquida y pulpa seca) es que las fibras secadas son hornificadas en el proceso de secado debido primero a la compactación de las fibras en las prensas húmedas y posteriormente a la eliminación del agua interna y externa de las fibras en el secador. El proceso de hornificación será más agresivo si la presiones de trabajo son altas y la temperatura del secador también son altas. Esto ocurre porque una vez que la unión interfibrilar ha ocurrido por las uniones puentes de hidrógeno y los enlaces de tipo covalentes Van der Waals que se generan en el proceso de secado, la fibra posteriormente se resiste al reswelling (hidratación ó hinchamiento). Particularmente el proceso de secado disminuye el volumen específico y el área superficial de la fibra debido a que el secado causa colapso de los poros y una pérdida de la superficie interna.

Las pulpas secas refinadas logran incrementar su área superficial, pero no al estado original, esto indica que el efecto del refinado no logra revertir en forma importante el colapso de los poros de la fibra producto de la hornificación. Las fibras secas son más difíciles de hidratar por su naturaleza cristalina vidriosa que adquiere en comparación con la fibra virgen amorfa hidrofílica. Se sabe además de la redistribución de los compuestos oleofinicos durante el secado genera una especie de auto encolado en la superficie de la fibra. Por otro lado, la cristalinidad de la fibra seca también hace las fibras más frágil y difícil de crear enlaces (bonding) con otras fibras. Cambio estructural en el secado y fibras refinadas

Los resultados muestran que para el mismo nivel de hidratación (swelling), la pulpa secada y refinada pierde propiedades frente a la pulpa hidratada never dried, la refinación tiende a aflojar en parte estos enlaces por esa razón se requiere más energía de refinación perdiendo macrofibrilas y formando mas microfibrilas por esta razón aumentan los finos y la densidad de la hoja, hay situaciones que se han notado que la energía de refinación es bastante alta lo que hace pensar que las fuerzas

interfibrilares que se dan en algunas regiones de la pared celular pueden ser lo suficientemente fuerte que resisten la compresión y fuerzas de corte durante el tratamiento mecánico de la fibra. Lundberg & Ruvo mencionan que las fibras secadas se reorientan a nivel de las microfibrillas alineándose las cadenas de carbohidratos que pueden generar fuerzas intensas de puentes de hidrógeno.

En resumen, la hornificación tiene un efecto negativo sobre el factor de ruptura y un efecto positivo en el drenaje, reduce la flexibilidad y conformación de la fibra lo que limita su posterior capacidad de enlace. La investigación muestra que a mayor temperatura de secado estos defectos son mayores, por lo que hace diferencia de pasar la pulpa en un secado de media presión a un secador de baja presión. Por otro lado, el pH de la pulpa tiende también a mejorar la hidratación de la pulpa a pH más altos lo que facilita su refinabilidad, esta pulpa alcalina presenta una WRV mayor lo que se traduce en dificultad en drenar. Falta analizar si el contenido de humedad final de la pulpa después de secado influye en las propiedades de la pulpa cuyo resultado dependerá de los factores económicos a considerar debido a que el transporte de pulpa tiene mucha incidencia en los costos sobre todo si el contenido de humedad aumenta.

6.2 Consideraciones Económicas

Tabla 14. Efectos en los costos del proceso de secado industrial de pulpa en relación a la temperatura de secado, pH de la pulpa y contenido final de seco.

Variable Estudiada	Condición de la variable	Efectos sobre la Pulpa	Costo Proceso	Beneficio esperado	Infraestructura requerida
Temperatura Secado	↑	↓	↑	Aumenta tasa de evaporación	Menor tamaño secador
	↓	↑	↓	Disminuye tasa de evaporación	Mayor tamaño secador
pH de la pulpa	↑	↑	↑	Dificultades en drenaje de agua	Mayor tamaño secador
	↓	↓	↓	Mejor drenaje aumenta tasa de evaporación	Menor tamaño del secador
Seco final	↑	↓	↑	Menor costo de transporte	Mayor tamaño del secador
	↓	↑	↓	Mayor costo transporte	Mayor tamaño del secador

7. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. D. Orloff, P.Phelan, I. Rudman ***high-intensity drying process - impulse drying, Topical report, february 1995, DOE/CE/40738-T12.***
2. DI Irina Rauvanto, ***the effect of oxygen delignification on fiber properties in kraft pulp production, Lappeenranta University of Technology, UDK 676.164.3, 2003.***
3. Elisabeth Bjork, Lars grandlof, Ulla-Britt mohlin, ***Pulp Quality With STFI Fibermaster, STFI Report November 2002.***
4. Elisabet Brannvall & Mikael Lindstrom, ***The Hemicellulose Composition Of Pulp Fibers And Their Ability to Endure Mechanical Treatment, Tappi Journal, Vol 6, N° 10, pags 19-24. 2007.***
5. J.martin,F. jim McPhee, Kevin Kingsland, Robert Tristram, Tim O'Hagan, Roma Kowalska, and Brent Thomas. ***Pulp Strength Delivery Along Complete Kraft Mill Fiber Lines, Tappi journal, Vol 78, N°8, pags 153-160, 1995.***
6. Jian li, ***Limitations From Physical Strength , paper Of Institute Of Paper Science And Technology, Proyect F030, Abril 1999.***
7. Joffrey Cowan, ***Z-Span Testing For Better Papermaking Quality Pulp, article of W.F. Cowan Founder of Pulmac Instruments International.***
8. José Turrado, Alma R. Saucedo, Juan Ramos y Maria L. Reynoso, ***Comportamiento De La Fibra De Celulosa Reciclada En El Proceso De Hidratación, Información Tecnológica-Vol. 19 N°5-2008, pág.: 129-136, Universidad de Guadalajara, Departamento de Madera, Celulosa y Papel.***
9. Joutsimo, Olli, ***Effect of Mechanical Treatment on Kraft Fiber Properties, KCL, Helsinki University Of technology on the 19th November, 2004.***
10. Karlsson,H. 2002. ***Fiber Analysis And Process Aplications In The Pulp And Paper Industry, AB Lorentz&Wette,Sweden.***
11. Maloney, T. C., Li, T.-Q., Weise, U., and Paulapuro, H. (1997). ***"Intra- and Inter-fibre pore closure in wet pressing." Appita, 50 No.4, 301-306.***
12. Martin MacLeod, Jim McPhee, Kevin Kingsland, Robert Tristram, Tim O'Hagan, Roma Kowalska, and Brent Thomas., ***Pulp Strength Delivery Along Complete Kraft Mill Fiber Lines, Tappi Journal 78(8):153 (1995).***
13. Mats Haggkvist, Tie Qiang LI, Lars Odberg, ***Effects Of Drying And Pressing On The Pore Structure In The Cellulose Fiber Wall Studied by 1H and 2H NMR Relaxation, CELLULOSE (1998) 5, 33-49.***

14. Nyholm K., Ander P., Bardage S., Daniel G., ***Dislocation in pulp fibres – their origin, characteristics and importance – a review, Nordic Pulp and Paper Research Journal, 16 (2001) 4, pp. 376- 384.***
15. Olli Joutsimo and Leif Robertsén, ***The Effect Of Mechanical Treatment On Kraft Pulp Fibers, KCL, FI-02151 Espoo, Finland.***
16. Omid Ramezani and Mousa M. Nazhad, ***The Effect Of Coarseness On Paper Formation, Paper Science and Industry Dept., Tehran University, Iran, Pulp and Paper Technology Dept., Asian Institute of Technology, Thailand. 2004.***
17. Phichit Somboon and Hannu Paulapuro, ***Determination of Wet Fiber Strength, Tappi Journal, May 2009 pages 4-10.***
18. Phichit Somboon, Kaarlo Nieminen, and Hannu Pauapuro, ***Finite Element Analysis Of The Fatigue Behavior Of Wood Fiber Cell Walls, BioResources 3(4), 983-994.***
19. Prof. Dr. Panu Tikka, ***Pulp Quality – Not Only Chemistry- Lecture to be held at 3rd International Colloquium on Eucalyptus Pulp, February 4-7, 2007 Belo Horizonte, Brazil.***
20. R.L. Ellis/ and A.W. Rudie, ***Ideal Fibers for Pulp and Papers Products, Abstract of conference, by the Institute of Paper Science and Technology and its Member Companies.***
21. Richard A. Horn, ***Morphology Of Wood Pulp Fiber And Influence On Paper Strength, Forest Products Technologist, US Department of Agriculture.***
22. Rolf Wathén, ***Studies On Fiber Strength And Its Effect On Paper Properties, KLC, ISSN 1457-6252, Department of Forest Products Technology, Helsinki, 2006.***
23. Savcor Indufor Oy, ***Pulp Quality Comparison , Technical Report - Module 6, Helsinki, February 5, 2007***
24. Scallan, A., and Tigerström, A. (1992). ***“Swelling and elasticity of the cell walls of pulp fibres.” Journal of Pulp and Paper Science, Vol. 18, No. 5 September 1992, j188-j193.***
25. Sutton P, Joss C, Crossely B, ***Factors Affecting Fiber Characteristics In Pulp, TAPPI International Paper Conference, 1990.***
26. Vainio, A. and Paulapuro, H. ***The Effect Of Wet Pressing And Drying On Bonding And Activation In Paper, Nordic Pulp and Paper Research Journal 22(4), pp. 403-408 (2007).***

27. W.B. Cowan CD, MSc, ***Effective Management of Pulp Strength: The Zero-Span Approach, Process & Product Quality Conference Proceedings, 1994.***
28. Xinshu Wang, ***Improving the papermaking properties of kraft pulp by controlling hornification and internal fibrillation, Helsinki University of Technology, Laboratory of Paper and Printing Technology, Reports, Series A26, 2006.***
29. Claramunt a, M. Ardanuy b, J.A. García-Hortal, ***Effect of drying and rewetting cycles on the structure and physicochemical characteristics of the fibers, journal homepage: www.elsevier.com/locate/carbpol.***
30. E.S. Welf, R. A. Venditti, M. A. Hubbe, J.J. Pawlak, ***The effects of Heating Without Water Removal and Drying on the Swelling as Measured by Water Retention Value and Degradation as Measured by Intrinsic Viscosity of Cellulose Papermaking Fibers, Progress in Paper Recycling/Vol.14,No. 3, May 2005.***
31. J.M.B. Fernandes Diniz, M.H. Gil, J.A.A.M. Castro, ***Hornification-its origin and Interpretation in wood pulps, Wood Sci Technology 37 (2004) 489-494.***
32. U. Weise and H. Paulapuro, ***Effect of Drying and Rewetting Cycles on Fiber Swelling, Journal of Pulp and Paper Science: Vol. 25 No. 5 May 1999.***
33. www.arauco.cl, ***Folleto Corporativo Arauco, Reporte Anual 2009.***
34. www.corma.cl, ***Corma, Chile Forestal, Reporte Anual 2009.***
35. Elisabeth Bjork, Lars grandlof, Ulla-Britt mohlin, ***Pulp Quality with STFI Fibermaster, STFI Report, 2002.***
36. Richard A. Horn, ***Morphology Of Wood Pulp Fiber From Softwoods And Influence On Paper Strength, Forest Products Technologist, US Department of Agriculture.***
37. Joutsimo, Olli, ***Effect Of Mechanical Treatment On Softwood Kraft Fiber Properties, KCL, Helsinki University Of technology on the 19th November, 2004.***