

# **CURSO DE PREPARACIÓN DE LA PASTA**



Instructor: Edison da Silva Campos

Apostilla: revisión 01

2009

---

## ÍNDICE DE LA APOSTILLA

1. INTRODUCCIÓN (CARACTERÍSTICAS DE LOS PAPELES) [5]
  - 1.1. DEFINICIÓN DEL PAPEL [5]
  - 1.2. HISTÓRIA DEL PAPEL [5]
  - 1.3. SOSTENIBILIDAD DEL SECTOR PAPELERO [9]
  - 1.4. ALGUNOS TIPOS DE PAPEL Y CARTÓN [10]
  - 1.5. CARACTERÍSTICAS DEL PAPEL PARA ONDULAR [16]
2. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS RECURSOS FIBROSOS: CELULOSE, HEMICELULOSAS, LIGNINA, EXTRACTIVOS [25]
  - 2.1. DEFINICIONES [25]
3. ESTRUCTURA DE LOS PAPELES: FIBRAS CELULÓSICAS, MORFOLOGIA, TIPOS, FUENTES DE OBTENCIÓN (PROCESOS DE PULPADO: TIPOS PRINCIPALES, CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE LOS PROCESOS Y DE LOS PRODUCTOS; FIBRAS RECICLADAS) [29]
  - 3.1. FIBRAS UTILIZADAS PARA LA PRODUCCIÓN DE PAPEL [29]
  - 3.2. MORFOLOGIA DE LA FIBRA [30]
  - 3.3. FUENTES DE OBTENCIÓN DE LAS PULPAS [32]
    - 3.3.1. Producción de pasta mecánica en molinos de piedra (MP – SGW, SGD) [33]
    - 3.3.2. Producción de pasta termomecánica (TMP) [33]
    - 3.3.3. Pasta termomecánicoquímica (CTMP) [34]
    - 3.3.4. Proceso semiquímico [35]
    - 3.3.5. Pastas químicas [35]
    - 3.3.6. Proceso sulfito [36]
    - 3.3.7. Procesos alcalinos [37]
  - 3.4. FIBRAS RECICLADAS [39]
    - 3.4.1. Pérdida de resistencia mecánica [40]
    - 3.4.2. Dificultades para el desgote de la pasta [41]
    - 3.4.3. Pérdida de blancura [41]
    - 3.4.4. Modificaciones químicas de la fibra de celulosa [41]
    - 3.4.5. Peor maquinabilidad [41]
    - 3.4.6. Presencia de contaminantes [42]
    - 3.4.7. Soluciones para mejorar el reciclado de papel [42]

- 
4. UNIONES DE LAS FIBRAS EN EL PAPEL: PUENTES DE HIDRÓGENO Y OTROS [44]
    - 4.1. FUERZAS DE VAN DER VAALS [44]
    - 4.2. UNIONES HIDRÓGENO [46]
  5. OBJETIVOS DE LA PREPARACIÓN DE LA PASTA [46]
  6. DESINTEGRACIÓN [47]
    - 6.1. PULPER [47]
    - 6.2. TRITURADORES SECUNDARIOS [49]
    - 6.3. DESPATILLADOR (“deflaker”) [50]
  7. DEPURACIÓN DE FIBRAS VIRGENES Y RECICLADAS [52]
    - 7.1. INTRODUCCIÓN [52]
    - 7.2. TIPOS DE IMPUREZAS QUE SE ENCUENTRAN EN LAS SUSPENSIONES FIBROSAS [53]
      - 7.2.1. Impurezas pesadas [53]
      - 7.2.2. Impurezas ligeras [53]
      - 7.2.3. Impurezas voluminosas [53]
    - 7.3. DEPURADORES PROBABILÍSTICOS [54]
      - 7.3.1. Vibrantes planos [56]
      - 7.3.2. Vibrantes rotativos [58]
      - 7.3.3. Depuradores bajo presión [58]
    - 7.4. DEPURADORES CENTRÍFUGOS [61]
      - 7.4.1. Depuradores centrífugos con toberlino libre [61]
      - 7.4.2. Depuración a alta consistencia [64]
  8. REFINACIÓN [65]
    - 8.1. INTRODUCCIÓN [65]
    - 8.2. TEORÍA MÁS ACEPTA ACERCA DEL REFINO [67]
    - 8.3. PRINCIPIO DE ACTUACIÓN DEL MATERIAL UTILIZADO EN EL REFINADO DE PASTAS [68]
    - 8.4. EFECTOS DEL REFINADO [69]
      - 8.4.1. Efectos primarios [70]
      - 8.4.2. Efectos secundarios [71]
    - 8.5. PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN EL REFINADO [74]
      - 8.5.1. Aptitud de una pasta al refinado [76]
-

- 
- 8.5.2. Ph [76]
  - 8.5.3. Presencia de aditivos [76]
  - 8.5.4. Temperatura [77]
  - 8.5.5. Consistencia [77]
  - 8.6. INFLUENCIA DE LA CONCEPCIÓN DE LOS REFINADORES EN LA OPERACIÓN DE REFINADO [77]
    - 8.6.1. Dirección del flujo [78]
    - 8.6.2. Velocidad [78]
    - 8.6.3. Naturaleza de las guarniciones [78]
    - 8.6.4. Dimensiones de las cuchillas [78]
    - 8.6.5. Ángulo de inclinación de las cuchillas [80]
  - 8.7. POTENCIAS EN EL REFINADO [80]
  - 8.8. ENTREHIERRO [81]
  - 8.9. CARACTERIZACION DEL REFINADO [82]
  - 9. ADITIVOS FUNCIONALES [85]
    - 9.1. SULFATO DE ALUMÍNIO (ALAMBRE) [85]
    - 9.2. RESINA ENCOLANTE [85]
    - 9.3. RESINA CON RESISTENCIA EN HÚMEDO [86]
    - 9.4. ALMIDÓN CATIONICO [86]
    - 9.5. COLORANTES [87]
  - 10. AYUDANTES DE PROCESSO [87]
    - 10.1. AGENTE DE RETENCIÓN [87]
    - 10.2. ANTIENCRUSTANTE [87]
    - 10.3. ANTIBACTERICIDA [87]
    - 10.4. HIDRÓXIDO DE SÓDIO (SODA CÁUSTICA) [88]
    - 10.5. DISPERSANTE [88]
  - 11. CIRCUITO DE APROXIMACIÓN [89]
- BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS (Internet: marzo y abril/2009) [91]

## 1. INTRODUCCIÓN (CARACTERÍSTICAS DE LOS PAPELES).

### 1.1. DEFINICIÓN DEL PAPEL

De acuerdo con Smook (1992), una hoja de papel se define como una hoja de fieltro de fibra formada sobre una fina malla a partir de una suspensión con agua. Además de la fibra, en la práctica muchos tipos de papel se producen a partir de aditivos no fibrosos o material sintético. Normalmente la fibra es de origen vegetal, pero también puede ser de origen animal, mineral o sintético; estas últimas se usan en aplicaciones especiales (1). La figura 1 presenta una muestra de papel con ampliación.

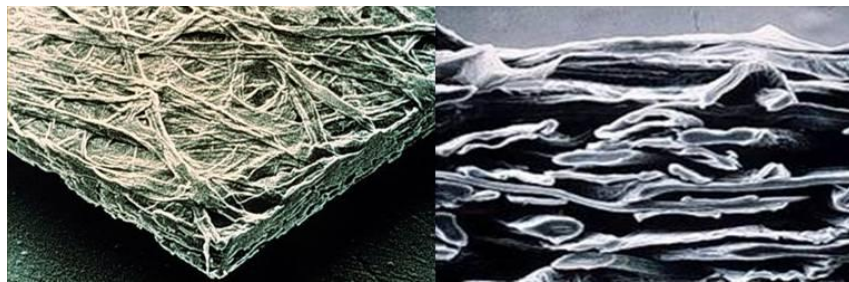


Figura 1 – FUENTE: (7)

Otras definiciones:

El papel es un afieltrado de fibras unidas tanto físicamente, por estar entrelazadas a modo de malla, como químicamente por puentes de hidrógeno. Nota: esta definición es parte de artículo de la Enciclopedia Libre Universal en Español (2).

El papel es el nombre genérico para todas las clases de hojas de fibra (generalmente vegetal, pero a veces mineral, animal o sintética) formadas en una fina pantalla de suspensión de agua. El papel y el cartón son las dos amplias categorías del papel. El papel es generalmente más liviano en peso base, más delgado y más flexible que el cartón. Sus aplicaciones más importantes son para imprimir, escribir, envolver y usos sanitarios, aunque se emplea para una gran variedad de otras aplicaciones (3)

### 1.2. HISTORIA DEL PAPEL

El primer fabricante de papel fue la avispa, la cual cortando trozos de cortezas y hojas de plantas, muele estos materiales con sus mandíbulas y los mezcla con su saliva para formar una pasta, la misma que utiliza para construir su panal (6).

La obtención de las primeras hojas de fibra rudimentarias que podían ser empleadas para la escritura, fueron confeccionadas por los egipcios en el año 3000 A.C. a partir de una planta que crecía a la orilla del río Nilo: el papiro (*Cyperus Papyrus*, figura 2), de donde proviene la palabra papel (4)(8).

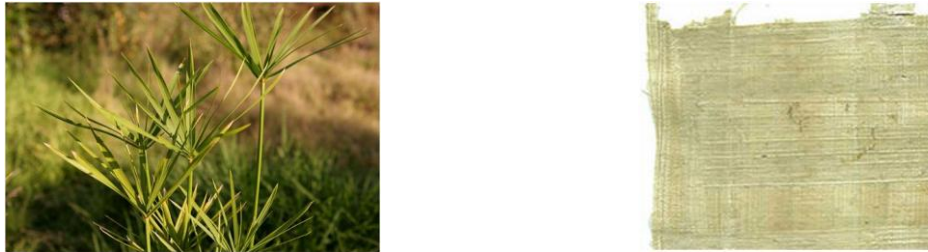


Figura 2 - FUENTE: (16)

En Europa, durante la Edad Media, se utilizó el pergamino que consistía en pieles de cabra o de carnero, curtidas, preparadas para recibir la tinta, que por desgracia eran bastante costosos, lo que ocasionó que a partir del siglo VIII se popularizara la infausta costumbre de borrar los textos de los pergaminos para reescribir sobre ellos (dando lugar a los palimpsestos) perdiéndose de esta manera una cantidad inestimable de obras (8).

En el año 105 a.c. un habitante de China llamado Ts'ai Lun, fabricó el primer papel hecho con pasta procedente de bambú o a partir de los residuos de la seda, de pedazos de garlitos, de la paja de arroz y del cáñamo, e incluso del algodón y, triturándolos, para lo cual utilizó piedras y martillos y al mezclarlos con el agua se formó una pasta líquida, que era filtrada, secada y aplanada (figura 3). Como resultado de este trabajo se dio origen a la primera hoja de papel. Durante 500 años la técnica de cómo fabricar papel estuvo sólo en conocimiento de China (6)(7)(8).



Figura 3 – FUENTE: (16)

---

En esa época Ts'ai Lun era el jefe de los eunucos del Emperador, y estaba al frente de los suministros de la Casa Real. Ts'ai Lun fue el primero en organizar la producción del papel a gran escala, y se las arregló para conseguir las patentes exclusivas para hacerlo. China en ese tiempo era ya una sociedad burocrática que requería documentos en abundancia para llevar sus registros por escrito. Estaban sentadas las bases para el desarrollo de un material más ligero, fácil de almacenar y transportar que las existentes tablillas de madera o las telas de seda (15).

En el siglo III D.C., el secreto de la preparación del papel se difundió desde China a otros territorios vecinos (Corea, Vietnam, Japón). El papel entro por la ruta del Oeste, cruzó el Turquestán, Persia, y Siria, para finales del siglo V, el papel era usado en toda Asia Central. Gracias a una invasión en territorio chino, la fabricación del papel se extendió hacia el oeste vía Samarkanda. Los fabricantes de papel chinos se vieron forzados a revelar el secreto del arte de fabricar papel a cambio de la libertad o de sus vidas. La producción se establece en Samarkanda en el año 751, usando el abundante lino local y cáñamo para producir un papel de suave y fibrosa apariencia. Este conocimiento transmitido a los árabes, quienes a su vez lo llevaron a las que hoy son España y Sicilia desde el siglo IX. La elaboración de papel se extendió a Francia que lo producía utilizando lino desde el siglo XII (6)(8)(15).

En el siglo XIV, el uso masivo de la camisa permitió que hubiera suficiente trapo disponible para fabricar papel lo cual, junto a la invención de la imprenta, permitió la producción de papel a precios económicos, y con ello, el surgimiento del libro como un producto de mercado accesible (4).

Fue el uso general de la camisa, en el siglo XIV, lo que permitió que hubiera suficiente trapo o camisas viejas disponibles para fabricar papel a precios económicos y gracias a lo cual la invención de la imprenta permitió que unido a la producción de papel a precios razonables surgiera el libro, no como una curiosidad sino como un producto de precio accesible (8).

Actualmente los compuestos anteriores se utilizan, sólo en cantidades muy pequeñas, para los tipos más finos y especiales de papel. Para el resto del papel se emplean otras materias de carácter fibroso y origen vegetal, es decir, elementos constituidos por las fibras que existen en los tejidos vegetales; el material más empleado en la fabricación de papel para obtener materia fibrosa es la madera (5).

Posteriormente en el siglo XVIII y XIX, con la tecnología de imprimación se desarrolla un incremento en la alfabetización, simultáneamente los fabricantes de papel mejoraron sus mecanismos de producción de papel. La primera máquina (figura 5, a izquierda) para elaborar

papel fue inventada por el francés, Nicholas Louis Robert, un empleado del taller Didot en Francia. El cuñado de Roberts, John Gemble, sacó una patente británica en 1801, la cual fue desarrollada y financiada en Inglaterra por Henry y Seale Fourdrinier, con la ayuda del joven maquinista llamado Brian Donking, quien construyó “self acting” y automatizó la máquina en Hertfordshire (figura 4, a derecha), en 1803, la efectividad de ésta creó una sensación (15).



Figura 4 – FUENTE: (7)

El principio básico de de la maquina Fourdrinier, es suspender la pulpa de papel en agua, que es derramada con un movimiento horizontal, ... las vibraciones de lado a lado causaban que las fibras se intercalaran una con otra. En ese momento esto fue conocido como Dandy, el cual presiona mayormente el agua, al mismo tiempo que imprime las marcas de agua o líneas extendidas, sobre la pulpa del papel. Después, esto es transportado a cilindros calientes y secos para que al final del proceso se devanara en un largo rollo perfectamente seco. La mayor producción mundial del papel, es elaborado al estilo de la máquina “fourdrinier” (15). La figura 5 presenta una máquina “fourdrinier” más actual.

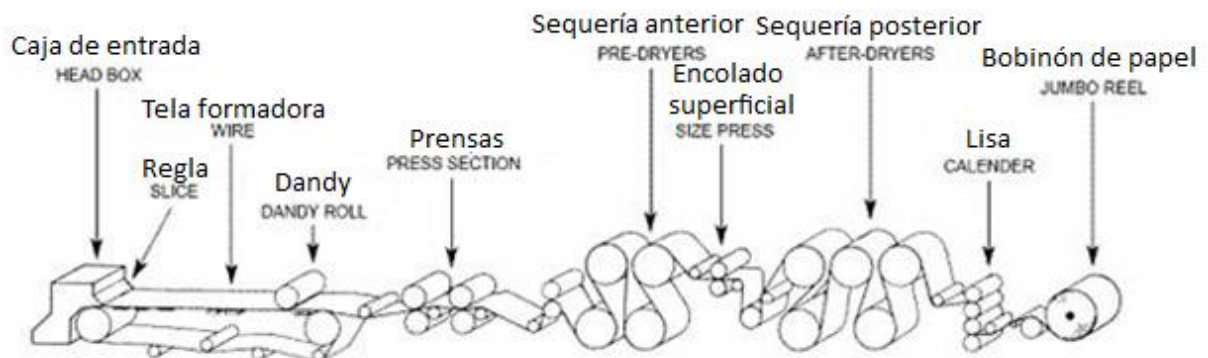


Figura 5 – FUENTE: (7)

Otro tipo de máquina para fabricar papel que apareció en este tiempo, fue un máquina con molde cilíndrico (figura 6). Que comienza con un movimiento lento, este proceso es



capaz de producir papel similar en apariencia y sentirse como papel hecho a mano. Sin embargo en Inglaterra, un número de individuos estaban trabajando independientemente en una máquina de este tipo, uno de ellos fue John Dickenson, quien produjo la primera máquina comercial en 1809 (15).

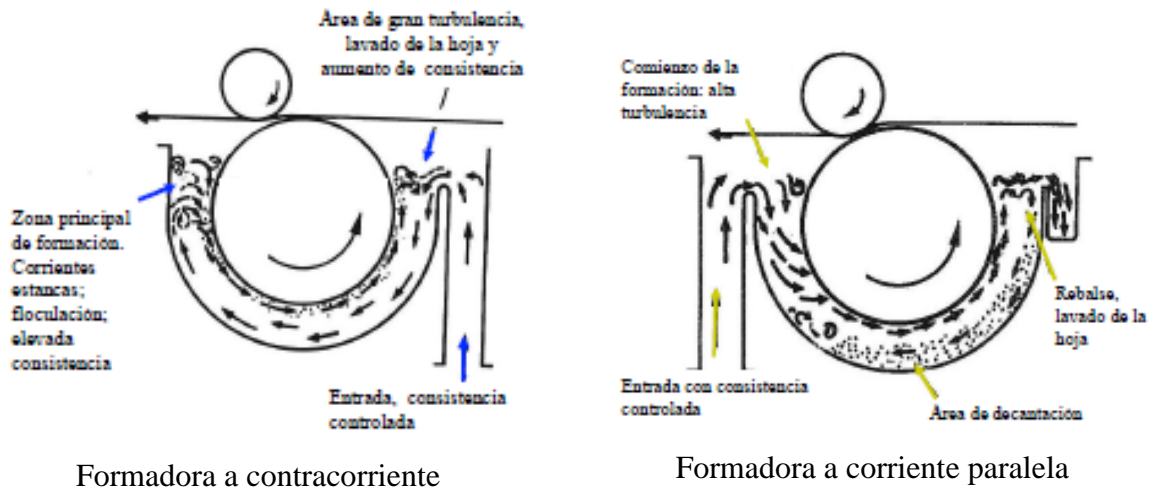


Figura 6 – FUENTE: (38)

Los actuales campos de investigación en la fabricación del papel tienen como objetivo mejorar los procesos ya existentes y descubrir nuevos procesos para utilizar mayor diversidad de materias primas (4).

El papel ahora puede ser sustituido para ciertos usos por materiales sintéticos, sin embargo sigue conservando una gran importancia en nuestra vida y en el entorno diario, haciéndolo un artículo personal y por ende difícilmente sustituible (8).

### 1.3. SOSTENIBILIDAD DEL SECTOR PAPELERO

El del papel es un ciclo integrado y sostenible (figura 7). Los árboles producen madera fijando dióxido de carbono y éste queda almacenado en el papel. Con la recuperación y el reciclaje de los productos papeleros una vez usados, se prolonga la vida útil de las fibras de celulosa obtenidas de la madera, optimizando el aprovechamiento de este recurso natural. Por otra parte, la biomasa y los residuos del proceso de fabricación pueden ser valorizados material o energéticamente. De este modo se cierra y equilibra el ciclo sostenible del papel, que parte de una fuente renovable y natural de materia prima: el bosque (9).

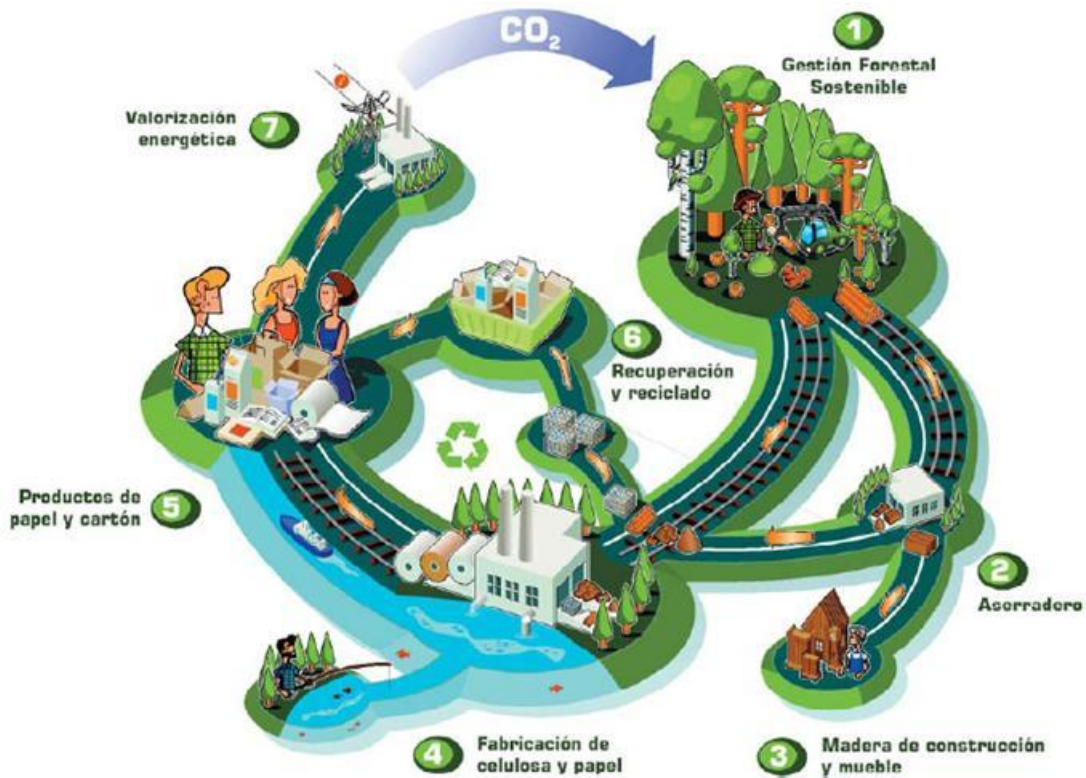


Figura 7 - FUENTE: (6)

#### 1.4. ALGUNOS TIPOS DE PAPEL Y CARTÓN

Hay más de 500 tipos de papeles (y cartones) que se utilizan en el mundo de la comunicación, la enseñanza, la cultura y el arte, la sanidad y la higiene, el comercio y transporte de mercancías y se desarrollan constantemente nuevas aplicaciones (11). Ahora vamos presentar algunos de ellos (8)(12)(13)(14):

**Cartón:** una de las dos subdivisiones del papel. La distinción no es grande, pero el cartón es más pesado en peso base, más grueso, y más rígido que el papel. Todo producto de 12 puntos (0,012 pulgadas) o más en espesor se clasifica como cartón, pero hay excepciones. El papel secante, los fieltros y el papel de dibujo por sobre 12 puntos se clasifican como papel, mientras que el papel onda y “liner” menores de 12 puntos son clasificados como cartón. Esta clase incluye el corrugado, la cartulina y todo otro tipo de cartón.

**Cartón blanqueado para embalaje:** cartón hecho de aproximadamente 85% de pulpa química blanqueada virgen.

**Cartón blanqueado:** término general que cubre cualquier cartón blanqueado compuesto de 100% fibra blanqueada.

**Cartón compacto:** este tipo de cartón se emplea para la realización de cajas y envases de mercancías. El cartón está formado por diversas hojas pegadas entre sí, con un grosor que puede alcanzar los 3 ó 4 milímetros. Se utiliza pasta proveniente de papel recuperado, pudiendo utilizarse para la cubierta exterior pasta kraft.

**Cartón gris:** se utiliza principalmente para cartonaje y encuadernación. Se fabrica a partir de papel recuperado (calidades ordinarias).

**Cartón ondulado o corrugado:** el cartón ondulado está formado por una o varias hojas de papel onduladas o papel plano encoladas entre sí que, básicamente se utiliza para embalajes de productos frágiles y cajas de embalaje en general. Este tipo de papel se fabrica con pasta proveniente de paja, pasta semiquímica, pasta “kraft” o pasta proveniente de papel recuperado. También se combina la pasta “kraft” en la cubierta con pastas provenientes de papel recuperado en las caras inferiores, fibra sólida o corrugada, fabricada a partir de papeles para corrugar, usada en la fabricación de cajas de cartón de gran resistencia para envases de productos de una amplia gama y también para otras aplicaciones, como envoltorio de protección o embalaje.

**Cartón reciclado:** cartón fabricado usando 100 por ciento de papel recuperado, tal como periódicos usados, cajas de cartón corrugado usadas y papeles mixtos. Estos productos incluyen papel “liner” y onda, cartulina (estucada y sin estucar) usada como envases flexibles para cereales y otros productos alimenticios, jabón en polvo y otros productos secos, cajas de zapatos, perfumes y otros productos similares. El cartón reciclado se utiliza también para muchos productos diferentes a envases flexibles, tales como revestimientos de tableros de yeso, tubos, latas, tambores, fósforos, boletos, tarjetas del juego y rompecabezas.

**Cartulina:** término general para designar el cartón usado para fabricar envases flexibles. Puede ser hecha de pulpa mecánica o papel reciclado o combinación de ambos. Puede ser estucada o sin estucar.

**Cartulina estucada con caolín:** grado de cartulina que ha sido cubierta con caolín en una o ambas caras para obtener blancura y suavidad. Se caracteriza por su brillo, resistencia a la decoloración y la excelente superficie de impresión. Se puede aplicar también estucado de color y la base puede ser cualquier variedad de cartón.

**Cartulina plegable:** cartulina recomendada para la fabricación de envases flexibles, se pueden hacer de una variedad de materias primas y en diferentes tipos de máquinas. Posee cualidades que permiten el marcado y plegado y tiene características papel prensa: para este uso se utilizan fundamentalmente papeles específicos elaborados con pasta mecánica

---

mezclada con otras fibras y con pasta proveniente de papel recuperado, con un gramaje de entre 50 y 60 gr/m<sup>2</sup> (12).

**Papel (cartón) multicapa:** producto obtenido por combinación en estado húmedo de varias capas o bandas de papel, formadas separadamente, de composiciones iguales o distintas, que se adhieren por compresión y sin la utilización de adhesivo alguno (13).

**Papel “bond”:** papel base, sin estuco, usado más frecuentemente para hojas carta, oficio y confección de sobres. Originalmente un papel para escritura o impresión en base a algodón, diseñado para la impresión de documentos legales, distinguido por su resistencia superior, rendimiento y durabilidad. El término es también aplicado ahora a los papeles tales como papel con membrete, formularios comerciales, papeles sociales de correspondencia, etc. Sus características incluyen facilidad de impresión, blancura, suavidad, facilidad de borrado y acabado uniforme.

**Papel “fluting”:** papel fabricado expresamente para su ondulación para darle propiedades de rigidez y amortiguación. Normalmente fabricado de pasta semiquímica de frondosas (proceso al sulfito neutro, NSSC), pasta de alto rendimiento de paja de cereales o papel recuperado, se usa en la fabricación de cartones ondulados.

**Papel “kraft”:** el papel “kraft” presenta unas cualidades específicas que le permite ser utilizado para la producción de sacos de gran capacidad y bolsas de papel. Papel de elevada resistencia fabricado básicamente a partir de pasta química “kraft” (al sulfato) con un compuesto vegetal proveniente de coníferas, y no contiene cargas por lo que la pasta presenta un alto grado de refinamiento. Puede ser crudo o blanqueado. Los crudos se usan ampliamente para envolturas y embalajes y los blanqueados, para contabilidad, registros, actas, documentos oficiales, etc. Las propiedades que presenta este papel son la tenacidad y la resistencia a la tracción, al alargamiento y a la rotura.

**Papel “liner”:** papel de gramaje ligero o medio que se usa en las cubiertas, caras externas, de los cartones ondulados. Se denomina “kraftliner” cuando en su fabricación se utiliza principalmente pasta al sulfato (“kraft”) virgen, cruda o blanqueada, normalmente de coníferas. La calidad en cuya fabricación se utilizan fibras recicladas se denomina “testliner”, a menudo constituido por dos capas.

**Papel autocopiativo:** papel que en su superficie tiene un tratamiento químico, compuesto de microcápsulas, que posibilita obtener copias, a través de una reacción química activada por un impacto. Existen tres tipos de papel que cumplen diferentes funciones según la cantidad de copias a obtener: CF, CFB, CB.

---

**Papel Biblia:** se fabrica con pasta química y el resultado es un papel con un gramaje inferior a los 50 gr/m<sup>2</sup> con una resistencia importante al doblado y al rasgado. Se emplea para la impresión de Biblias, enciclopedias y diccionarios.

**Papel cristal:** papel traslúcido, muy liso y resistente a las grasas, fabricado con pastas químicas muy refinadas y subsiguientemente calandrado. Es un similsulfurizado de calidad superior fuertemente calandrado. La transparencia es la propiedad esencial. Papel rígido, bastante sonante, con poca mano, sensible a las variaciones higrométricas. A causa de su impermeabilidad y su bella presentación, se emplea en empaquetados de lujo, como en perfumería, farmacia, confitería y alimentación. Vivamente competido por el celofán o sus imitaciones.

**Papel de estraza:** Papel fabricado principalmente a partir de papel recuperado (papelote) sin clasificar.

**Papel de guarda:** papel usado para encuadernar la cubierta de un libro a sus páginas interiores. Son papeles que tienen gran resistencia al plegado y al rasgado. Por lo general, se usan papeles con color y textura.

**Papel de impresión y escritura:** la aptitud de un papel para ser un buen soporte para la impresión o la escritura depende en gran medida del espesor del papel, de la humedad, de la cantidad de cola y del tipo de pasta con el que se ha producido el papel. Existe gran variedad de productos con diversas texturas, colores, grosores, etc., cuya composición varía desde el papel producido con pasta mecánica hasta papeles de gran calidad fabricados con celulosa pura, pudiendo distinguir entre los siguientes tipos genéricos: papel para fotocopidora, papel continuo, autocopiativo, vegetales, “kraft”, cartulina, cuché, alto brillo, etc., con gramajes comprendidos entre los 50 y 90 g/m<sup>2</sup> en papeles para impresión y entre los 100 y los 320 g/m<sup>2</sup> en cartulinas y papeles de impresión de calidad superior. También se suele utilizar papel recuperado como materia prima para producir papel reciclado que se destina a este tipo de usos.

**Papel de seguridad:** papel con una trama impresa o con un sello de agua visible o invisible, especial para documentos de seguridad, como por ejemplo cheques. Ideal para revelar cualquier intento de adulteración o alteración por medios químicos o físicos.

**Papel de valores:** papel de seguridad que tiene la propiedad de ser resistente al plegado y al frotamiento superficial. Es un papel de alta calidad producido con celulosa blanqueada y con pasta de trapo, que suele tener un encolado superficial para mejorar la calidad de la superficie. Se emplea en papel de imprimir para títulos valores, seguros, cheques, billetes, etc.

---

**Papel ecológico:** papel que en su proceso de fabricación utiliza métodos no contaminantes. El producto final es biodegradable, por lo que resultan inocuos para el medio ambiente por su degradación natural.

**Papel estucado (“cuché”):** papel base (“bond”) recubierto con capas de estuco que otorga mejor apariencia e imprimibilidad. Se usa para impresiones de alta calidad y receptividad única de la tinta. Existen en varias terminaciones: mate, brillante, semibrillo, alto brillo. Estas capas de estuco pueden ser aplicadas por una cara (“monolúcido”) o ambas caras del papel (“bilúcido”).

**Papel libre de ácido:** en principio, cualquier papel que no contenga ningún ácido libre. Durante su fabricación se toman precauciones especiales para eliminar cualquier ácido activo que pueda estar en la composición, con el fin de incrementar la permanencia del papel acabado. La acidez más común proviene del uso de aluminio para precipitar las resinas de colofonia usadas en el encolado, de los reactivos y productos residuales del blanqueo de la pasta (cloro y derivados) y de la absorción de gases ácidos (óxidos de nitrógeno y azufre) de atmósferas contaminadas circundantes. Un proceso de fabricación de papel ácido es incompatible con la producción de papeles duraderos. Es un papel que no contiene ácido, es fabricado con pH neutro. Se usaba originalmente para los archivos permanentes y para proteger a otros materiales que cuando entraban en contacto con la acidez del papel, resultaban dañados. Este tipo de papel es empleado en ediciones limitadas y material de archivo. Incrementa la longevidad del papel terminado.

**Papel para envases y embalajes:** los envases y embalajes representan casi el 50% del consumo de papel (datos del año 1999) que, en los últimos 10 años, ha aumentado un 44%, incluso a pesar de que los sacos de papel y el cartón ondulado son cada vez más ligeros (en el mismo período han reducido un 20% su peso). Se emplean diferentes papeles para embalajes, pudiendo realizar una clasificación entre: **cartón gris, cartón ondulado, cartón compacto y papel “kraft”**.

**Papel pergamino:** actualmente el término se usa para denotar un tipo de terminación que imita el pergamino (hoja hecha con piel de animal).

**Papel permanente:** un papel que puede resistir grandes cambios físicos y químicos durante un largo periodo de tiempo (varios cientos de años). Este papel es generalmente libre de ácido, con una reserva alcalina y una resistencia inicial razonablemente elevada. Tradicionalmente la comunidad cultural ha considerado crucial usar fibras de alta pureza (lino o algodón) para asegurar la permanencia del papel. Hoy día, se considera que se ha de poner

---

menos énfasis en el tipo de fibra y más sobre las condiciones de fabricación. Un proceso de fabricación ácido es incompatible con la producción de papeles permanentes.

**Papel reciclado:** papel que parte de su composición, sino su totalidad, contiene fibras de papel que ha sido impreso o que incluye fibras de recortes y de encuadernación.

**Papel similsulfurizado:** papel exento de pasta mecánica que presenta una elevada resistencia a la penetración por grasas, adquirida simplemente mediante un tratamiento mecánico intensivo de la pasta durante la operación de refinado, que también produce una gelatinización extensiva de las fibras. Su porosidad (permeabilidad a los gases) es extremadamente baja. Se diferencia del sulfurizado verdadero en que al sumergirlo en agua, durante un tiempo suficiente, variable según la calidad, el similar pierde toda su resistencia mientras que el sulfurizado conserva su solidez al menos en parte.

**Papel sulfurizado (verdadero):** papel cuya propiedad esencial es su impermeabilidad a los cuerpos grasos y, asimismo, una alta resistencia en húmedo y buena impermeabilidad y resistencia a la desintegración por el agua, incluso en ebullición. La impermeabilización se obtiene pasando la hoja de papel durante unos segundos por un baño de ácido sulfúrico concentrado (75%, 10°C) y subsiguiente eliminación del ácido mediante lavado. Al contacto con el ácido, la celulosa se transforma parcialmente en hidrocélulosa, materia gelatinosa que obstruye los poros del papel y lo vuelve impermeable.

**Papel tisú:** papel de bajo gramaje, suave, a menudo ligeramente crespado en seco, compuesto predominantemente de fibras naturales, de pasta química virgen o reciclada, a veces mezclada con pasta de alto rendimiento (químico-mecánicas). Es tan delgado que difícilmente se usa en una simple capa. Dependiendo de los requerimientos se suelen combinar dos o más capas. Se caracteriza por su buena flexibilidad, suavidad superficial, baja densidad y alta capacidad para absorber líquidos. Se usan para fines higiénicos y domésticos, tales como pañuelos, servilletas, toallas y productos absorbentes similares que se desintegran en agua. El papel tisú es un término utilizado para servilletas, manteles, papel higiénico, papel de cocina, etc.

**Papeles especiales:** representan el 9,9% del consumo de papel (datos del año 1999). Estos papeles son utilizados para diferentes usos específicos como la producción de sellos, de papeles de seguridad, papeles para la alimentación o papeles de alta tecnología.

### 1.5. CARACTERÍSTICAS DEL PAPEL PARA ONDULAR

La utilización del cartón ondulado para la fabricación de embalajes y otras finalidades, es hoy tan difundida y aceptada por nuestra sociedad de consumo, que su uso ha llegado a convertirse en un producto indispensable. Tuvo un tímido comienzo a finales del siglo XIX, utilizándose como simple material de protección de frascos de vidrio, enlatados y frutas “in natura”. Con el tiempo se fue ampliando gradualmente su campo de aplicación y hoy, tras 120 años de su aparición tiene múltiples usos: desde pequeñas cajas para productos farmacéuticos hasta embalajes para mercancías pesadas, como neveras, televisores, lavadoras, lozas, etc.. También cubre otros campos como la fabricación de “pallets” para transporte y carga de productos varios, formas perdidas para estructuras de hormigón armado, muebles, decoración, etc. Su importancia es tal, que sus niveles de producción y consumo son utilizados como parámetros de bastante precisión para medir el empuje económico de una nación, indicando también los cambios de situaciones y las probables tendencias del mundo moderno. Consecuentemente, con el aumento de la importancia que la industria ha alcanzado en todo el mundo, ha crecido la atención dedicada para optimizar las propiedades de su materia prima básica: papel (18).

Al comienzo del siglo XXI se hace bien visible la sistemática reducción de los recursos vegetales destinados a la producción de celulosa. Esto origina que esta materia prima básica se escasee en ciertas ocasiones, y con precios en sostenido aumento, razón por la cual los fabricantes de papel capa y “medium” para el cartón ondulado, están usando papelote cada vez en mayor proporción en sus recetas de fabricación, con la finalidad de reducir sus costos y reservar la celulosa virgen para la fabricación de papeles más nobles y de precio más elevado. La sustitución en porcentajes variables de fibras celulósicas vírgenes por fibras recicladas ocasiona una disminución de la calidad del ondulado, principalmente en cuanto a su resistencia al estallido y al aplastamiento, dos valores que en la práctica definen la calidad del ondulado y consecuentemente su precio de venta. El cartón ondulado es una estructura formada por uno o más elementos ondulados (“medium”) fijados a uno o más elementos planos (capas: “liner”), por medio de un adhesivo depositado sobre la parte superior de las ondas, como se indica en la figura 8, que representa los tipos más comunes de cartón ondulado utilizados en el mercado (18).

El comportamiento del papel en la máquina corrugadora es un proceso muy complicado, en el que intervienen tanto fenómenos de transferencia de masa y energía, así como físico químicos dentro del medio. La constitución completa del papel impide o dificulta los



supuestos de continuidad e isotropía, los cuales son la base para los modelos matemáticos (19).

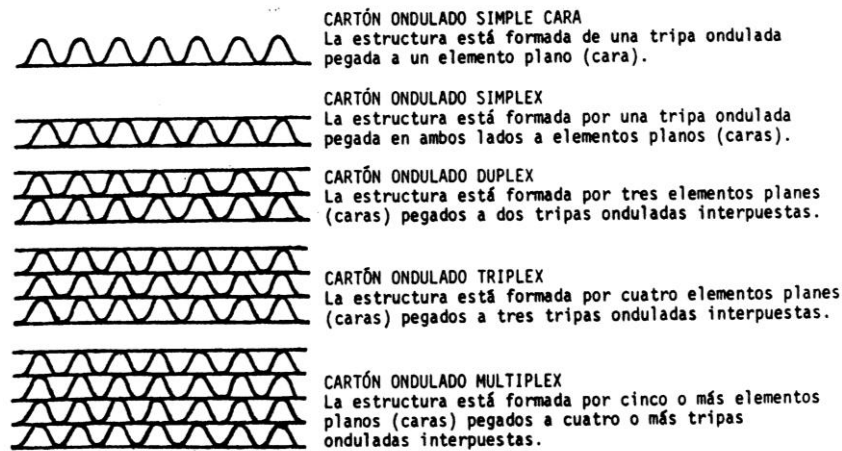


Figura 8 – FUENTE: (18)

El papel para corrugar debe satisfacer tres características fundamentales (19):

1. Ser apto para soportar la velocidad y condiciones del proceso de fabricación (“runnability”), esto se aplica generalmente al papel para corrugar, ya que éste se somete a violentos esfuerzos mecánicos para producir deformaciones en su estructura;
2. Ser capaz de producir un cartón que satisfaga su aptitud de uso (“convertibility”);
3. Ser económicos: bajo costo de producción (“profitability”).

Desde el punto de vista estructural, el cartón ondulado es parecido a otras construcciones. Por ejemplo, en una construcción metálica son utilizadas columnas y vigas fabricadas con chapas planas externas, vinculadas por perfiles transversales que confieren la rigidez necesaria al conjunto (18).

El “liner” tiene dos caras, una satinado (lisa) que sirve para portar la impresión de algún mensaje (leyenda comercial, logotipo, etc.); en tanto que la segunda cara es porosa (capacidad de absorción de agua), lo cual aunado a la temperatura ayuda a tener buena unión con el pegamento que acompaña al papel “medium”. Así mismo, este papel proporciona resistencia a la explosión y sufre esfuerzos mecánicos de tracción. El incrementar la temperatura del proceso favorece el anclaje del adhesivo y facilita la movilidad de las moléculas de agua en el papel. Estos papeles durante o proceso de pegado con el ondulado deben soportar un esfuerzo mecánico para arrastrar la hoja venciendo las fuerzas de fricción, por lo que se demanda que

este papel tenga una resistencia a la ruptura mayor que la correspondiente fuerza de tracción (19). Los factores que afectan al pegado del “liner” son: encolado del papel (ensayo “Cobb”), humedad, temperatura y porosidad (20).

La tabla I muestra un ejemplo de **especificaciones** para papel “testliner” (53).

<b>Peso Básico</b>	Estándar	127	140	150	180	205	270
Tappi T410 (g/m <sup>2</sup> )	Mínimo	124	137	146	175	200	262
	Máximo	130	143	154	185	210	278

		127	140	150	180	205	270
<b>Humedad</b>	Estándar	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5
Tappi T412 (%)	Mínimo	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
	Máximo	8.5	8.5	8.5	8.5	9.0	9.0

		127	140	150	180	205	270
<b>Rigidez CD</b>	Estándar	20	23	26	32	40	48
Tappi T818 (Kg)	Mínimo	17	20	22	28	36	46

		127	140	150	180	205	270
<b>Mullen</b>	Estándar	55	56	65	70	75	88
Tappi T403 (PSI)	Mínimo	50	51	58	63	68	85

		127	140	150	180	205	270
<b>Cobb (120 seg.)</b>	Estándar	40	40	40	40	40	40
Tappi T441 (g/m <sup>2</sup> )	Mínimo	30	30	30	30	30	30

Tabla I – FUENTE: (53)

Con respecto al papel “medium”, éste deberá tener las siguientes propiedades (19):

- Debe tomar lo más fielmente posible la forma del canal;
- Permitir al adhesivo penetrar en él, en la cantidad y profundidad suficiente para lograr un buen pegado;
- No debe producir rupturas en las crestas;
- No debe formar ondulaciones consecutivas de altura variable;
- A la salida de la máquina corrugadora, el papel ya corrugado y pegado debe quedar dentro de su campo elástico, es decir, que recupere su forma tras cualquier deformación.

La tabla II muestra algunas especificaciones para un papel corrugado medio (“medium”) (53).

<b>Peso Básico</b>	Estándar	<b>110</b>	<b>127</b>	<b>146</b>	<b>150</b>	<b>160</b>	<b>176</b>	<b>195</b>
Tappi T410 (g/m <sup>2</sup> )	Mínimo	107	124	142	146	155	172	190
	Máximo	113	130	150	154	165	180	200
		<b>110</b>	<b>127</b>	<b>146</b>	<b>150</b>	<b>160</b>	<b>176</b>	<b>195</b>
<b>Humedad</b>	Estándar	7.0	7.0	7.0	7.0	7.5	7.5	7.5
Tappi T412 (%)	Mínimo	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
	Máximo	8.0	8.0	8.0	8.0	9.0	9.0	9.0
		<b>110</b>	<b>127</b>	<b>146</b>	<b>150</b>	<b>160</b>	<b>176</b>	<b>195</b>
<b>Concora (CMT)</b>	Estándar	22.7	29.1	32.7	32.7	34.5	36.4	39.5
Tappi T809 (Kg)	Mínimo	20.5	26.4	30.0	30.0	31.8	33.6	36.8
		<b>110</b>	<b>127</b>	<b>146</b>	<b>150</b>	<b>160</b>	<b>176</b>	<b>195</b>
<b>Rigidez CD</b>	Estándar	14.0	20.0	25.5	25.5	29.5	34.5	40.0
Tappi T818 (Kg)	Mínimo	13.6	17.7	22.7	22.7	26.8	31.4	36.4
		<b>110</b>	<b>127</b>	<b>146</b>	<b>150</b>	<b>160</b>	<b>176</b>	<b>195</b>
<b>CFC-O(CCT)</b>	Estándar	28.0	34.1	39.5	39.5	43.6	47.2	52.7
Tappi T824 (Kg)	Mínimo	25.2	31.8	36.8	36.8	40.4	44.1	49.1
		<b>110</b>	<b>127</b>	<b>146</b>	<b>150</b>	<b>160</b>	<b>176</b>	<b>195</b>
<b>Absorción</b>								
Tappi T819 A2 (s)	Máximo	200	200	200	200	200	200	200

Tabla II – FUENTE: (53)

Toda caja de cartón ondulado dará su mejor cometido cuando su contenido resulte adecuadamente protegido, y el cartón ondulado cumplirá su mejor función cuando el “medium” continúe íntimamente ligada a las capas separándolas entre sí. Para la producción de una caja de cartón ondulado de calidad es necesario el uso de papel capa y “medium” de calidad. No obstante, utilizando los mismos componentes de alta calidad, se puede llegar a producir una caja mediocre debido a factores adversos durante el proceso de fabricación, como por ejemplo: presión excesiva en la onduladora, baja adhesividad, desalineamiento, etc. Así, para la producción de cajas de calidad, la eficiencia de conversión de la fábrica de embalajes y la calidad final del producto obtenido son determinadas por las materias primas y por los métodos de producción utilizados (18).

Un buen cartón ondulado debe reunir básicamente las siguientes cualidades: resistencia, flexibilidad, resiliencia, lisura, espesor uniforme, y superficie plana. Sin embargo, la naturaleza de sus componentes, capas, “medium” y adhesivo, y lo acontece durante el proceso de fabricación y períodos subsiguientes, conspiran para distorsionar la “medium” ondulada en uno o más sentidos, tomando una forma curvada, en lugar de la forma plana ideal. La placa de cartón llega a veces a ser inutilizable (18).

La figura 9 muestra los diversos tipos de deformaciones normalmente observados durante la producción de cartón ondulado. El más frecuente es la deformación o curvatura hacia arriba (deformación normal). Estas deformaciones, cuando ocurren, **impiden el apilamiento automático de las placas**, debiendo ser realizado entonces manualmente colocando las placas alternadas en la expectativa de que estas sean aplanadas por el efecto del propio peso acumulado. Este tipo de defecto también dificulta bastante el trabajo en las flexoimpresoras, aumentando los porcentajes de pérdidas y rechazos. Por otra parte, las cajas fabricadas con cartón ondulado curvado, pueden salir fuera de escuadra y perjudicar su resistencia al apilamiento. Las causas que originan estas deformaciones son varias, interrelacionadas y complejas, aunque pueden ser reducidas a una sola: desequilibrio (18).

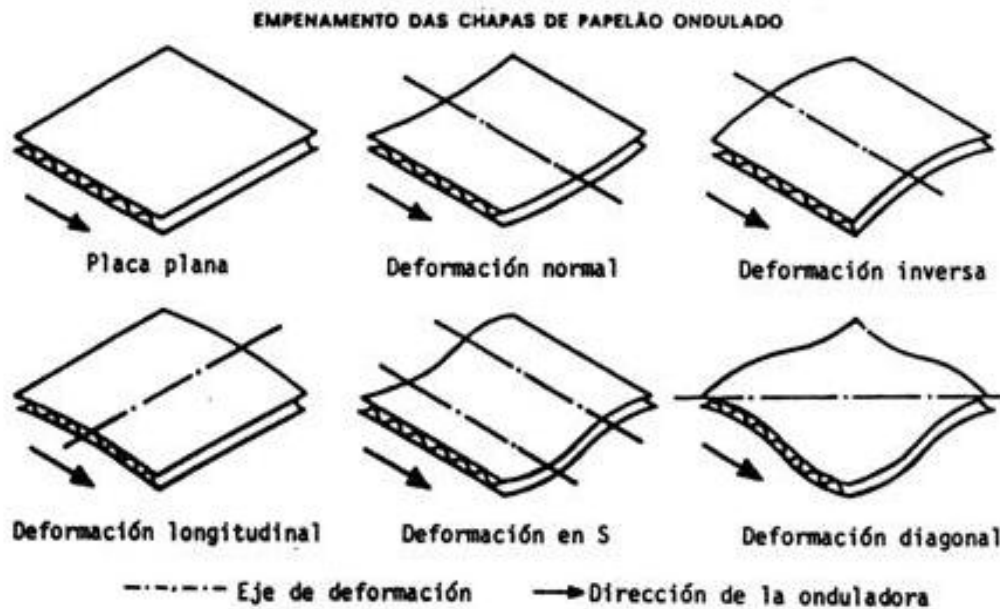


Figura 9 – FUENTE: (18)

Todos los tipos de deformaciones en las placas son causadas por diferencias dimensionales de sus partes componentes, y en especial de las capas, ya que si una de las caras tiene una mayor o menor expansión que la otra, ocurrirá fatalmente la deformación de la placa. El papel, por su propia naturaleza, es dimensionalmente inestable, se expande al recibir humedad y se contrae al perderla. Esta propiedad del papel varía con el tipo de celulosa utilizada en su fabricación, gramaje, tipo de acabado superficial y contenido de humedad. Las variaciones de estos valores ocurren de una bobina a otra, y también dentro de una misma bobina. Los papeles más pesados y gruesos tienen una mayor estabilidad dimensional que los más finos. Los cartones ondulados con capas de diferentes gramajes sufren una tendencia

natural a curvarse. Durante la fabricación del papel, se generan en la hoja en formación algunas tensiones creadas a su paso a través de las prensas, secadores y calandras. Durante su paso por la onduladora, cuando el papel es sometido a la acción del calor, humedad y presión, estas tensiones son liberadas, apareciendo contracciones y expansiones prácticamente imprevisibles. La práctica indica que en la mayor parte de las onduladoras, una diferencia de hasta 3% de humedad entre las capas, como por ejemplo 5 y 8%, no ocasiona problemas. Diferencias mayores dan lugar a deformaciones en la dirección de la capa más húmeda muchas veces inaceptables. El contenido de humedad de la “medium”, dentro de los límites de un 5 a 9% no presenta efectos medibles sobre las deformaciones. La fábrica de cartón ondulado debe utilizar bobinas cuya humedades sean aproximadamente iguales para la producción de las capas (18).

Otro factor importante en el cartón ondulado es su resistencia al achatamiento o aplastamiento. Un valor alto de este test esencial para la protección de los productos embalados, sirve también para indicar su grado de rigidez. Se entiende por aplastamiento, la resistencia ofrecida por el papel “medium” ondulado, sometido a una presión creciente perpendicular a su superficie, a través de un aparato específico conocido como Cónora “medium” Test, evitando movimientos laterales de las capas. La figura 10 muestra una placa de cartón ondulado lista para el test y la diferencia ocasionada entre una onda de buena calidad y otra deficiente (18).



Figura 10 – FUENTE (18)

Un alto índice de aplastamiento (expresado en  $\text{kg/cm}^2$ ) indica una “medium” de buena calidad y buenos procesos de fabricación. El “medium” de buena calidad se obtienen con celulosas de buena calidad. No obstante, como se ha expuesto más arriba, la carencia de fibras vírgenes y sus altos costos están induciendo a los fabricantes de “medium” a acudir cada vez más al uso de papeles reciclados, surgiendo entonces algunas exigencias que pueden ser agrupados básicamente como sigue (18):

- Necesidad de obtener una desfibración adecuada de las fibras de los papeles viejos e intentar realizar un refinado con el mínimo efecto de corte sobre las mismas, evitando la formación de finos;
- Establecer un adecuado control y eliminación de los finos y coloides en la masa para minimizar los problemas de desgote en la mesa plana, roturas de la hoja en las prensas húmedas y excesiva higroscopia en la hoja acabada;
- Obtener una adecuada resistencia en seco de la hoja acabada para que presente valores del “Cóncora Medium Test” iguales o superiores a  $3,85 \text{ kg/cm}^2$ ;
- Mantener bajos y competitivos los costos de producción.

Algunos testes del control de calidad del cartón corrugado relacionados con el “medium” y el “liner” (36):

#### Gramaje del papel y del cartón

Es la cantidad de masa de papel o cartón por unidad de superficie (generalmente, un metro cuadrado). Con una humedad constante, todas las características mecánicas del cartón corrugado aumentan con el gramaje de los componentes.



Equipo: balanza electrónica y corta probetas.

Figura 11 – FUENTES: (36)

#### Calibre del papel y del cartón



Equipo: medidor de espesor.

Figura 12 – FUENTES: (36)

Es el espesor del cartón, dado a su vez por el espesor de los papeles componentes y el tipo de flauta (calibre de la onda) usada. Permite el control en diferentes etapas de la fabricación, en máquina corrugadora y durante el proceso de conversión. Influye sobre la resistencia al apilamiento de la caja.

#### Prueba de compresión del anillo (RCT o Ring Crush Test)

El RCT es la prueba de resistencia más utilizada para papeles “liner”. Este ensayo indica la contribución individual de los papeles en la resistencia a la compresión vertical del cartón (ECT) y por lo tanto, sobre la resistencia al apilamiento de la caja.



Equipo: “crush tester”  
Figura 13 – FUENTES: (36)

#### Humedad del papel y del cartón

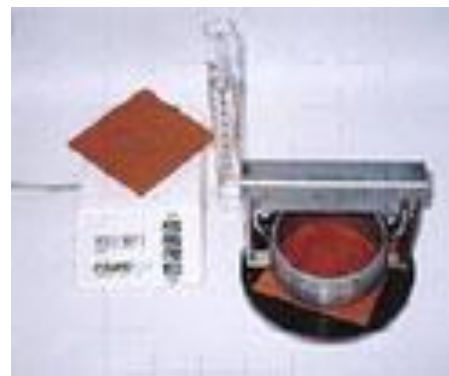
Se expresa en porcentaje, por la relación que hay entre la cantidad de agua que contiene el papel (o cartón) y su peso. Todo cambio de equilibrio de humedad entre la atmósfera y el papel (o cartón) conduce a cambios dimensionales y variación de sus propiedades mecánicas.



Equipo: “analizador de humedad”.  
Figura 14 – FUENTES: (36)

#### Prueba de absorción del agua (Cobb test)

Cantidad de agua absorbida por 1 m<sup>2</sup> de papel luego de un determinado tiempo en contacto con el agua. Influye sobre la absorción de tintas flexográficas durante el proceso de impresión, la penetración del adhesivo de corrugado y la absorción de humedad. Su valor depende del grado de encolado del papel, porosidad, tratamientos superficiales etc.



Equipos: Aparato “Cobb” y balanza”.  
Figura 15 – FUENTES: (36)

#### Resistencia a la compresión horizontal (FCT)

Es una medida de la rigidez de la onda del cartón corrugado. Este ensayo determina la calidad general del cartón y la resistencia del fondo de la caja. Altos valores de FCT indican la combinación de una buena formación de flautas y un médium con la resistencia adecuada. Equipo: “crush tester”.

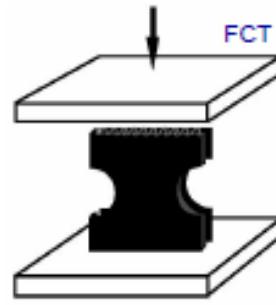


Figura 16 – FUENTE: (37)

#### Resistencia a la compresión vertical (ECT)

Indica la resistencia a la compresión provocada por una carga ejercida sobre el canto o sección del cartón corrugado, paralela a las ondulaciones. Equipo: “crush tester”.

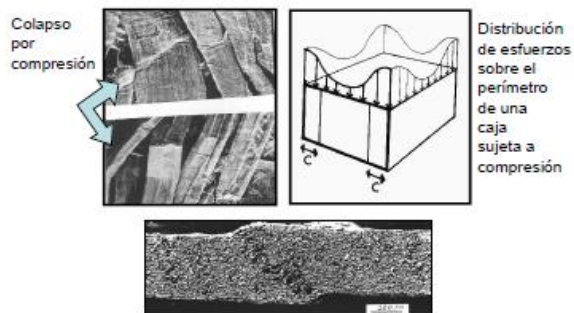


Figura 17 – FUENTE: (37)



## 2. COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS RECURSOS FIBROSOS: CELULOSE, HEMICELULOSAS, LIGNINA, EXTRACTIVOS

La maderas usadas en la industria de pulpa poseen la siguiente composición media: celulosa -  $\approx$  50%; lignina - 15 a 35%; hemicelulosas -  $\approx$  20%; extraíbles - 3 a 10%; inorgánicos -  $\approx$  0,5% (figura 18) (16)(24).

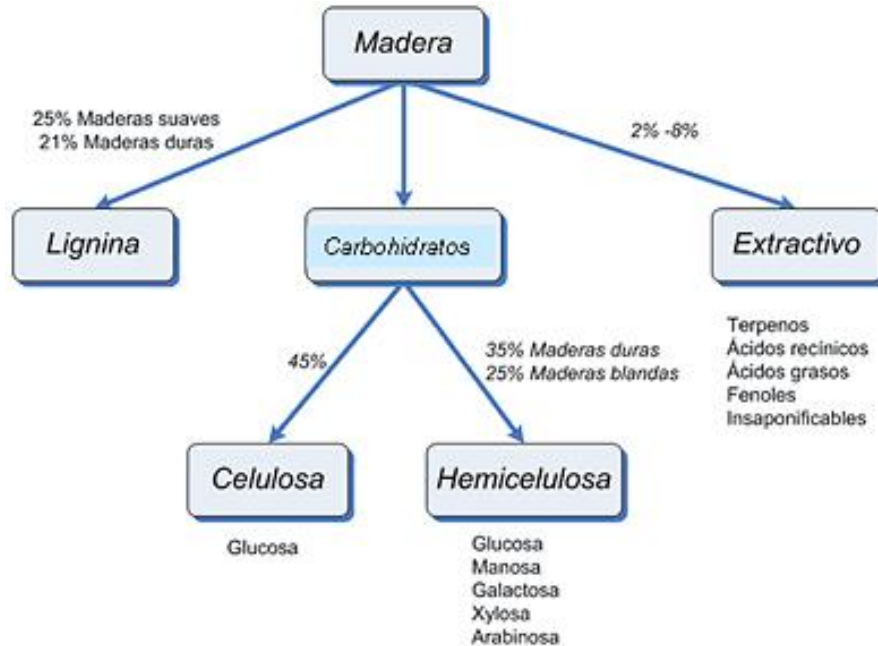


Figura 18 – FUENTE: (4)

### 2.1. DEFINICIONES:

#### Celulosa

Celulosa es el homopolisacárido que se encuentra en mayor proporción en la madera, es una estructura básica de las células de las plantas y la sustancia más importante producida por este organismo vivo, siendo el principal componente de la pared celular. La celulosa consiste en unidades de anhidro- $\beta$ -D(+) glucopiranososa en conformación C1, unidos por enlaces glicosídicos  $\beta$ -1-4, por lo que se puede describir como un polímero lineal de glucanos (figura 19). La unidad estructural de la celulosa es la celobiosa (disacárido) con una longitud de 1,03nm. El grado de polimerización es del orden de los 15,000, lo que equivale a una masa molar en el orden de los 2,3 millones. Debido al tipo de enlace ( $\beta$ -1-4) la molécula de celulosa tiene una forma lineal, estabilizada por la formación de numerosos puentes de hidrógeno intracadenales e intercadenales (25).

Entre 40 y 70 moléculas se encuentran agrupadas en fibrillas elementales de un espesor de 3,5 y 7,5 nm y una longitud de varios  $\mu\text{m}$ . En ellas las moléculas de celulosa están orientadas longitudinalmente formando un agregado cristalino fuertemente ordenado, en el que todas las moléculas presentan la misma polaridad, lo que indica que tienen su extremo reductor orientado hacia el mismo extremo de la microfibrilla. En estos agregados las moléculas de celulosa no están unidas covalentemente, estabilizándose su estructura solamente por puentes de hidrógeno (C3-C6) y (C2-C5), que aunque muy débiles individualmente, su elevado número hace de la fibra de celulosa una estructura muy firme y poco sensible a la degradación. Las microfibrillas construyen las macrofibrillas y estas a su vez las fibras de celulosa (figura 20)(25).

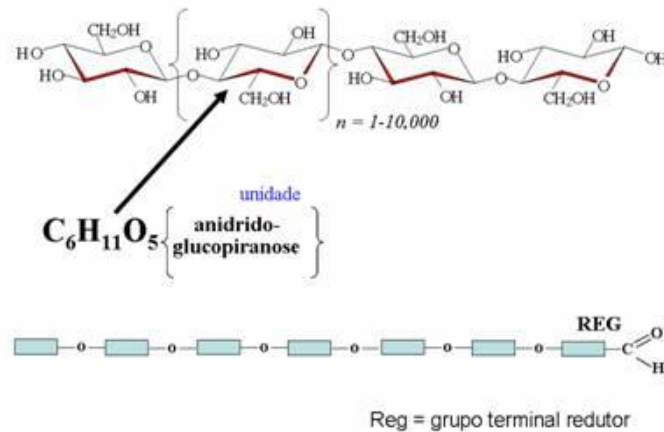


Figura 19 – FUENTE (7)

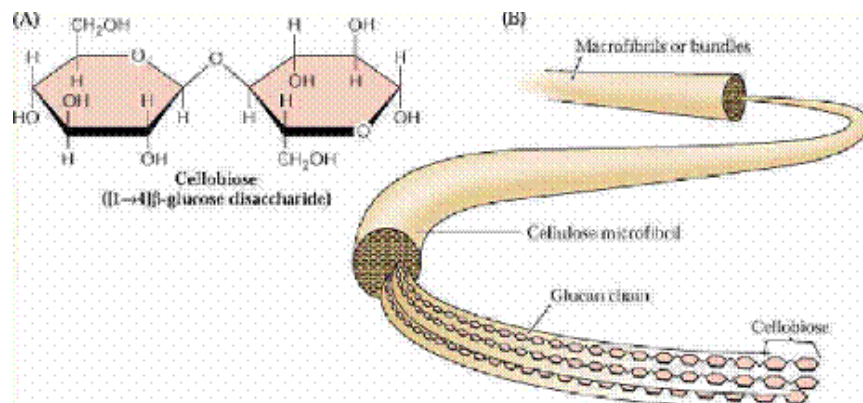


Figura 20 – FUENTE (7)

### Hemicelulosas o poliosas

Además de la celulosa varios otros polisacáridos están en la madera y otros tejidos de las plantas. Todos los polímeros no celulósicos serán llamados hemicelulosas o poliosas. Las poliosas difieren de la celulosa en: están compuestas por más de un azúcar (figura 21), las

cadena molecular son más cortas y poseen ramificaciones o grupos unidos a la cadena principal. Los azúcares que constituyen las poliosas pueden subdividirse en grupos tales como: hexosas, pentosas, ácidos urónicos y deoxi-hexosas. La cadena principal de una poliosa puede consistir de solamente un tipo de monómeros (azúcares) , en cuyo caso es un homopolímero, como por ejemplo los xilanos; o por más de dos tipos de monómeros denominándose heteropolímero por ejemplo: los galactoglucomananos (figura 22)(16)(25). La figura 23 muestra las poliosas y su relación con la microfibrillas.

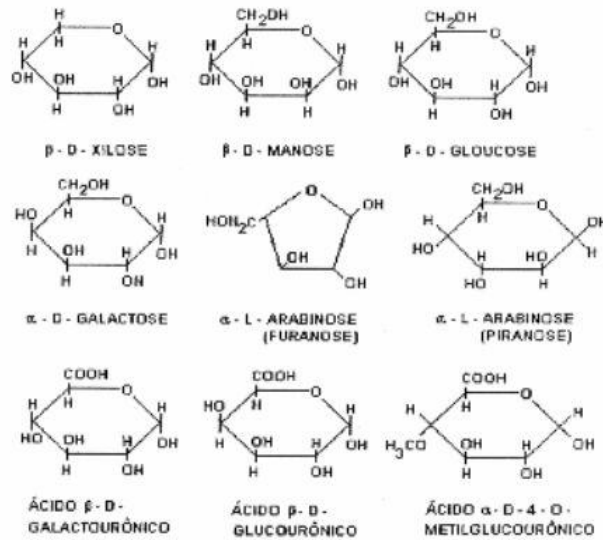


Figura 21 – FUENTE: (7)

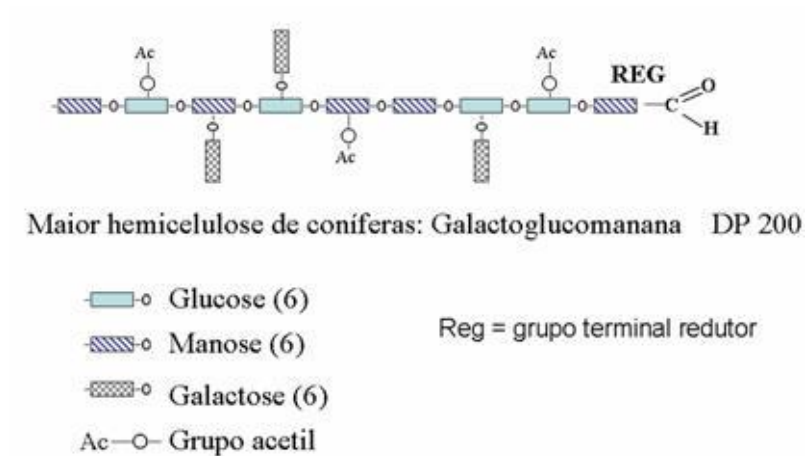


Figura 22 – FUENTE (7)

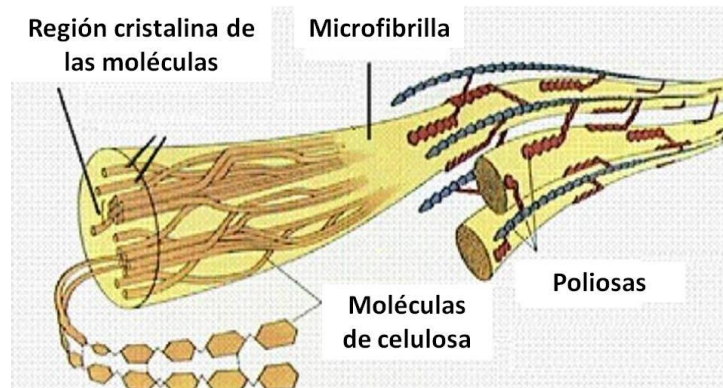


Figura 23 – FUENTE (7)

### Lignina

Es una macromolécula componente de la madera (figura 24), de naturaleza de polímero especial, formada por la polimerización deshidrogenativa al azar de alcoholes parahidroxicinámicos (alcohol p-cumarílico, alcohol coniferílico y alcohol sinapílico), en reacción catalizada por enzimas vía radicales libres. Las unidades de fenil propano (C<sub>9</sub>) se unen por enlaces C-O-C y C-C, presentando en su estructura grupos hidroxilos, carbonilos, metoxilos y carboxilos. Las ligninas son fracciones no carbohidratadas de la madera libre de extraíbles, extremadamente complejas y difíciles de caracterizar. Constituyen un polímero aromático, heterogéneo, ramificado, donde no existe ninguna unidad repetida definidamente. Las ligninas de la madera se clasifican en lignina de madera de coníferas, lignina de madera de latifolias (25).

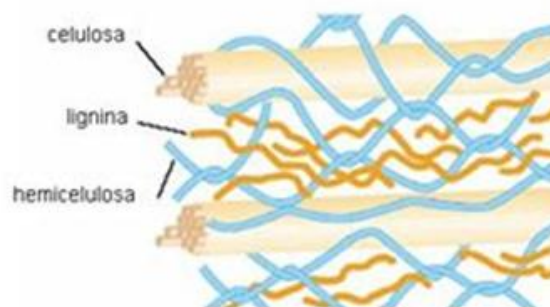


Figura 24 – FUENTE: (4)

### Extraíbles

Existen numerosos compuestos que pueden tener gran influencia en las propiedades y calidad de la madera, aunque ellos contribuyan sólo en algún porcentaje en la masa total de la madera. A este grupo de compuestos se les denomina comúnmente sustancias extraíbles de la

madera. Los componentes químicos aquí presentes son de diferentes clases y pueden ser divididos a su vez, y de forma más simple en componentes orgánicos y componentes inorgánicos, siendo estos últimos en los que se puede encontrar ciertos iones metálicos que son esenciales para el normal desarrollo del árbol. Entre los compuestos orgánicos se pueden encontrar hidrocarburos alifáticos y aromáticos, alcoholes, fenoles, aldehídos, cetonas, ácidos alifáticos, ceras, glicéridos, y compuestos nitrogenados (25).

### **Inorgánicos**

Los componentes inorgánicos o sustancias minerales, varían en el árbol en dependencia de la parte que se estudie: Altos contenidos pueden encontrarse en las hojas, ramas, corteza, raíces, por lo que es común encontrar diferencias entre las maderas de latifolias y las de coníferas; diferencias existen entre la madera joven y la tardía. Las condiciones del suelo y la edad influyen en los contenidos de sustancias minerales (25).

## **3. ESTRUCTURA DE LOS PAPELES: FIBRAS CELULÓSICAS, MORFOLOGIA, TIPOS, FUENTES DE OBTENCIÓN (PROCESOS DE PULPADO: TIPOS PRINCIPALES, CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE LOS PROCESOS Y DE LOS PRODUCTOS; FIBRAS RECICLADAS)**

### **3.1. FIBRAS UTILIZADAS PARA LA PRODUCCIÓN DE PAPEL**

La materia prima fundamental para fabricar papel es la holocelulosa (celulosa y hemicelulosas). Las fibras de celulosa son un constituyente esencial de los tejidos vegetales, cuya función es la de dar resistencia a los mismos. La holocelulosa para la fabricación de papel se obtiene principalmente de madera (75%), de otras fibras vegetales denominadas no madereras (9%) y de papel recuperado (16%) (21).

La fibra es un material vegetal que desde sus inicios se extraía de plantas como el algodón, la cebada, el lino, etc. A partir del siglo XIX, se comenzó a usar la madera que es el material de celulosa de mayor importancia en la actualidad. En consecuencia, cualquier compuesto que contenga celulosa en un porcentaje adecuado, puede ser útil para la fabricación del papel (43).

De acuerdo a su origen, la pasta de celulosa se clasifica en fibra larga (coníferas o “softwood”) y fibras cortas (frondosas o “hardhood”). Entre las maderas de fibra larga

destacan diferentes especies de pinos (*Pinus elliotti*, *P. taeda*) y abetos mientras que en fibras corta encontramos varias especies de eucaliptos (*Eucalyptus grandis*, *E. saligna*, *E. urophylla*, *E. globulus*), abedules y álamos. Todas ellas presentan características comunes como su abundancia y dispersión geográfica, su renovabilidad y su susceptibilidad al procesamiento con las tecnologías actuales. La figura 25 muestra las principales diferencias entre fibras de maderas de frondosas y coníferas (42).

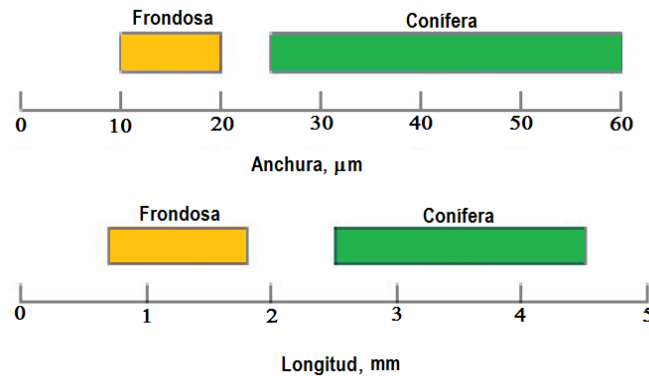


Figura 25 – FUENTE: (42)

La fibra larga le aporta ciertas cualidades específicas al papel, como por ejemplo: alta resistencia y rigidez; alta propiedad mecánica (mayor resistencia para acuñar y troquelar, entre otros)(43).

La fibra le aporta las siguientes cualidades estéticas al papel: propiedades visuales y táctiles a la superficie; superficie más pareja. Ambos tipos de fibras se utilizan en la fabricación del papel, mezclándose convenientemente según sea el tipo de papel que se desea obtener (43).

En función de la materia prima para fabricación de pasta de celulosa, se obtienen distintas propiedades. Por este motivo, y para mejorar las prestaciones de los productos acabado es habitual realizar mezclas para aprovechar las ventajas de la fibra larga (determinadas propiedades mecánicas, mayor susceptibilidad al procesamiento mecánico), con las de la fibra corta (mejores propiedades superficiales e de formación)(42).

### 3.2. MORFOLOGIA DE LA FIBRA

La estructura química de los constituyentes de la membrana celular es discutida con detalle dentro de la parte de química papelera que hace referencia a los constituyente vegetales. La mayoría son macromoléculas, de las cuales sólo la celulosa es enteramente

lineal y posee una cierta rigidez aún en solución molecular. En contraste, las hemicelulosas y la lignina, que forman una estructura amorfa incrustando la pared celular, las moléculas de celulosa forman un marco con una estructura lineal y parcialmente cristalina. La hemicelulosas están estructuralmente más relacionadas con la celulosa, se han depositado en un estadio anterior a la lignina, e están más íntimamente ligadas a la celulosa. Los agregados de celulosa son de una longitud indefinida y de anchura variable (22).

Existen unas estructuras de 250 Å de anchura que se llaman microfibrillas, que están formadas por agregados llamados fibrillas elementares de una anchura de unos 100 Å y espesor de 30 Å separados por zonas de menor cristalinidad. La disposición de esta red elemental es distinta en los diferentes sitios de la fibra y contribuye a que se presenten cambios a través de la distintas capas de la pared células. Otra característica importante son las variadas proporciones de los componentes químicos que serán examinados enseguida. Como las traqueidas de las maderas blandas y las fibras libriformes de las maderas duras son las células más frecuentes, desde el punto de vista papelerero nos limitamos a su estudio. Hay que decir que a pesar de las diferencias grandes que existen en las dimensiones groseras de estas fibras, la estructura de sus paredes es muy similar.

La organización típica de una fibra vegetal se muestra en la figura 26 y se observa que entre las fibras existe una región denominada lámela media, "sustancia intercelular", la cual esta constituida principalmente por lignina y sustancias pépticas. La pared primaria P contiene una red organizada en forma suelta y aleatoria de microfibrillas de celulosa embebidas en una matriz de hemicelulosas parcialmente orientadas (22).

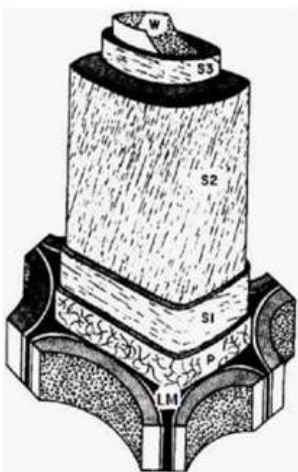


Figura 26 – FUENTE (7)

Inmediatamente bajo la pared primaria está la pared secundaria, la que constituye casi la totalidad de la pared celular. La pared secundaria está dividida en tres capas denominadas S1, S2 y S3. La capa exterior de la pared secundaria S1 presenta un patrón entrecruzado de microfibrillas. La capa S2 ocupa la mayor parte del volumen de la pared celular, en esta parte las microfibrillas están orientadas en forma casi paralela al eje de la fibra. En la capa delgada S3 las microfibrillas forman una hélice plana en dirección transversal (28).

El espesor relativo de estas capas ha sido medido para traqueidas de picea, habiéndose encontrado: P: 7-14 %; S1: 4-11 %; S2: 74-84 %; S3: 3-4 % (22).

### 3.3. FUENTES DE OBTENCIÓN DE LAS PULPAS

Para la obtención del papel, es necesaria la obtención de la suspensión de fibras celulósicas con unas características determinadas en cuanto a tamaño de fibras, distribución de tamaños, composición, flexibilidad, resistencia, etc. Para obtener estas características, se aplicará sobre las materias primas diferentes procedimientos encaminados a obtener una pulpa de características adecuadas, tratando siempre de obtener la mejor calidad o el mayor rendimiento posible, es decir, cantidad de pulpa obtenida por tonelada de madera empleada y cantidad de reactivos empleados para obtener una tonelada de pulpa (39).

Existen muchos procedimientos, los cuales se han ido desarrollando y mejorando a lo largo del tiempo, los cuales presentan ventajas e inconvenientes que han de ser evaluados conforme al tipo de producto final que se desea obtener, teniendo en cuenta parámetros tales como resistencia mecánica del papel a la rotura, al rasgado, al rozamiento, al plegado, rugosidad, blancura, deteriorabilidad, etc. Además de costo unitario del proceso, impacto medioambiental de la producción, tipo de materia prima disponible, etc. Ya que la materia prima más utilizada en la fabricación del papel son las pulpas de madera virgen, se describirá el proceso de fabricación de pulpa a partir de fibras vegetales madereras (39). La madera se puede transformar de dos maneras: mediante procedimientos mecánicos o químicos (figura 27)(33).

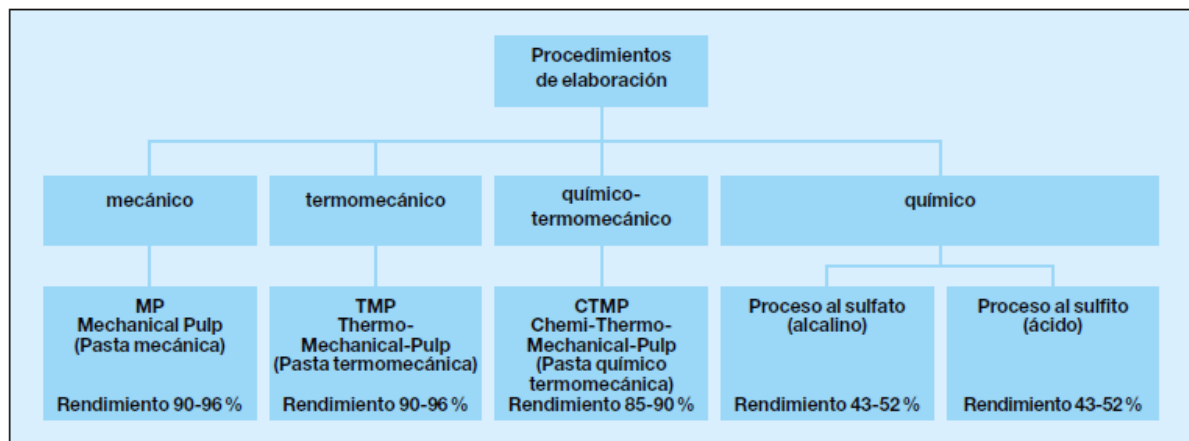


Figura 27 - FUENTE: (33)



### 3.3.1. Producción de pasta mecánica en molinos de piedra (MP – SGW, SGD)

El funcionamiento de este método es muy sencillo, pues se trata simplemente de obtener partículas de madera de pequeñísimo tamaño, las cuales puedan ser aplicadas directamente en la fabricación de papel, es decir, el tamaño final de partícula ha de ser del orden de unidades de milímetro, tamaño que posibilita la confección de papel. El proceso consiste en la acción mecánica de frotamiento de un disco giratorio (molino), originariamente de piedra, sobre los troncos de madera (figura 28)(40).

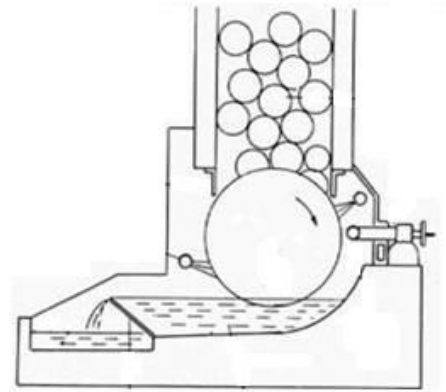


Figura 28 – FUENTE: (16)

Los troncos son introducidos longitudinalmente de forma perpendicular al disco giratorio, y son presionados contra él para promover la acción abrasiva. El disco está parcialmente sumergido en agua y es rociado constantemente con agua para disipar el calor generado por el rozamiento entre la madera y la piedra. Debido a este calor generado, se alcanzan temperaturas en la zona de molido de hasta 150°C, temperatura suficiente para fluidificar la lignina y permitir la separación de las fibras, las cuales pasan por unas ranuras situadas en la propia piedra de moler hacia un pozo que contiene agua, donde se forma la suspensión de fibras en agua. Esta pulpa es llevada hacia unas cribas donde se seleccionan los tamaños de partícula adecuados; las partículas no válidas se vuelven a moler en molinos mecánicos o se desechan definitivamente. Con este procedimiento se obtienen fibras celulósicas largas, pero recubiertas de una capa de lignina, pues por este procedimiento no es posible separarla definitivamente. Debido a esto, los rendimientos de pulpa a madera son muy altos, del orden del 90 al 95%. Por otro lado, el gasto en energía requerido para hacer funcionar el molino es muy elevado, pues el rozamiento ejercido entre tronco y piedra es muy elevado. Es por ello, que este tipo de instalaciones se suele instalar en zonas donde la energía es relativamente barata, pues su precio es el factor determinante de la rentabilidad de este proceso (40).

### 3.3.2. Producción de pasta termomecánica (TMP)

El proceso termomecánico es una mejora introducida sobre el proceso de refinador mecánico, que consisten en la instalación en la línea de entrada de una unidad de vaporizado (la disposición del equipo se muestra en figura 29).

En esta unidad, las astillas de madera se someten a vapor de agua a presiones de entre 6 y 10 kg/cm<sup>2</sup>, lo que corresponde a una temperatura de entre 165 y 185°C. Si se consigue acoplar perfectamente la sección de vaporizado con el refinador mecánico, el proceso de refinado tendrá lugar a las mismas condiciones de presión y temperatura. En estas condiciones, la lignina, que actúa como ligante de las fibras se reblandece, por lo que la estructura de la madera se debilita enormemente y las fibras quedan casi totalmente separadas (40).

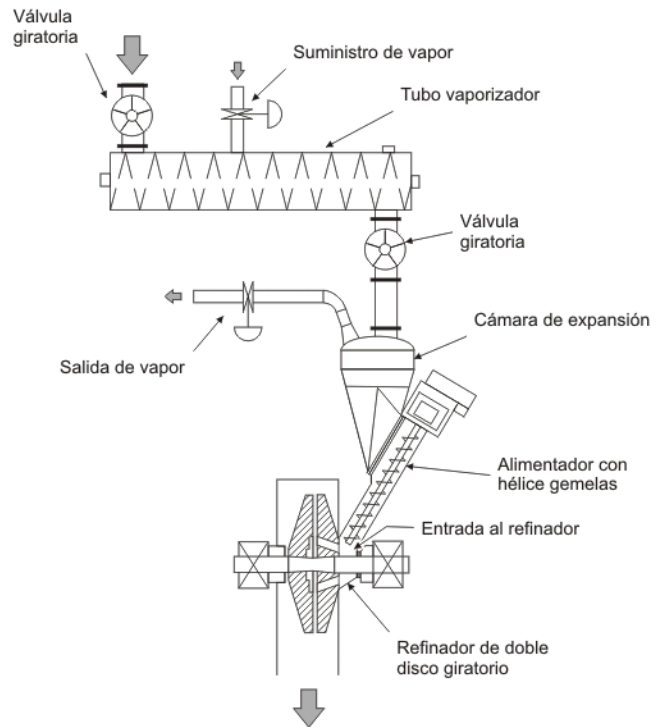


Figura 29 – FUENTE: (40)

Las fibras separadas a estas temperaturas no solo no sufren daño alguno, sino que quedan recubiertas con una delgada capa de lignina, depositada tras el enfriamiento, que las endurece. Este recubrimiento crea una superficie suave en la fibra, lo que produce que cualquier intento de fibrilación resulte muy difícil, por lo que no este proceso no es adecuado para la obtención de papel, pues la cohesividad entre fibras es baja, pero la hace óptima para la fabricación de tableros para construcción, pues la resistencia individual de las fibras es muy alta, gracias a la resistencia transferida por la capa de lignina. Para la obtención de papel a partir de este proceso no puede sobrepasarse la temperatura de transición vítrea de la lignina (40).

### 3.3.3. Pasta termomecánicoquímica (CTMP)

Es un proceso semejante al anterior pero en esto se utilizan determinados compuestos químicos (lejía a base de sosa o de sulfito sódico) además del vapor de agua (figura 30). Se utiliza como sustitutiva de la pasta química en productos que no requieran gran calidad como los papeles higiénicos, papel de revista, etc. (32).

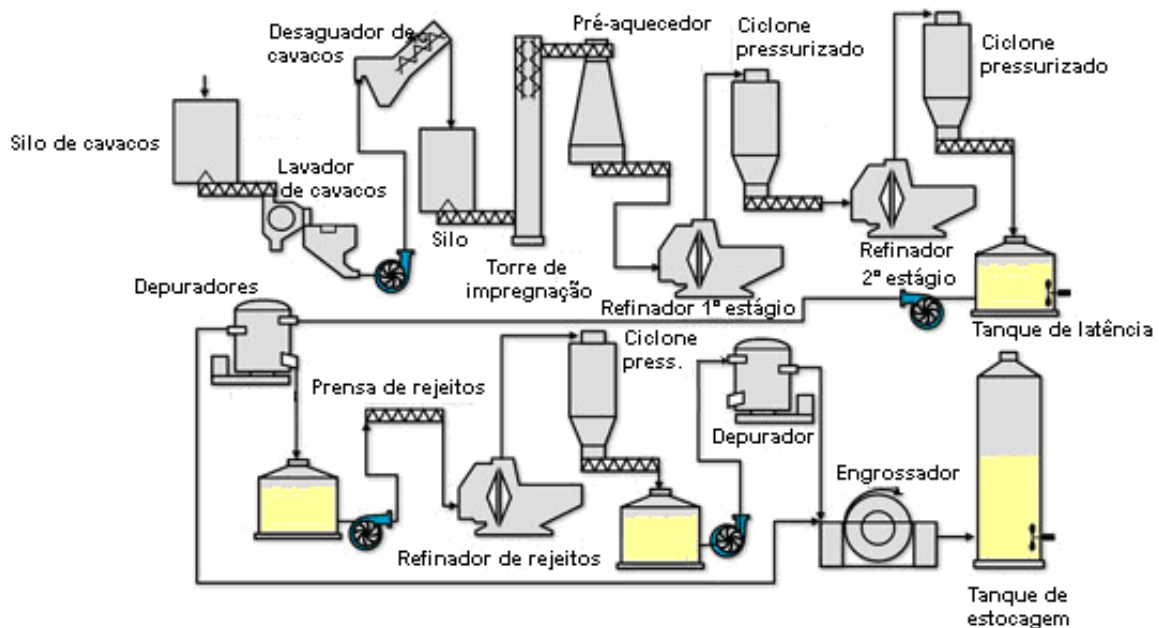


Figura 30 – FUENTE: (16)

### 3.3.4. Proceso semiquímico

La obtención de pulpa semiquímica se inició para utilizar como subproducto ciertas astillas de maderas duras. El proceso se ha logrado por tres eventos que coincidieron. Estos fueron: el convencimiento de que la demanda de materias primas fibrosas por parte de la creciente industria papelera, necesitaba de las maderas duras que estaban disponibles en grandes cantidades y representaban un problema forestal por su no utilización, para satisfacer sus requerimientos; el reconocimiento del comienzo de una inflación en los costos de madera para pulpa, que pudieron satisfacer parcialmente por medio de un aprovechamiento más eficiente de la madera; y la tremenda expansión de la industria de cartoncillo, incluyendo la de cartón corrugado. El cartón corrugado de pulpas semiquímicas de maderas duras se adaptó perfectamente bien a esas necesidades (32).

### 3.3.5. Pastas químicas

El proceso de fabricación de pasta química se basa en la liberación de las fibras de celulosa que intervienen en la composición de la madera por medio de productos químicos, los cuales dan generalmente el nombre al proceso correspondiente. Los productos químicos activos actúan sobre la lámina media de la madera disolviendo la lignina que actúa como materia cementante entre las fibras, con lo que se consigue libéralas de forma intacta, a diferencia del proceso mecánico en el que las fibras liberadas en forma de haces están rotas.

Para disolver la lignina, además de productos químicos, se emplea vapor a media presión que eleva la temperatura, con lo que se favorece la disolución de la lignina por los productos químicos seleccionados (32).

### 3.3.6. Proceso sulfito

El proceso al sulfito fue inventado por el químico americano Benjamín Che Silgan, quien encontró que tratando a la madera con soluciones de bisulfito y ácido sulfuroso, se podían obtener fibras celulósicas. El 5 Noviembre de 1867 a Silgan se le otorgó la patente N° 70485, de los Estados Unidos, denominada “Tratamiento de sustancias vegetales para la fabricación de papel”. El proceso al sulfito fue introducido en los Estados Unidos en año de 1882, por Charles S. Wheelwright quién trabajo el proceso Ekman que consistía en el trato de la madera con bisulfito de magnesio con digestores cilíndricos rotatorios y revestidos de plomo (32).

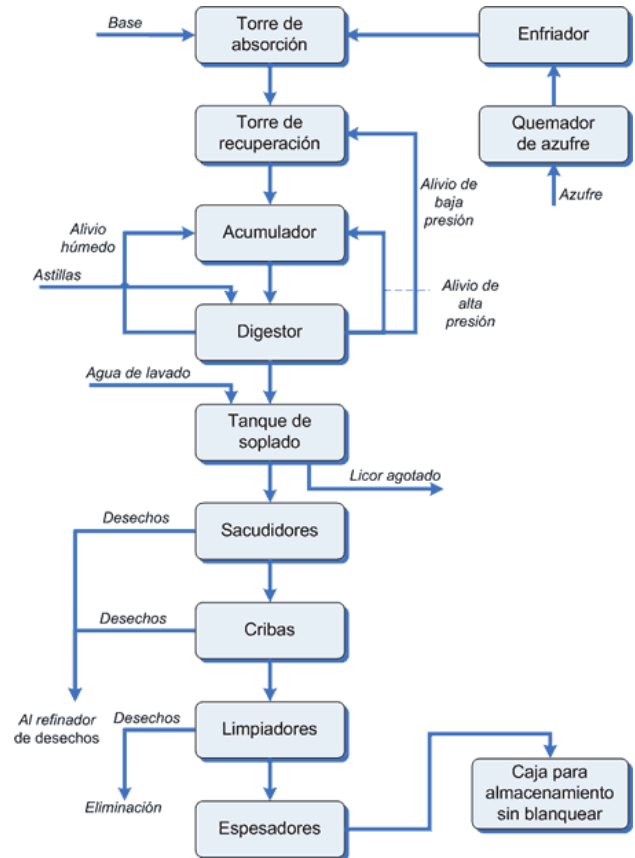


Figura 31 – FUENTE: 39

En la figura 31 se presenta de forma simplificada el esquema de un de los procesos de fabricación de pasta sulfito (39).

### 3.3.7. Procesos alcalinos

De los procesos químicos empleados para la fabricación de celulosa, los alcalinos son mí interesantes que los ácidos porque fabrican pastas más resistentes y permiten la recuperación de los productos químicos que se emplean. Los procesos ácidos están en desuso en el sector del papel, solamente se emplean para ciertas aplicaciones de tipo textil. Las pastas químicas pueden ser de coníferas o frondosas, pudiendo ser crudas (sin blanquear) o también blanqueadas. En la práctica casi no se fabrica pasta química cruda para el comercio, y la producción se dirige a su integración en máquina de papel o a su posterior blanqueo. El

rendimiento de las pastas químicas oscila entre 40% y 60% dependiendo del proceso, grado de deslignificación y especie de madera utilizada (32).

Entre los procesos alcalinos el proceso al sulfato también llamado “kraft” es el de mayor importancia porque produce pastas más resistentes que el resto de los procesos (figura 32).

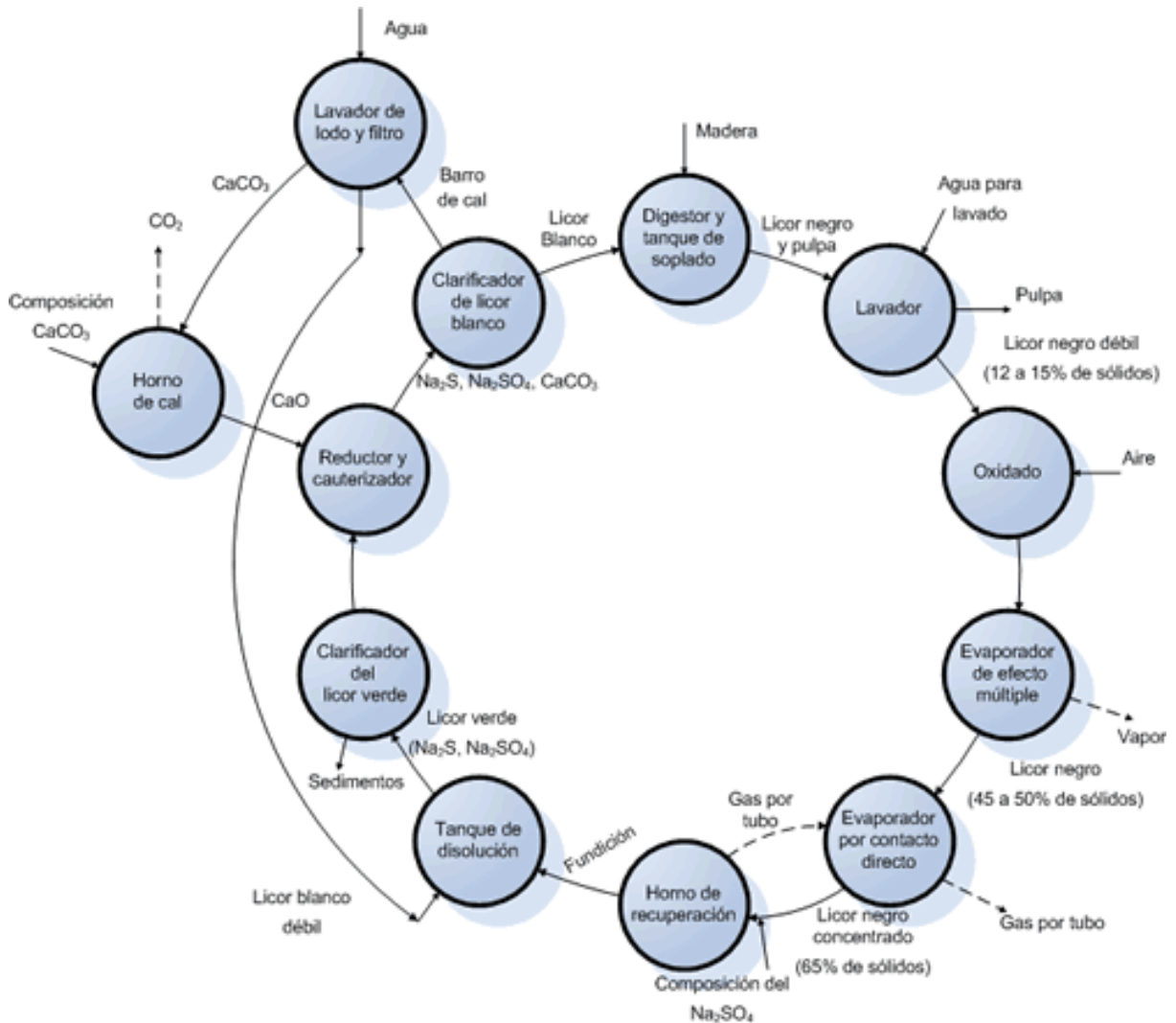


Figura 32 – FUENTE: (39)

El proceso “kraft”, que en alemán significa resistente, emplea sulfato sódico como elemento de reposición de los productos químicos activos de la cocción (sosa caústica – NaOH - y sulfuro sódico - Na<sub>2</sub>S -), de ahí que el proceso también reciba el nombre de proceso al sulfato. El proceso kraft se realiza en unos recipientes metálicos llamados digestores o lejiadoras, que pueden ser continuos o discontinuos por cargas (“batch”) (32). La figura 33 presenta un esquema donde aparecen aún el blanqueo, depuración, secado, cortadora,

embaladora hasta el mercado o la máquina de papel. Hay actualmente tres tipos de pulpas “kraft” en el mercado: Standart (poco usado: problemas ambientales), ECF y TCF.

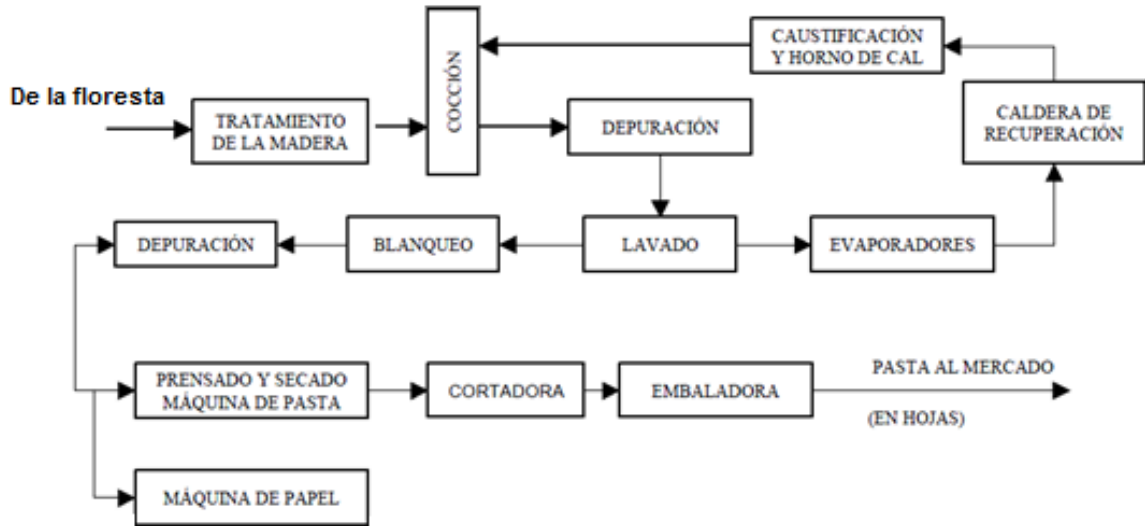


Figura 33 – FUENTE: (32)

### 3.3.8. Comparación entre las pulpas

En cuanto a resistencia mecánica de los tipos de pulpas obtenidas por los métodos discutidos, se puede destacar que las pastas químicas y semiquímicas producen papeles de mayor resistencia, siendo los métodos mecánicos claramente inferiores. En la gráfica de la figura 34 se muestra la resistencia del papel en función de la densidad de la propia hoja, y se puede apreciar claramente la ventaja de las pulpas químicas y semiquímicas (30).

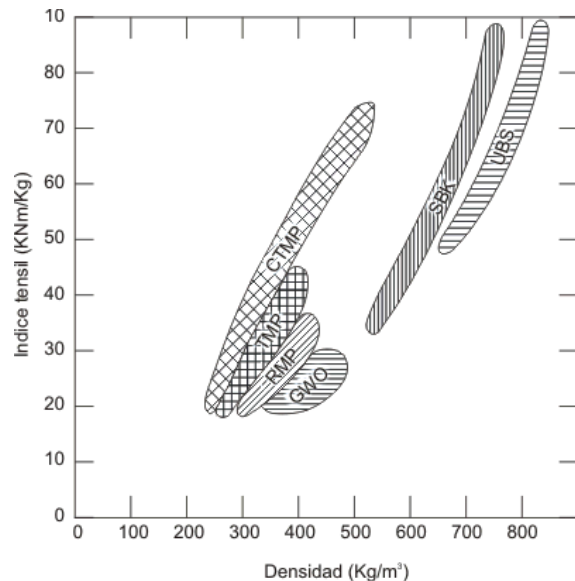


Figura 34 – FUENTE (30)

NOTACIÓN: quimicotermodinámica (CTMP), mecánica con piedra (GWC), refinador mecánico (RMP), termomecánica (TMP), sulfito sin blanquear (UBS) y Kraft semiblanqueada (SBK).

### 3.4. FIBRAS RECICLADAS

Desde un punto de vista medioambiental, el reciclaje de papel viejo tiene una serie de ventajas incuestionables, tales como reducción de residuos en los vertederos, ahorro de energía, alargamiento del ciclo de vida de las fibras celulósicas y la disponibilidad de una materia prima barata. No obstante, la posibilidad de reciclar papel y cartón usado está limitada. La implantación del reciclado de papel en los distintos tipos de productos papeleros es también muy diferente: así los cartones para cajas introducen un alto porcentaje de fibra reciclada en su producción (>90%). Algo menos es el porcentaje de fibra reciclada en el papel prensa (aproximadamente el 70 %), donde esta materia prima ha desplazado a la pasta mecánica. Otro tipos de papeles como los dedicados a impresión y escritura emplean porcentajes de fibra reciclada aún menores. Hoy con los modernos sistemas de depuración, el grado de utilización de las fibras recicladas en papeles sanitarios es algo como 65 a 100%. Se describen ahora algunas de las limitaciones de tipo técnico que se dan en el reciclado de papel y cartón, así como algunas de las soluciones que la investigación actual propone para mejorar la calidad del papel reciclado y, por tanto, incrementar las actuales tasas de recuperación del papel (41).

La fabricación de papel consiste en formar una hoja con fibras de celulosa a partir de la suspensión en agua de la pasta y sus aditivos. La suspensión se deposita a lo largo de una tela en movimiento, gravedad y el vacío que se aplica por debajo provocan el drenaje del agua y la formación de una red fibrosa en la superficie de la tela. En etapas posteriores, la hoja formada se transfiere a la zona de prensas y de ahí a la sequería, donde el agua se elimina por prensado y evaporación hasta que la hoja alcanza la sequedad habitual en el papel (90 a 95 %). Durante este proceso, las fibras de celulosa se someten a condiciones que reducen la calidad del papel en posteriores reciclados. Una situación no siempre bien conocida por los partidarios del reciclado es que el papel no puede reciclarse indefinidamente. En cada ciclo, se reduce su resistencia. La incorporación de fibra virgen a la producción de pasta es necesaria no solo para compensar las cantidades de papel que no se reciclan, sino para evitar que los niveles de calidad caigan por debajo de lo permitido (41).

El proceso de reciclado de papel consiste en una serie de etapas que tienen por objeto desintegrar el papel en las fibras que lo constituyen y eliminar los contaminantes que lo acompañan (metales, arena, colas, polímeros, adhesivos, cargas minerales, etc.). En ocasiones, uno de estos contaminantes es la tinta, que se elimina en la etapa de destintado. Los principales inconvenientes observados en el reciclado del papel son (41):

- Pérdida de resistencia mecánica;
- Dificultades para el desgote de la pasta;
- Pérdida de blancura;
- Modificaciones químicas de la fibra de celulosa;
- Peor maquinabilidad;
- Presencia de contaminantes.

### **3.4.1. Pérdida de resistencia mecánica**

Una de las causas de la pérdida de resistencia en los papeles reciclados se produce en algunos papeles encolados y se debe al propio método de encolado. Cuando la cola se aplica en medio ácido, deja un residuo ácido que reduce la resistencia del papel. La causa es que, en condiciones ácidas, las fibras son menos flexivas y por tanto menos resistentes. Esto hace preferible para el reciclado a los papeles que ha sido encolados en medio alcalino. En contra de lo que pueda pensarse, la principal pérdida de calidad en el papel reciclado no tiene lugar por el propio proceso de reciclaje de las fibras, sino que se produce durante la fabricación del papel (sea con fibra reciclada o con fibra virgen). El fenómeno responsable de la mayor pérdida de calidad es el conocido como hornificación. Definido como la formación irreversible de enlaces de hidrógeno entre las moléculas de celulosa de las fibras. Tiene una serie de consecuencias indeseables como son la disminución de poros en la superficies de la fibra que reduce la capilaridad de la hoja. La pared de la fibra se vuelve entonces más compacta y se ha señalado la posible formación de regiones cristalinas en la fibra (41).

Todo esto conduce a un aumento en la rigidez de la fibra, que pierde capacidad de absorber agua e hincharse para formar fibras flexibles y resistentes. Una fibra de estas características no solo es más débil sino que pierde también su capacidad de enlace con otras fibras con lo cual el resultado, la resistencia global de la red fibrosa, es decir la resistencia del papel, se reduce. Para recuperar la flexibilidad de la fibra y su capacidad para absorber agua se puede recurrir a un proceso papelería sobradamente conocido como el refinado, que aplica energía mecánica a las fibras de forma que abre su pared celular, saca al exterior la celulosa interna, aumentando su capacidad de absorber agua, hincharse y formar enlaces fibra-fibra resistentes. El inconvenientes de refinar es el consumo de energía que se requiere, pero también aparece un nuevo problema, el desgote, que afecta al proceso de fabricación del papel (41).



### **3.4.2. Dificultades para el desgote de la pasta**

El desgote de una suspensión de fibras es un parámetro decisivo ya que condiciona la eliminación de agua en la tela y por tanto la velocidad de la máquina, es decir: la producción de papel. Interesa entonces que el desgote sea rápido, pero esto depende de la afinidad de las fibras de celulosa por el agua. Un efecto de hornificación es el aumento de la cantidad de finos en la pasta (fragmentos de fibras, o elementos celulósicos de pequeño tamaño). Estos elementos, por su mayor relación superficie/masa tienen una mayor afinidad por el agua. Otro efecto indirecto de hornificación es el aumento de la cantidad de finos debido, en algunos casos, a la necesidad de refinar para recuperar las propiedades de las fibras, tal y como se expuso anteriormente. Ya sea por cualquiera de las causas anteriores el aumento de finos en la pasta siempre reduce la capacidad de ésta para drenar el agua y, en consecuencia, debe ser evitado (41).

### **3.4.3. Pérdida de blancura**

Se debe fundamentalmente a la presencia de tintas en el papel a recuperar. Las tintas se eliminan mediante procesos de lavado o flotación pero su eliminación no es selectiva y arrastran consigo fibras de celulosa. Cuando se desean papeles de una blancura elevada, la eliminación de tinta ha de ser más intensa, con lo que el rendimiento en pasta se reduce. Un problema derivado de éste es el aumento de residuos (lodos) que ha de ser procesados (41).

### **3.4.4. Modificaciones químicas de la fibra de celulosa**

Ya se ha comentado la formación irreversible de enlace de hidrógeno como causa de la pérdida de flexibilidad de la fibra, junto a esta situación, el reciclado también provoca la pérdida de lignina y de hemicelulosas. Con esto último también se favorece la pérdida de flexibilidad de la fibra con las consecuencias ya comentadas (41).

### **3.4.5. Peor maquinabilidad**

Dentro de maquinabilidad se engloban una serie de características de las pastas que favorecen un buen comportamiento de la pasta en la máquina de papel. Es decir, que forme una hoja homogénea, sin discontinuidades y resistente. Los cambios descritos anteriormente repercuten directamente en el funcionamiento de la máquina de papel y por tanto en la calidad del producto y en la producción. Así la menor resistencia de la fibra y la pérdida de la capacidad de unirse a otras formando enlaces resistentes (que se ha visto que se perjudica con

---

el reciclado), va a suponer una hoja más débil, con mayor facilidad para romperse en la máquina de papel y, por tanto, con mayor propensión a producir paradas y pérdidas de producción. De modo equivalente, la pérdida de la capacidad de drenaje supone que la hoja que se forma va a llevar más agua. Una hoja más húmeda es siempre más débil y con mayor tendencia a producir roturas. La solución puede ser disminuir la velocidad de la máquina (menos producción) o utilizar aditivos de drenaje (mayor coste) (41).

#### **3.4.6. Presencia de contaminantes**

La presencia de contaminantes en el papel reciclado es evitada en buena medida mediante las etapas de purificación de la pasta. Hidrociclones, depuradores de ranuras o de agujeros son utilizados habitualmente para este fin. Hay una categoría de contaminantes que, no obstante, pasan todas estas barreras y permanecen con la pasta dando luego lugar a depósitos e imperfecciones en el papel o a suciedades en los elementos de la máquina de papel. Los más conocidos son los denominados “stickies” y proceden de adhesivos y sustancias poliméricas que acompañan al papel (etiquetas, sellos, gomas de encuadernación, etc.). A veces resultan ser un verdadero problema ya que su eliminación resiste los métodos habituales por ser partículas de pequeño tamaño, deformables por acción de la temperatura o la presión y que pueden así traspasar las ranuras de los equipos de depuración (41).

#### **3.4.7. Soluciones para mejorar el reciclado de papel**

Se describen a continuación dos líneas de trabajo: fraccionamiento de las pastas y uso de enzimas para la mejora de la calidad que han centrado la atención de los técnicos de la industria del papel. Se busca en ellas solución a los problemas de la fabricación de papel recuperado que se acaban de describir. Con una tecnología avanzada para la recuperación de pastas se puede procesar la pasta reciclada de forma que se fraccione el material en una fracción fibrosa, de calidad y que da lugar a una hoja resistente y otra fracción constituida por los elementos de menor tamaño y por tanto con una capacidad para obtener agua. Es obvio que, de esta forma, se reduce el rendimiento en pasta utilizable, pero se consiguen otras ventajas que pueden compensar lo anterior como son (41):

- El fraccionamiento compensa la variabilidad que puede darse en la calidad de la materia prima como consecuencia de un suministro variable;
- Se puede emplear la fracción de menor calidad en papeles de bajo grado;
- La calidad del papel aumenta considerablemente;

- Ahorro de energía en el refinado al poder refinar solo la fracción necesaria;
- Reducción en las necesidades de algunos aditivos.

En la última década la biotecnología ha aportado algunas soluciones a la industria del papel. Ya comienza a hablarse de posibles procesos de bioblanqueo o biopulpeo para reducir la repercusión medioambiental de estos procesos. También en el ámbito de la recuperación de papel han aparecido posibles soluciones que introducen enzimas para el tratamiento del papel recuperado. Algunas de estas tentativas se describen a continuación. Celulasas y Xilanasas han mostrado que adicionadas a la vez, o por separado, producen sobre la superficie de las fibras un efecto que limpia eliminando, preferentemente, elementos de pequeño tamaño, responsables de las dificultades del desgote. El resultado es una mejor facilidad para eliminar agua acompañada, en ocasiones al que produce el refinado mecánico de las pastas, por lo que también se ha hablado de biorrefinado. No obstante, la acción de las enzimas no tiene las consecuencias del refinado mecánico (41).

Las enzimas pueden llevar la degradación más allá de lo deseable deteriorando también las fibras, por lo cual, el tiempo de tratamiento ha de ser controlado cuidadosamente para evitarlo. Otras desventajas que suele aducirse son el elevado coste de las enzimas (podría reducirse en una aplicación generalizada) y el aumento de la DBO en los efluentes y la posibilidad, con ello, de crecimientos de microorganismos. Las ventajas que se derivarían de su aplicación serían (41):

- Facilidad en el desgote;
- Ahorro de energía en la sección de prensas;
- Hoja más resistente = menos roturas;
- Se evita o reduce la necesidad de refinar;
- Mejora la maquinabilidad.

Las lipasas se han probado en ocasiones como posibles ayudas para eliminar contaminantes de naturaleza lipídica. En especial se han probado para eliminar “stickies”. Los resultados condujeron en ocasiones a una pasta más limpia, en la que se ha reducido la cantidad de “stickies”. Las ventajas derivadas de su uso serían (41):

- Papel más limpio, ausencia de defectos en la hoja;
- Mejor aptitud en la impresión;
- Se evitan o reducen los depósitos de “stickies” en la maquinaria.

#### **4. UNIONES DE LAS FIBRAS EN EL PAPEL: PUENTES DE HIDRÓGENO Y OTROS.**

Las superficies celulósicas presentan una tendencia intrínseca a unirse entre si cuando hacen contacto en presencia de agua y son secadas. El conjunto de estas forma una red de fibras cruzadas, más o menos unidas entre sí. Las propiedades dependerán de la forma en que ha integrado la red, por ejemplo, formación y densidad del papel, orientación de las fibras, área relativa de unión, las propiedades geométricas y de resistencia de las propias fibras. Cuando aumenta la unión aumentan las propiedades de resistencia, entre ellas la resistencia a la tensión y la resistencia a la explosión. Sin embargo la resistencia al rasgado requiere cierta unión mínima entre las fibras, después de la cual al haber incrementado la cohesión entre las fibras reduce su resistencia al rasgado. La resistencia al dobléz aumenta al aumentar la unión entre las fibras, pero disminuye también cuando la unión entre las fibras es tan elevada que el papel se hace quebradizo (44).

La tensión superficial es importante, ya que une a las fibras durante el drenado y secado de la hoja. Cuando se elimina el agua, la tensión superficial crea una fuerza tremenda que compacta y aproxima las fibras logrando entre ellas un contacto más estrecho. El encogimiento en el entretejido del espesor se inicia muy al principio de la fabricación, mucho antes de que se haya completado el drenado. Hasta el momento en que hay agua suficiente presente para llenar totalmente los espacios entre las fibras del entretejido, las fuerzas de tensión superficial son muy bajas. Cuando el drenado avanza hasta el punto en que el aire forma una proporción apreciable del medio en el que están suspendidas las fibras, la zona interracial agua-aire aumenta rápidamente, a la vez que aumenta la fuerza de la tensión superficial (44).

##### **4.1. FUERZAS DE VAN DER VAALS**

También llamadas fuerzas de dispersión, presentes en las moléculas de muy baja polaridad, generalmente hidrocarburos. Estas fuerzas provienen de dipolos transitorios: como resultado de los movimientos de electrones, en cierto instante una porción de la molécula se vuelve ligeramente negativa, mientras que en otra región aparece una carga positiva equivalente. Así se forman dipolos no-permanentes. Estos dipolos producen atracciones electroestáticas muy débiles en las moléculas de tamaño normal, pero en los polímeros, formados por miles de estas pequeñas moléculas, las fuerzas de atracción se multiplican y llegan a ser enormes, como en el caso del polietileno (34).

## 4.2. UNIONES HIDRÓGENO

La estabilización de las largas cadenas en sistemas ordenados, es decir, la formación de estructuras supramoleculares se debe a la presencia de grupos funcionales que son capaces de interactuar unos con otros. Estos grupos funcionales son los hidroxilos, tres de ellos están unidos a cada unidad de glucosa. Las superficies de las cadenas de celulosa están - por así decirlo - tachonadas con grupos OH. Ellos son responsables no sólo de la estructura supramolecular, sino también por el comportamiento físico y químico de la celulosa. La mayoría de las estructuras supramoleculares de polímeros naturales y sintéticos están basadas en las uniones de hidrógeno, las que toman lugar por la aproximación del átomo de hidrógeno de un OH al solitario par de electrones de otro átomo de oxígeno. Un puente de hidrógeno se caracteriza por: la resistencia de la energía de enlazamiento, que depende de la densidad de carga y del ángulo entre los átomos enlazados; factores espaciales que causan una distribución asimétrica de los electrones y la cinética del puente de hidrógeno, es decir, la frecuencia con la que oscilan los OH y los protones cambian de posición (24).

Existen dos tipos de puentes de hidrógeno en la celulosa (24)(Figura 35):

- Enlaces intermoleculares - son puentes de hidrógeno entre grupos OH de unidades de glucosa adyacentes en la misma molécula. Estos enlaces dan cierta rigidez a las cadenas individuales;
- Enlaces intermoleculares - estos son puentes de hidrógeno entre grupos OH de moléculas de celulosa adyacentes y son responsables por la formación de estructuras supramoleculares.

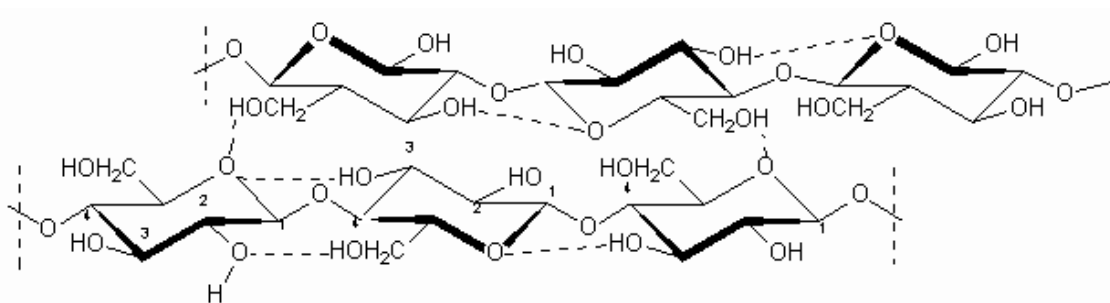


Figura 35 – FUENTE: (45)

Además, las superficies de células leñosas aisladas o fibras en el estado no seco, son capaces de formar puentes de hidrógeno entre ellas. Las propiedades mecánicas de las hojas de pulpa y papel están determinadas por las uniones fibra - fibra, que son el resultado de estos enlaces secundarios entre las superficies fibrosas. Las uniones de hidrógeno no sólo existen

entre los grupos OH de la celulosa, sino también entre los grupos OH de la celulosa y el agua. Dependiendo del contenido de agua, moléculas individuales o racimos pueden ser enlazados a las superficies celulósicas. La absorción de agua por una muestra de celulosa depende del número de grupos OH libres, o mejor, de los grupos OH de la celulosa no enlazados con algún otro. (Una ocupación completa de la superficie de la celulosa por moléculas de agua, significa aproximadamente 0,2 moles por 100 g. de celulosa) (24).

El proceso de secado, aunque continuo, puede ser resuelto en etapas. La primera es el clivaje del puente de hidrógeno entre moléculas de agua, que son los de más baja energía (15 KJ/mol) en el sistema agua celulosa, parte del agua es removida y las superficies de la celulosa se aproximan una a otra. Este proceso continúa hasta que solamente una capa monomolecular de agua permanece entre las dos superficies de las celulosas. Luego los puentes de hidrógeno entre el OH del agua y el OH de la celulosa se rompen formándose el puente entre las superficies de celulosa (24).

## 5. OBJETIVOS DE LA PREPARACIÓN DE LA PASTA

Para que las fibra puedan formar una hoja constituida, esencialmente, por fibras celulósicas de origen natural, fieltadas y entrelazadas, es necesario que, previamente, estén completamente individualizadas y distribuidas al azar a al entrada del sistema formador de la hoja, lo que se consigue poniendo las fibras en suspensión acuosa a una baja consistencia. Aunque que las fibras celulósicas de origen vegetal tienen la propiedad de unirse entre sí, entrelazándose y afieltrándose, este poder de adhesión puede se incrementado mediante un tratamiento mecánico, el refino, que modifique su estructura física y físico-química (24).

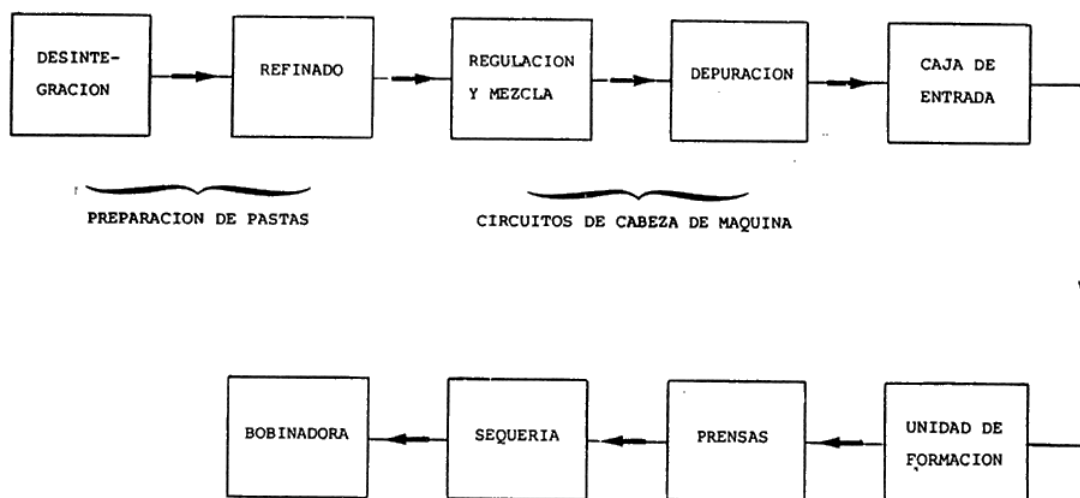


Figura 36 – FUENTE (22)

El conjunto de operaciones de puesta en suspensión de la pasta, individualización de la fibra y operaciones paralelas, tales como incorporación de aditivos, depuración de la pasta, desaireación de la suspensión fibrosa, etc., recibe el nombre de preparación de la pasta (22).

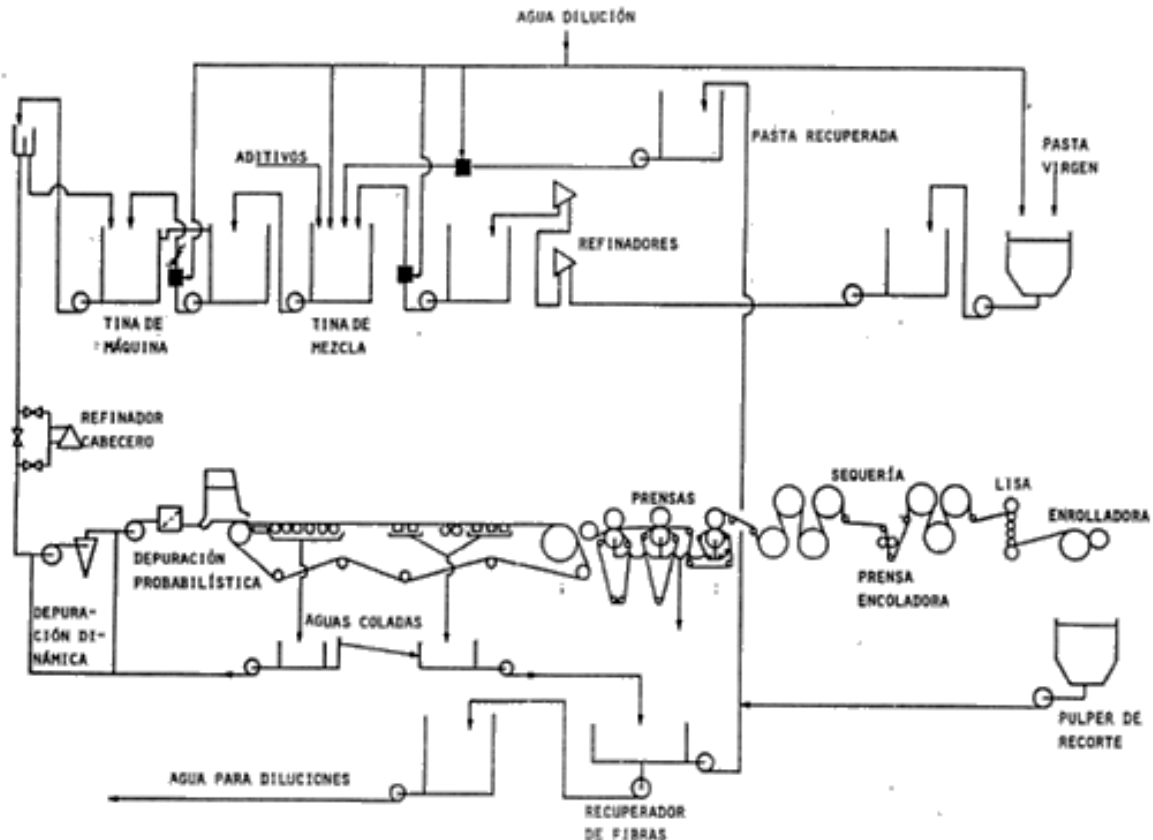


Figura 37 – FUENTE: (22)

## 6. DESINTEGRACIÓN

### 6.1. PULPER

Un pulper consiste, esencialmente, en una cuba provista de un agitador (figura 38). Normalmente la cuba es de acero u hormigón revestido de cerámica y de forma cilíndrica. El agitador es del tipo turbina y está colocado en el fondo o en una pared. En los pulpers de gran capacidad y con turbina en el fondo de la cuba, ésta suele tener en las paredes laterales unas aletas deflectoras con el fin de conseguir una mejor homogeneización y evita el flujo circulatorio (47).

En los pulpers de funcionamiento discontinuo el principio de funcionamiento es el siguiente: una vez llena de agua la cuba se pone en marcha el agitador y se introduce la pasta. La turbina crea una fuerte agitación del agua y unas corrientes en el líquido, ascensional por el exterior e de descenso por el eje del pulper. A causa del movimiento del líquido la pasta se

desintegra por agitación fricción contra otras partículas de pasta e impacto contra el agitador. El accionamiento de la turbina suele realizarse mediante transmisión por correas planas o trapezoidales o por engranajes, con motores de dos o tres velocidades con cambio automático por amperaje (47).

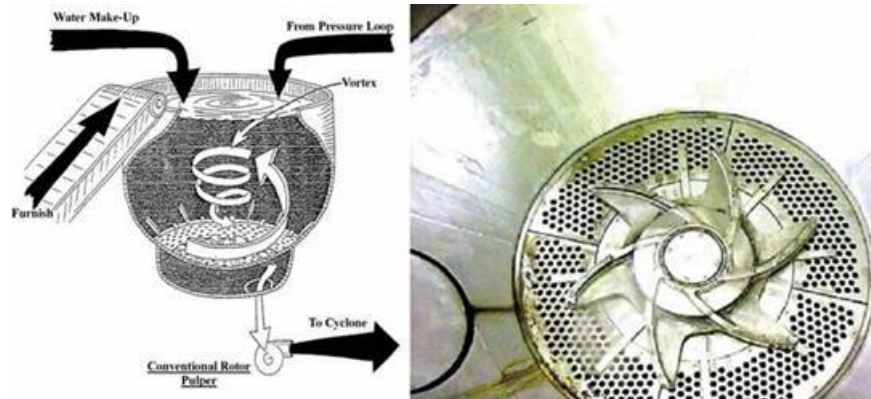


Figura 38 – FUENTE: (6)

La extracción de la pasta desintegrada se hace a través de un agujero o de una plancha perforada conectada con una cámara de extracción cerrada por una válvula. En el caso de un pulper de trabajo en continuo no existe la válvula de cierre; el pulper, alimentado con agua y pasta de forma más o menos continua, está conectado a una caja de nivel constante u otro artilugio para regular el caudal de salida y el nivel en el pulper(47).

En algunos modelos de pulper, sobre todo en los empleados para la desintegración de papelote, existen unos dispositivos para eliminar impurezas (figura 39). Las impurezas gruesas y pesadas pueden ser extraídas del fondo de la cuba mediante una esclusa cuya descarga se efectúa mediante dos válvulas de cierre accionadas a mano o automáticamente. Las impurezas hilables (cuerdas, alambres, trapos, etc.) mediante una trenza (“ragger”) formada por las propias impurezas al girar sobre si mismas (47).



Figura 39 – FUENTE: (6)



Las impurezas ligeras y de cierto tamaño mediante sistemas que purguen una parte del contenido del pulper y lo traten en un circuito de depuración auxiliar, etc. La consistencia de trabajo en la desintegración suele ser del orden del 4-7 % con rotores convencionales y del 15-20 % con rotores helicoidales (figura 40) (47).

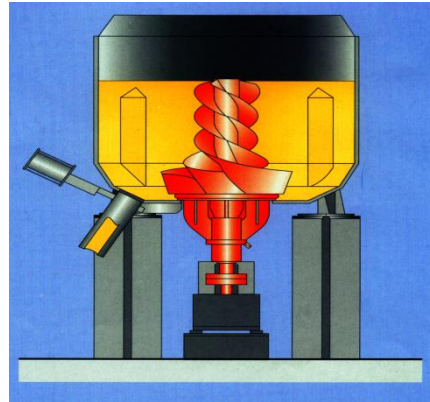


Figura 40 – FUENTE: (48)

En la tabla III se dan algunos datos comparativos entre ambos tipos de turbinas (47).

	Ø cuba / Ø rotor	v (m/s)	Pot. abs. (kW/m <sup>3</sup> )	Pot. ins. (kW/m <sup>3</sup> )
Convencionales	3-4	15-17	5-10	6-15
Helicoidales	≈ 2,5	11-14	10-20	14-30

Tabla III

La duración de la operación y el consumo de energía específica varía mucho según el tamaño del pulper (menor consumo para pulpers grandes y en continuo) y sobre todo según el tipo de materia prima (tabla IV), aunque pueden darse como cifras orientativas: 10-30 min de desintegración y 20-110 kWh/t (47).

Tipo	Clasificación	
Tipo I	Fácilmente desintegrable	Pastas húmedas, recorte de papel sin encolar, roturas de prensas, papel tisú, papel de fumar, papel de periódico.
Tipo II	Medianamente desintegrable	Pastas al 90% (sulfato o bisulfito – cruda y blanqueada -, semiquímica), algún tipo de papelote sin mezclar (cartón, revista, etc.).
Tipo III	Mayor dificultades de desintegración	Pasta mecánica vieja, papeles resistentes a grasas, papel encolado, papel estucado, cartón ondulado, papelote mezclado.
Tipo IV	Difícil desintegración	Papelote resistente en húmedo.

Tabla IV

## 6.2. TRITURADORES SECUNDARIOS

Los trituradores o pulpers secundarios son unos elementos utilizados en algunos circuitos de desintegración para papelote con elevado grado de contaminación, en los que se prosigue la desintegración iniciada en el pulper a la vez que realizan una primera depuración a una consistencia relativamente alta (3-5 %). En la figura x se muestra un esquema de un triturador secundario. El agitador, igual que en el pulper, provoca un flujo aceptado para a través de una placa perforada con agujeros de 2,4–5 mm (depuración probabilística), pudiéndose eliminar, debido al tipo de flujo giratorio, partículas pesadas por la salida lateral y contaminantes ligeros por la salida situada en el eje del aparato.



Figura 41 – FUENTE (6)

## 6.3. DESPATILLADOR (“deflaker”)

El despatillado es una operación en que se prosigue la desintegración iniciada en el pulper, y que consiste en eliminar los aglomerados de fibras (pastillas) que restan en la suspensión. La operación se realiza disipando energía por pulsaciones de presión y/o turbulencia en unos aparatos denominados despatilladores que están formados por un rotor que gira a elevada velocidad (25-30 m/s) muy cerca de un estator ( $\approx 1$  mm).

En el despatillador de la figura 42 la suspensión entra por el primer anillo del rotor contra los dientes del primer anillo del estator: tras salir de las ranuras del estator es atrapada por el segundo anillo del rotor, repitiendo-se la operación anterior tantas veces como pasos haya en el despatillador. Debido a las fuertes aceleraciones y desaceleraciones que sufre la suspensión en este aparato se consigue un buen despatillado, pero presenta el inconveniente de no poder compensar el desgaste de los dientes, así como la fragilidad de los mismos ante la presencia de impurezas duras.

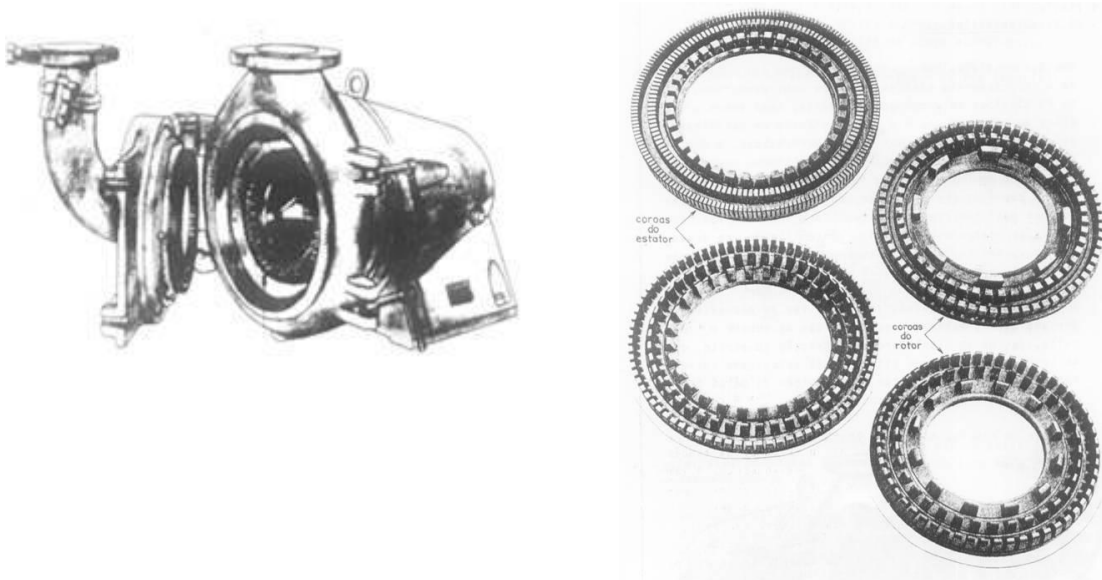


Figura 42 – FUENTE: (6)

El empleo de los despastilladores después del pulper tiene por objeto reducir el consumo específico de la sección de desintegración, además de facilitar el trabajo de los refinadores. En el caso de proceder a la desintegración total en el pulper, el consumo de energía aumenta sensiblemente a partir de un 40% de materia desintegrada debido a que se debe mantener en agitación toda la masa, tanto desintegrada como por desintegrar.

En la figura 42 se muestra, de forma esquemática, una sección de desintegración formada por un pulper y un despastillador. Antes del despastillador se ha situado un depurador dinámico de pasta espesa con el fin de eliminar las partículas pesadas que podrían dañar las partes móviles del despastillador.

#### Características de los despastilladores

- Velocidad de rotación: 1000-3900 rpm
- Velocidad tangencial: 25-40 m/s
- Separación entre rotor y estator:  $\approx 1$  mm
- Consistencia de trabajo: 3-6 %
- Presión entrada: 0,5-1,0 bar
- H: 2-3 m c. de a.
- Consumo de energía específica: 14-70 kWh/t (depende del % de pastillas y dureza de las mismas).

Figura 42 – FUENTE: (6)

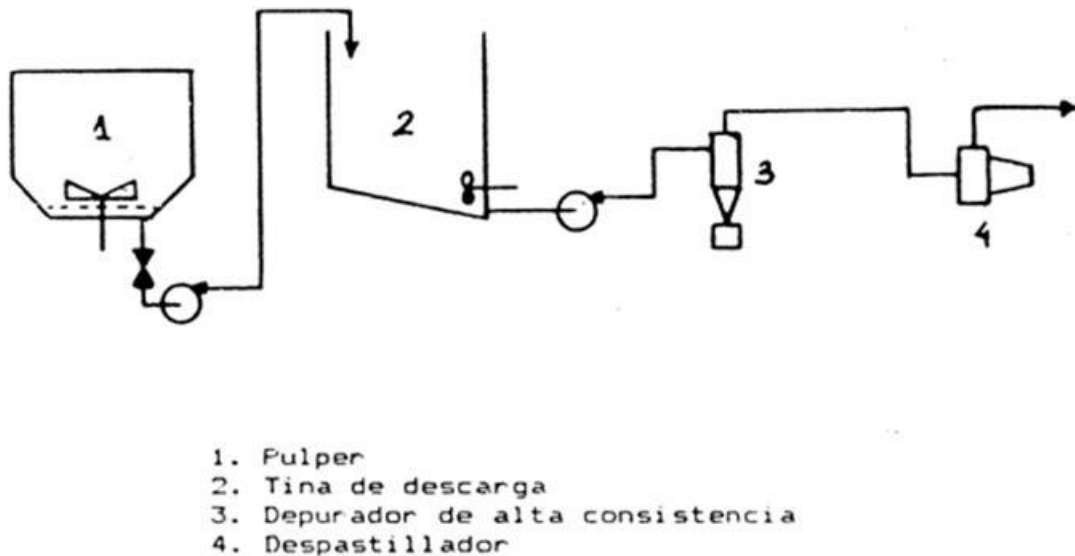


Figura 42 – FUENTE: (47)

## 7. DEPURACIÓN DE FIBRAS VIRGENES Y RECICLADAS

### 7.1. INTRODUCCIÓN

Por el término depuración se entiende, en el proceso de fabricación de papel, la operación unitaria encargada de eliminar las impurezas que se hace necesaria tanto desde el punto de vista del papel acabado como del propio funcionamiento del proceso. En lo concerniente al papel, la presencia de impurezas afecta a sus características mecánicas (una impureza es un punto débil) y a su aspecto exterior (blancura, presencia de astillas, pastillas, etc.). Por lo que respecta a la fabricación, la presencia de impurezas voluminosas o gelatinosas pueden causar agujeros, e incluso roturas del papel, a la salida del formador de la hoja, en la sección de prensas o en la sequería (47).

La depuración puede realizarse en uno o varios puntos entre la desintegración y la cabeza de máquina, dependiendo tanto de la materia prima utilizada como del tipo de papel a fabricar. En el caso de una materia prima conteniendo muchas impurezas, por ejemplo papelote sin clasificar, una primera depuración empezaría en el pulper y lo proseguiría después, a una consistencia del 3÷4 %, con objeto de eliminar todas aquellas partículas que pudieran dañar o desgastar los órganos de los aparatos posteriores (despastilladores,

---

refinadores, etc.), así como obtener una suspensión con el mínimo posible de contaminantes; sin embargo, esta depuración no es necesaria en el caso de utilizar una materia limpia, tal como la pasta virgen. Por otra parte, la depuración de cabeza de máquina, realizada a una consistencia igual o inferior al 1%, será común a cualquier tipo de fabricación (47).

## 7.2. TIPOS DE IMPUREZAS QUE SE ENCUENTRAN EN LAS SUSPENSIONES FIBROSAS

En las suspensiones fibrosas se pueden encontrar diferentes tipos de impurezas. Atendiendo a su procedencia pueden ser clasificadas en diversos grupos: debidas a la materia prima (cortezas, astillas, incocidos, resinas, etc.), al almacenamiento de la materia prima (arena, carbón, cenizas, alambres, plásticos, etc.), al proceso de fabricación (pastillas, aglomerados de fibras secas desprendidos de las tinas, aglomerados de fibras formados por floculación, grasa, flóculos biológicos, trozos de material desgastado de los aparatos y conducciones, etc. Sin embargo, es práctica corriente la clasificación de las impurezas atendiendo a su densidad y tamaño (47).

### 7.2.1. Impurezas pesadas

Son todas aquellas cuya masa específica es superior al de las fibras y que pueden, debido a esta característica, ser eliminadas de las suspensiones fibrosas mediante depuradores dinámicos. Dentro de este tipo de impurezas pueden incluirse las partículas metálicas, la arena, el material desgastado de aparatos, etc.

### 7.2.2. Impurezas ligeras

Son aquellas impurezas de masa específica inferior a la fibra y que por tal motivo pueden ser eliminadas con métodos dinámicos. Dentro de este epígrafe entrarían, particularmente, los materiales plásticos de pequeñas dimensiones.

### 7.2.3. Impurezas voluminosas

Son aquellas impurezas que por su tamaño pueden ser eliminadas mediante tamizado (depuración probabilística). Entre éstas pueden citarse las pastillas, aglomerados de fibras, plásticos, etc.

### 7.3. DEPURADORES PROBABILÍSTICOS

Los depuradores probabilísticos utilizados en la industria papelera son tamices equipados con planchas agujeradas, cuya misión es la eliminación de impurezas voluminosas. En principio, las partículas de menores dimensiones que los agujeros pasan con la pasta a la fracción aceptada, mientras que las de mayores dimensiones son eliminadas (rechazo). Sin embargo, debido que a menudo las impurezas poseen uno de sus lados de superficie inferior a la de los agujeros, podrán ser retenidas o no por el depurador según la manera de presentarse delante del agujero (figura 43), lo que confiere a esta operación un cierto carácter aleatorio y de aquí el nombre de “depuradores probabilísticos” (47).

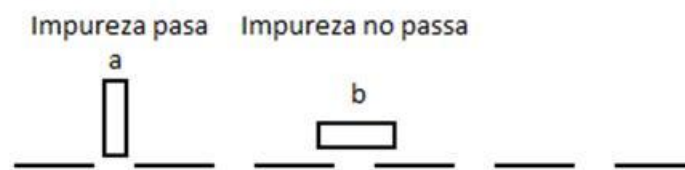


Figura 43 – FUENTE: (47)

En estos depuradores, si las partículas son muy pequeñas en comparación con las perforaciones, la probabilidad teórica de paso al primer intento será equivalente al porcentaje de superficie abierta respecto a la total. Al aumentar el tamaño de las partículas la probabilidad de paso de una partícula esférica de radio  $r_p$  a través de un agujero de radio  $r_a$  puede ser expresada como (47):

$$p = h (r_a - r_p)^2 / r_a^2$$

Siendo:

$p$ : probabilidad de que una partícula pase

$h$ : índice de vacío (relación entre la superficie abierta y la superficie total del tamiz)

$r_a$ : radio del agujero

$r_p$ : radio de la partícula

En la práctica el paso de una impureza depende de muchos factores, entre los que pueden ser destacados el tamaño, forma y rigidez de las partículas, así como el tiempo de permanencia en el aparato. La forma de perforación del tamiz también tiene gran importancia: las ranuras eliminan preferentemente a las partículas esféricas, mientras que las perforaciones circulares son más adecuadas para eliminar partículas planas y rígidas (47).

Por otra parte se tiene que si un depurador elimina una fracción  $\alpha$  de impurezas de un determinado tamaño, el contenido de impurezas de dicho tamaño después del depurador será (47):

$$I = (1 - \alpha)i$$

Siendo:

“I”: la fracción de impurezas referida al contenido inicial “i”.

En el caso de colocar a la salida de aceptadores del primer depurador otro de la misma eficacia  $\alpha$  (figura 4), el porcentaje de impurezas residuales será (47):

$$I = (1 - \alpha)^2 i$$

De lo anterior puede deducirse que para efectuar una buena depuración es preferible colocar varios aparatos en serie que reducir la superficie de las perforaciones, lo cual reduciría el flujo de pasta (47).

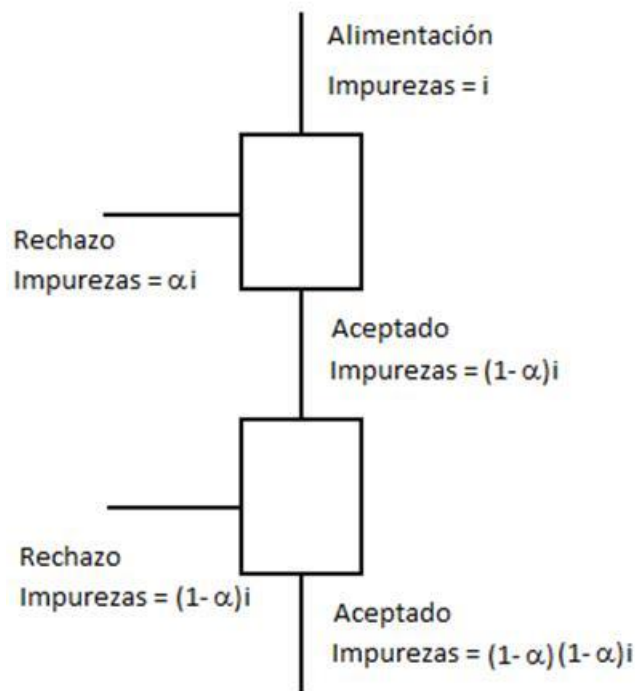


Figura 48 – FUENTE: (47)

En algunos casos se dispondrá de un depurador secundario para tratar los rechazos del primario. El objeto de este depurador es recuperar la fibra buena que puede acompañar al material de rechazo para volverla a introducir en el caudal principal. En la figura 5 se indica el efecto que puede causar en el contenido de impurezas de aceptado del depurador principal la incorporación de un depurador secundario de la misma eficacia  $\alpha$ .

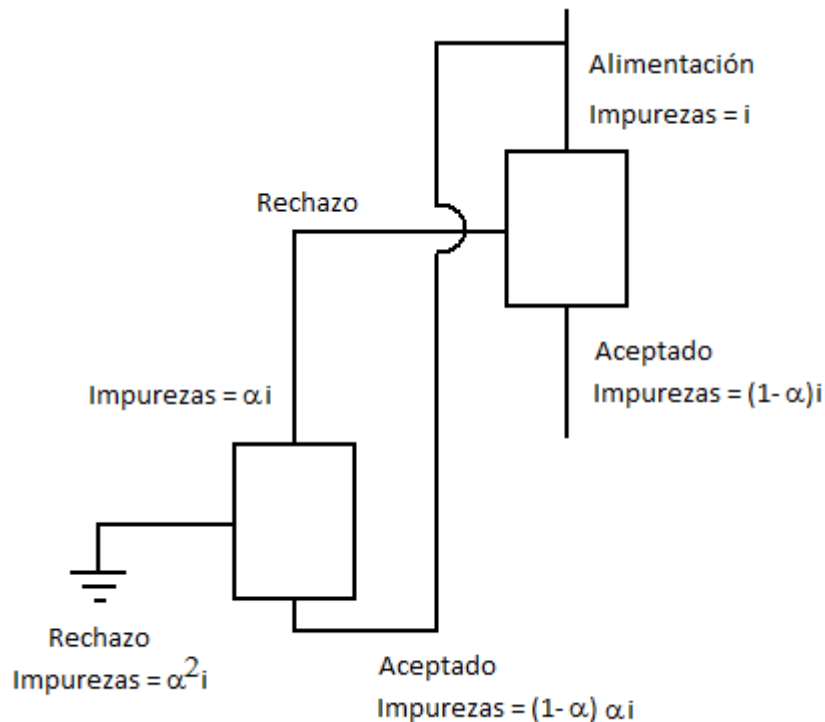


Figura 49 – FUENTE: (47)

En la práctica sólo se puede determinar la eficacia de un depurador de manera experimental y para unas condiciones específicas (consistencia, tipos de fibras, naturaleza y tamaño de las impurezas, etc.), pudiéndose en cada caso establecer una relación entre la probabilidad de rechazo de una impureza y su dimensión (47).

Los depuradores probabilísticos pueden ser clasificados, de acuerdo con su configuración, en tres tipos: vibrantes planos, vibrantes rotativos y depuradores bajo presión (47).

### 7.3.1. Vibrantes planos

Estos depuradores están por un tamiz horizontal, constituido por una placa metálica con perforaciones circulares o ranuras, dispuesto sobre un armazón sujeto a la base mediante resortes (figura 50) y de un mecanismo encargado de proporcionar una vibración al conjunto anterior. El movimiento vibratorio, además de evitar la obstrucción de los agujeros por las impurezas, sirve para desplazar a éstas sobre el tamiz hacia la salida de rechazo (47).

El funcionamiento de estos aparatos es el siguiente: la suspensión a depurar se deposita sobre el tamiz, normalmente a una consistencia del 1 a 2 % aunque en algunos tipos pueda alcanzarse el 4,5 %; la fracción aceptada se recoge en la parte inferior del aparato mediante un



sistema a nivel constante que permite mantener el nivel de la suspensión de alimentación por encima de la zona de trabajo del tamiz. Los rechazos son descartados, prácticamente secos, por el extremo opuesto al de entrada de la suspensión fibrosa. El movimiento de vibración a que se somete el armazón es proporcionado por un mecanismo con un árbol excéntrico que gira a unas 1500 rpm. Sobre el tamiz se disponen unos rociadores encargados de lavar las impurezas y evitar al máximo que el rechazo contenga fibras buenas, el caudal de estos rociadores debe ser constante para evitar fluctuaciones en la consistencia de la pasta aceptada (47).

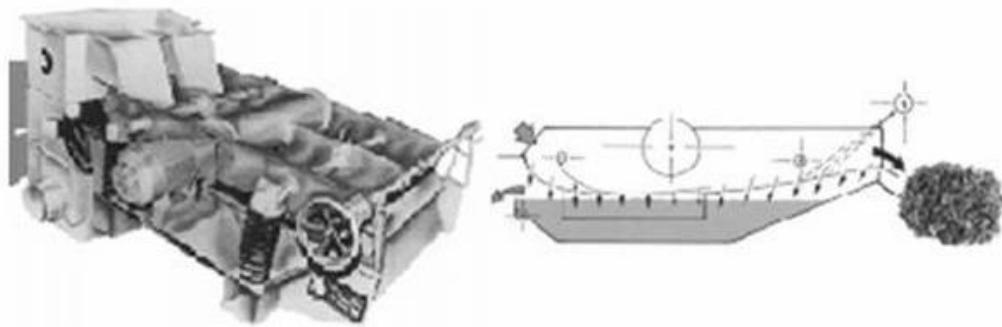


Figura 50 – FUENTE: (6)

Los tamices deben estar contruidos en un material adaptado a las condiciones del medio a depurar y normalmente son de acero inoxidable o bronce. Las perforaciones pueden ser ranuras de unos 10 cm de longitud, 0,6 a 1,6 mm de anchura, o agujeros de 1÷4 mm de diámetro (pasta diluida) o 5÷10 mm (pasta espesa) (47). En la tabla V se da un ejemplo de características técnicas de depuradores vibrantes planos.

	Pasta diluida		Pasta espesa
	Cantidad de paso (t/24 h) *	3 – 33	4,5 – 90
Consistencia (%)	< 2	<2	2 – 4,5
Diámetro perforaciones (mm)	1,4 – 4	1,4 – 10	5 – 10
Ancho ranuras (mm)	0,6 – 1,6		
Consumo agua rociadores l/min)	10 – 30	20 – 60	20 – 60
Presión agua rociadores (bar)	≈ 2	≈ 2	≈ 2
Vibración (Hz)	≈ 12,5	≈ 25	≈ 12,5
Potencia motor (kW)	1,1 – 3	≈ 1,5	1,1 - 3

(\*) En función del tipo de pasta, consistencia y perforación del tamiz

Tabla V

### 7.3.2. Vibrantes rotativos

Los depuradores vibrantes rotativos están constituidos por un tamiz cilíndrico (bronce o acero inoxidable) de eje horizontal que gira a baja velocidad (aprox. 1 rpm), en los que circula la suspensión fibrosa, bien del interior hacia el exterior del cilindro o a la inversa, al existir un dispositivo que mantiene una diferencia de nivel constante entre el interior y el exterior. Las perforaciones son ranuras (7÷10 cm de longitud y 0,3÷0,8 mm de anchura) que se mantienen libres de impurezas sometiendo a vibración el tambor (300÷1000 golpes por minuto) o la cuba. En la parte superior del tamiz – en el interior y – por encima del nivel de la suspensión en el caso de los de flujo hacia el interior 0 se dispone un rociador para mantener limpia la superficie del tamiz (47).

En el caso de los depuradores con flujo hacia el exterior de tambor, el rechazo se recolecta en una bandeja situada en la parte superior interna del tamiz, de la que es evacuado gracias al caudal del rociador. En los depuradores rotativos de flujo hacia el exterior el rechazo se elimina por un rebosadero u otro sistema de purgado que elimina un 5 % del caudal de entrada. Estos depuradores se utilizaban en la depuración de cabeza de máquina, pero presentan como inconvenientes su baja productividad y el agitar la pasta en contacto con el aire lo que facilita su disolución en la suspensión y produce espuma, por lo que en actualidad no se instalan (47).

### 7.3.3. Depuradores bajo presión

Estos depuradores probabilísticos tienen la superficie de tamizado situada en el interior de una carcasa, trabajando completamente llenos de suspensión fibrosa para evitar el contacto de ésta con el aire. La circulación de la pasta a depurar se realiza debido a la diferencia de presión existente entre la alimentación y la salida de aceptado, de donde les viene su denominación (47).

Existen diversas realizaciones, pero el principio de funcionamiento es siguiente: la suspensión fibrosa a depurar llega a una cámara, una de cuyas paredes está constituida por el tamiz; la fracción fina atraviesa las aberturas del tamiz, mientras que el rechazo se acumula en la zona inferior de la cámara de entrada de donde es evacuado de una forma continua o intermitente (figura 8). En el interior del aparato existen, además, unas regletas móviles que se desplazan paralelamente al tamiz y muy próximamente al mismo con el objeto de producir unas pequeñas pulsaciones de presión que eviten la colmatación de las perforaciones y la floculación de la pasta (figura 9). Otro efecto producido por estos órganos es el de mejorar la

depuración; en efecto, debido a que la velocidad de las palas (10÷15 m/s) es del orden de diez veces superior a la velocidad de la pasta, ésta llega a la superficie del tamiz con la trayectoria fuertemente inclinada (figura 10), por lo que la dimensión aparente de las perforaciones queda reducida (47).

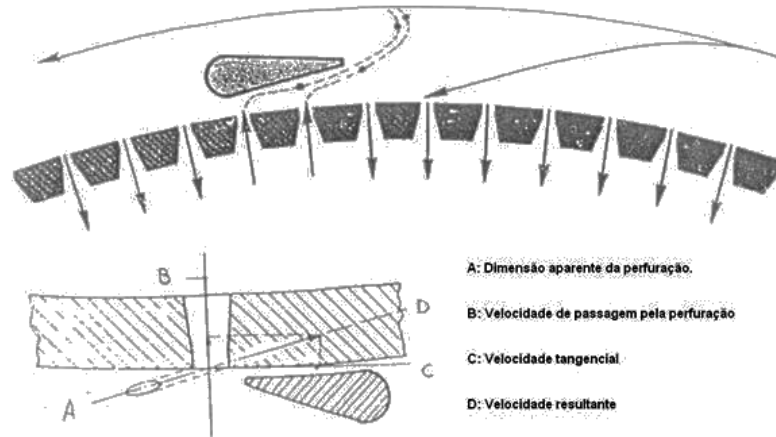


Figura 51 – FUENTE: (47)

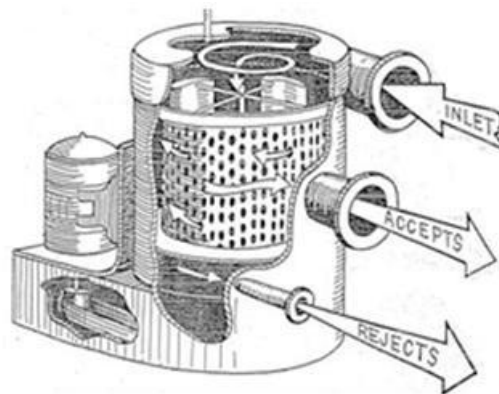


Figura 52 – FUENTE: (48)

Existen diferentes realizaciones de este tipo de depuradores, pudiendo citarse cinco variantes (figura 53):

- Tipo centrífugo con regletas interiores;
- Tipo centrípeto con regletas interiores;
- Tipo centrípeto con regletas exteriores;
- Tipo centrípeto con dos tamices en serie;
- Depurador con dos tamices en serie, uno centrífugo y otro centrípeto.

Los tamices de estos depuradores suelen ser de acero inoxidable con perforaciones circulares o rectangulares. Las características más frecuentes de las mismas se dan en la tabla VI.

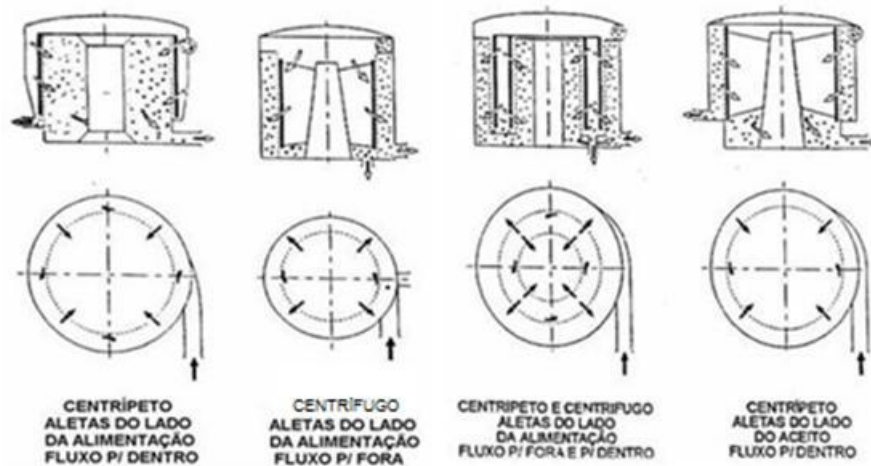


Figura 53 – FUENTE: (6)

Abertura de las perforaciones (mm) (*)		
Diámetro	0,8÷4	
Longitud		50÷70
Anchura		0,2÷2
Distancia		
Entre ejes de agujero	2÷10 Ø perf.	
Entre ranuras paralelas		2÷25 mm
Entre ranuras consecutivas		10÷20 mm
Índice de vacío (%)	10÷20	7÷13 (**)
Velocidad de paso (m/s)	0,5÷1,5	0,5÷1,5

(\*) La elección del tamaño de la perforación es función de la longitud de las fibras a tratar y de la resistencia de la suspensión. Como regla general con las más finas no se puede sobrepasar los 8 g/l;

(\*\*) El caudal de un depurador con ranuras es del orden del 30÷50 % inferior al de un depurador con perforaciones circulares del mismo índice de vacío.

Tabla VI

El rechazo originado en estos depuradores representa del 2÷10 % del caudal de aceptado, aunque en algunos casos de utilización en preparación de pastas puede ser considerablemente mayor (hasta el 30 %). Este rechazo puede contener un alto porcentaje de

fibra buena, debido al sistema de purgado que utilizan estos depuradores, por lo que se suele tratar en un depurador secundario (vibrante plano o baja presión) (47).

En la actualidad, la depuración probabilística en cabeza de máquina se realiza con este tipo de depuradores, debido a que presentan una serie de ventajas frente a los depuradores abiertos: ocupan menos espacio (aparatos compactos con grandes caudales), se adaptan mejor a las presiones necesarias en las máquinas rápidas, no existe contacto de la suspensión fibrosa con el aire (no incorporan aire a la suspensión y no crean espuma), eficaz efecto de defloculación de la pasta (esfuerzos de cizalladura al pasar por las perforaciones) y menor mantenimiento (no existen órganos sometidos a vibraciones). En la tabla II se da un ejemplo de características de depuradores bajo presión para cabeza de máquina (47).

Las realizaciones más clásicas de los depuradores bajo presión no permitían superar valores de concentraciones superiores a 1,8÷2% de consistencia, aunque en la actualidad existen realizaciones específicas para trabajar a consistencias hasta el 4 %, lo que permite su utilización en preparación de pastas sin necesidad de incorporar una dilución previa y una etapa de espesamiento posterior (47).

#### 7.4. DEPURADORES CENTRÍFUGOS

##### 7.4.1. Depuradores centrífugos con torbellino libre

Estos aparatos son utilizados en la industria papelera para separar las fibras útiles para la fabricación de papel de las sustancias indeseables, como son las partículas de metales, piedras, arena y fibras de mayor densidad. La pasta inyectada bajo presión, entra en el depurador y guiada por la cabeza de entrada, adquiere un movimiento tangencial en espiral dirigido hacia la parte inferior, que seguidamente emigra hacia el centro del depurador mezclándose con una columna con movimiento en espiral ascendente (figura 1). La columna libre de líquido se desarrolla cerca del eje del depurador (50).

La ecuación teórica de un torbellino es (50):

$$K = v \cdot r ,$$

Donde:

“K”: constante;

“v”: velocidad de la pasta;

“r”: rayo transversal del depurador.

Esta ecuación indica que en una hidrociclón la energía de presión se transforma progresivamente en velocidad, o sea cuanto más se aproximan las partículas de pasta hacia el centro del depurador, más aumenta su velocidad. La presión va disminuyendo desde la periferia hasta el eje del depurador (50).

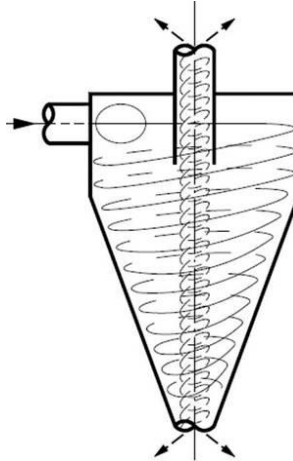


Figura 53 – FUENTE: (6)

El aumento de velocidad tiene como efecto incrementar la fuerza centrífuga. Dicho fenómeno físico es dado por la ecuación (50):

$$F_c = \frac{mv^2}{r}$$

Esto indica que las partículas de mayor densidad fuera del flujo de la pasta aceptada. Como la pasta fluye a través de los varios estratos desde la periferia hacia el centro del depurador, el aumento de velocidad produce un efecto de laminación. Esta laminación del fluido, tiende a producir fuerzas hidráulicas de arrastre, que no existen en una decantación estática. Así pues, la gravedad específica no es único factor que causa la separación de impurezas sino que también la forma de las partículas tiene su importancia (50).

Las fibras de celulosa son aceptadas en un depurador centrífugo porque las fuerzas hidráulicas de arrastre son mayores que la fuerza centrífuga. Si una partícula tiene la forma de un disco, las posibilidades de que sea influenciada por las fuerzas hidráulicas son mayores que si fuera esférica, en donde la relación entre la superficie y la masa es baja. Para tanto, la arena es rechazada rápidamente mientras que algunas partículas de goma pueden ser aceptadas. Esta acción hidráulica de laminación o escurrimiento evita la floculación de la fibra. Esto puede ser un ventaja para separar la materia arenosa de tamaño menor de las fibras de la pasta (50).

#### 7.4.2. Depuración a alta consistencia

La limpieza de la celulosa y pasta por medio de depuradores centrífugos utiliza generalmente dos tipos de Hidrociclones (50):

- El descrito anteriormente, que espesa las partículas rechazadas desde 3 hasta 5 % del volumen original. Esta porción será diluida y limpiada seguidamente en unidades secundarias y en la mayoría de los casos también por unidades terciarias de Hidrociclones para recuperar la máxima cantidad de fibras;
- El otro es el tipo de descarga intermitente. Las partículas pesadas en este caso son separadas y llevadas hasta la parte inferior del depurador, para decantar en un depósito cilíndrico que puede ser descargado periódicamente. Estas unidades se instalan cerca de las máquinas de papel y eran utilizadas en todos tipos de papel.

Con la evolución de la industria papelera se ha impuesto una mejor remoción de las impurezas a más alta consistencia, cosa plenamente justificada para poder proteger los despastilladores o refinadores instalados en el ciclo de preparación de pasta y reducir los coste de operación. El depurador de alta consistencia (“HDC”) de 7” (figura 54) ha sido el resultado de unas experiencias efectuadas en el laboratorio y en instalaciones industriales. Esta unidad utiliza en las pastas o celulosas de alta densidad el mismo principio del flujo del torbellino libre de los depuradores a baja densidad, cuyo éxito ha sido ampliamente comprobado en la remoción de pequeñas partículas minerales y astillas. Dicho depurador está construido en acero inoxidable (50).

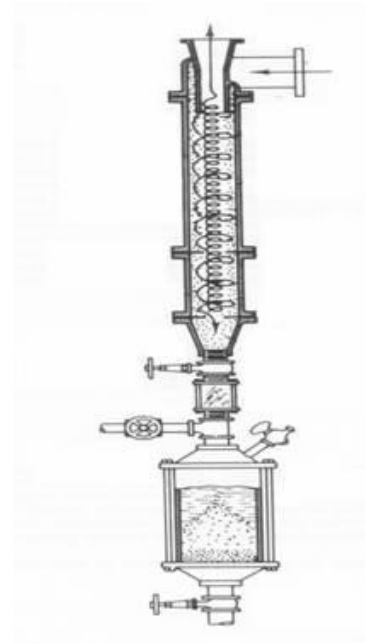


Figura 54 – FUENTE: (6)

La parte inferior de la garganta está provista con una inyección de agua de dilución. De este modo las impurezas se separan de las fibras de alta densidad y decantan en el depósito cilíndrico transparente que permite verificar el nivel de las impurezas acumuladas. Estas serán descargadas periódicamente por medio de dos cilindros neumáticos; uno de ellos de interceptación y otro de descarga instalados en la parte superior e inferior del depósito cilíndrico. Los cilindros está actuados por una válvula neumática (50).

La capacidad hidráulica disminuye con el aumento de la temperatura aunque este cambio es relativamente pequeño con temperaturas que varían de los 20° a los 50°C. Según

mencionamos anteriormente, para poder efectuar una separación final entre impurezas y fibras, se añade agua de lavado en la parte inferior de la garganta del depurador de alta densidad. El caudal del agua de lavado varía entre los 30 y 76 l/min. Cuanto más alta es la consistencia de la pasta más alta debe ser la cantidad de agua de lavado. Una vez que haya sido efectuada la regulación de agua para una determinada aplicación no serán necesarios ulteriores ajustes. Un instalación típica de un depurador de alta consistencia de 7" se muestra en la figura número 5 (50).

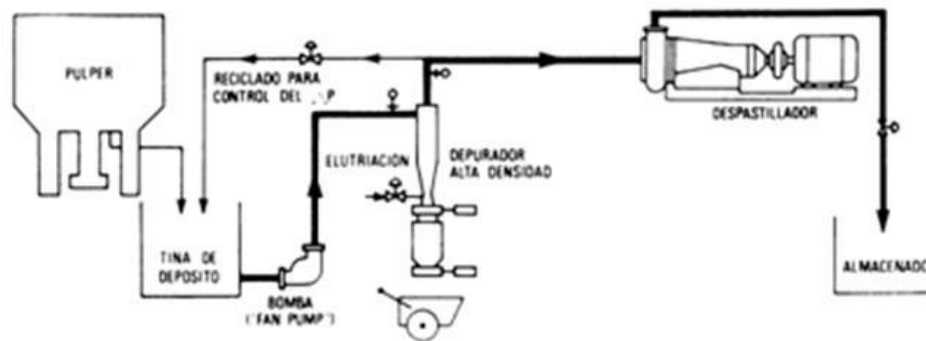


Figura 55 – FUENTE: (50)

El “pulper” descarga en una tina de depósito a través de una placa de extracción. Desde la tina la pasta es bombeada a presión en el depurador de alta consistencia y en un despastillador. Un línea de recirculación con válvula de control es utilizada para asegurar el correcto caudal en el depurador y mantener la necesaria presión diferencial (50).

## 8. REFINACIÓN

### 8.1. INTRODUCCIÓN

El refinado podría ser definido como una operación de la preparación de la pasta por la que se modifica, mediante la acción de un trabajo mecánico y en presencia de un medio acuoso, la morfología de las fibras y su estructura físico-química. Esta definición, aunque parezca demasiado general, contiene los dos términos básicos que caracterizan la operación: la necesidad de dispensar energía a las fibras y que éstas tienen que estar en un medio acuoso. Un problema que se presenta, sin embargo, a partir de la anterior definición es el de la medida de la modificación efectuada sobre las fibras, que será el tema de la siguiente exposición . (47). En la figura 56 se muestran fibras no refinadas y en la figura 57, fibras refinadas (7).



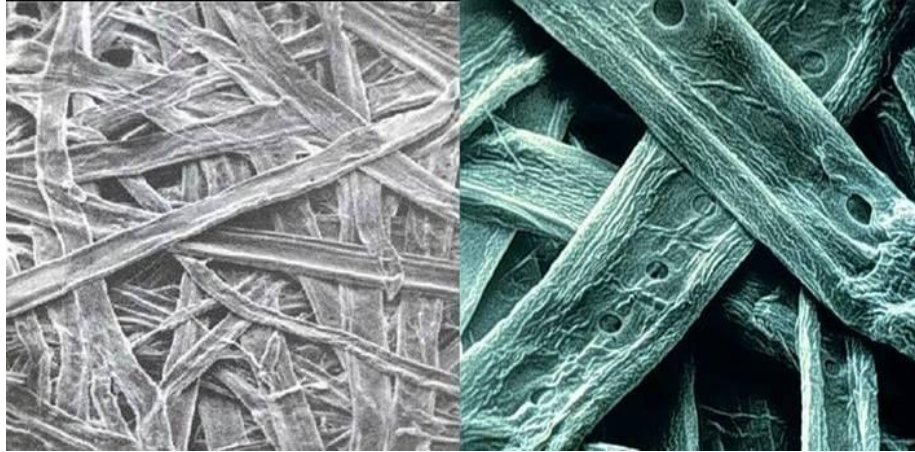


Figura 56 – FUENTE (7)

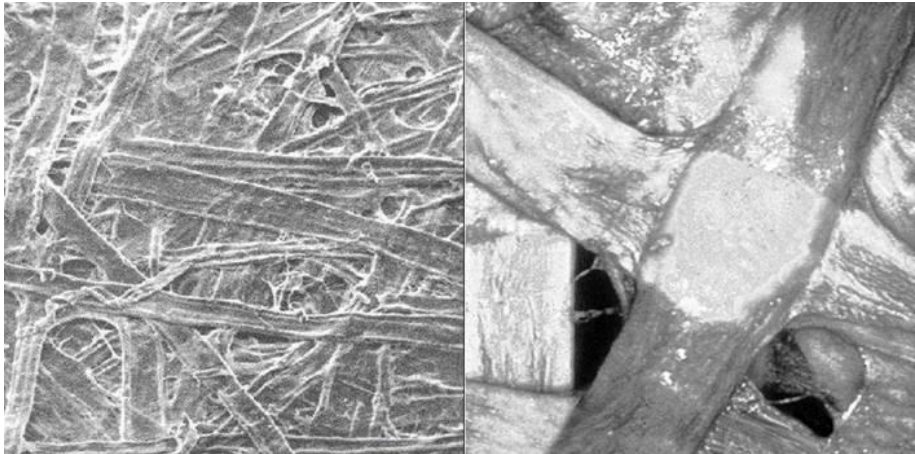


Figura 57 – FUENTE: (7)

Recordemos, de una manera breve, la estructura de la fibra, formada por diversas capas integradas en la pared primaria (P) y la pared secundaria (S). La pared primaria es muy delgada y con una estructura entretejida con muy poca orientación, soliendo llegar a la fábrica de papel ya deteriorada. La pared secundaria no es una capa homogénea, ya que está compuesta a su vez por la pared secundaria exterior o lámina de transición (S1), la pared secundaria principal o media (S2) y pared secundaria interna, denominada también pared terciaria (S3). La pared secundaria interna está formada por dos capas de microfibrilas que giran en hélice en sentidos contrarios, teniendo esta capa una capacidad de hinchamiento débil. La pared secundaria es la más ancha de la fibra, está formada por microfibrilas dispuestas helicoidalmente y orientadas según un ángulo respecto al eje de la fibra inferior al de S1 (entre 10 y 35° según especies), y su capacidad de hinchamiento es relativamente

elevado. Finalmente S3 está formada por una simple lámina compuesta de microfibrilas dispuestas en una hélice con un ángulo que varía con las especies (47).

Durante al refinado, à causa del trabajo mecánico, se rompen y eliminan parcialmente las paredes primaria y secundaria externa de la fibra, lo que permite la penetración del agua en el interior de la misma provocando su hinchamiento y posibilitándose la fibrilación interna; a la vez que se realiza la fibrilación externa, al salir las fibrillas de las capas más interiores a través de los agujeros practicados en las capas externas. Debido al conjunto de estos efectos la fibra toma un aspecto deshilachado, aumentándose sensiblemente su superficie y volumen específicos, a la vez que se vuelve más flexible y branda. Otros efectos producidos con la eventual pérdida de longitud por fractura y la producción de elementos finos, pequeñas partículas arrancadas de las capas externas y fibrillas desprendidas (47).

## 8.2. TEORIA MÁS ACEPTA ACERCA DEL REFINO

La teoría más aceptada del refinado se basa en una hipótesis de Campbell, sobre una idea de Urquhart, quien sugirió que los grupos hidrofílicos de la celulosa, unidos a moléculas de agua, perdían esta agua cuando la celulosa era secada, lo que originaba que las valencias residuales de los grupos oxidrila eran satisfechas, en cierta proporción, por las de las moléculas de celulosa vecinas, a las que se unían por puentes de hidrógeno. Campbell observó que, tras reinmersión en agua, una cierta proporción de estas uniones se rompían, con lo que la estructura se debilitaba y algunas de las moléculas pasaban a un estado en el que eran parcialmente disueltas. En este estado las fibrillas son separadas más fácilmente por el refinado, para ser puestas en contacto con las de las fibras vecinas, cuando el agua es eliminada en la máquina de papel. A medida que la hoja de papel se seca, se forman de nuevo puentes de hidrógeno, ahora con preferencia entre fibras vecinas (51).

Emerton explica el proceso del refinado de siguiente manera: “En las primeras etapas del tratamiento, las capas externas de la fibra (esto es, la pared primaria y la pared exterior secundaria, pero especialmente esta última) son rotas y parcialmente eliminadas, lo que permite a la fibra hincharse. Al mismo tiempo, en parte como consecuencia de este hinchamiento y en parte debido a las intensas zonas de fricción que existen en las proximidades de la cuchilla del molón, las fibras se fibrilan internamente, es decir, las uniones existentes entre sucesivas laminillas coaxiales de la pared media secundaria son rotas hasta cierto punto. Esto origina una mayor penetración de agua entre las fibrillas como consecuencia de lo cual las hemicelulosas, que son fuertemente hidrofílicas, y en un grado

---

menor la fracción amorfa de la celulosa, toman cantidades considerables de agua y pasan a un estado de solución coloidal parcial. A medida que se elimina este agua de suspensión durante la fabricación del papel, las fibras ocupan posiciones más cercanas unas de otras y, tan pronto se empieza a eliminar es agua contenida en los capilares, las fuerzas de tensión superficial empujan las fibras y fibrillas a un contacto más íntimo. Una vez que la distancia entre moléculas de celulosa vecina es suficientemente pequeña, existe la posibilidad de la formación de puentes de hidrógeno y si las moléculas forman parte de fibras diferentes, estas fibras se unen unas con otras mediante fuerzas muy similares a las de cristalización, con una resistencia que depende, entre otro factores, del número de enlaces formados entre ambas fibras” (51).

Es decir, se producen dos fenómenos casi simultáneamente. Por un lado, el trabajo mecánico que se efectúa sobre la fibra arranca de ella partículas o trozos de las capas más externas, especialmente P y S1, lo que permite la entrada de mayores cantidades de agua dentro de la fibra, y por otro, la liberación de las microfibrilas de las capas más internas, fenómenos éstos que estaban restringidos anteriormente por las citadas capas. Esto se conoce como fibrilación externa (51).

El agua que penetra dentro de las capas más internas de la fibra, rompe las uniones existentes entre grupos oxidrilos de moléculas contiguas, formándose ahora uniones covalentes mediante puentes de hidrógeno entre los grupos oxidrilo y las moléculas altamente polares del agua. Ello origina un distanciamiento de las moléculas, anteriormente próximas, de los hidratos de carbono que existen en el interior de la fibra, como pueden observarse en la figura 58. Este fenómeno se conoce como fibrilación interna. Como consecuencia de la entrada de mayores cantidades de agua, la fibra se hace más flexible, como luego veremos, y se produce el fenómeno conocido como hinchamiento. El 60 a 70% de la celulosa de las fibras vegetales es cristalina, es decir, los grupos oxidrilo polares de moléculas adyacentes en esta región están mutuamente satisfechos. Por consiguiente, sólo un tercio aproximadamente de la celulosa es potencialmente capaz de unir agua consigo misma. Las hemicelulosas, por el contrario, son principalmente amorfas, y pueden embeber agua libremente (51).

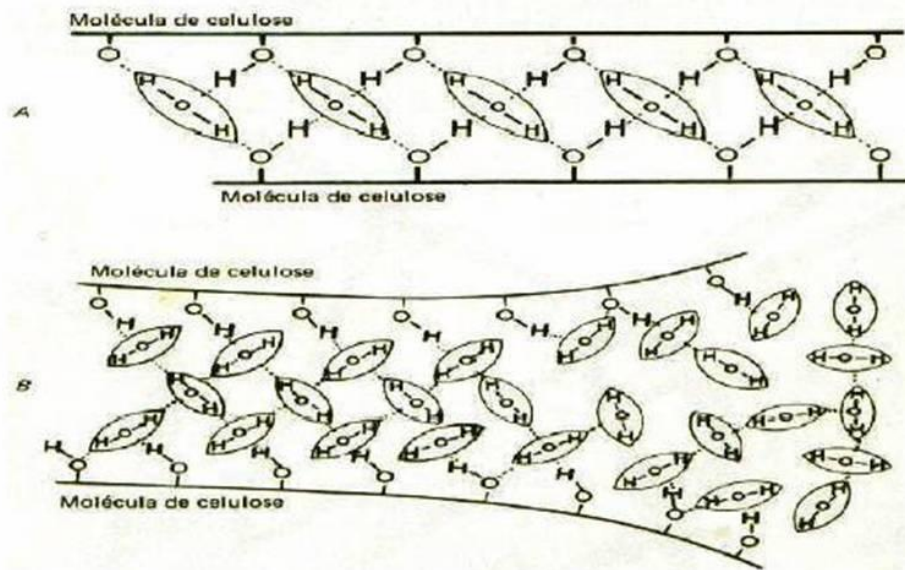


Figura 58 – FUENTE: (6)

El “hinchamiento” de las fibras se realiza fundamentalmente en dirección radial, alcanzándose valores del 20 al 45% muy frecuentemente, mientras que en dirección longitudinal es sólo del 1% aproximadamente.

### 8.3. PRINCIPIO DE ACTUACIÓN DEL MATERIAL UTILIZADO EN EL REFINADO DE PASTAS

En la operación de refinado la suspensión de pasta a refinar pasa entre dos superficies sobre las que existen unas cuchillas. De las dos superficies una es fija (estator) mientras que la otra se desplaza con un movimiento perpendicular al eje de las cuchillas (rotor), de manera que las fibras situadas entre ambas sufren un efecto de cortadura, aplastamiento y fricción entre sí y contra las guarniciones del aparato. La acción conjunta de todos estos esfuerzos mecánicos producirá el refinado de la pasta (47).

El flujo en el interior de los canales formados por las guarniciones en movimiento es complejo, pero parece estar formado, básicamente, por tres componentes (figura 59): un flujo primario que va desde el centro hacia el exterior por el rotor y del exterior al centro – retorno – por el estator; un flujo secundario, de tipo vórtice, en el interior de los canales formados por las cuchillas, que está inducido por el movimiento de las mismas y que con el flujo primario provoca un movimiento en espiral; y un flujo terciario a lo largo de las paredes del estator inducido por el flujo primario, pues al ser más importante el flujo en el rotor que en el estator existirá un gradiente de presión del estator hacia el rotor (47).

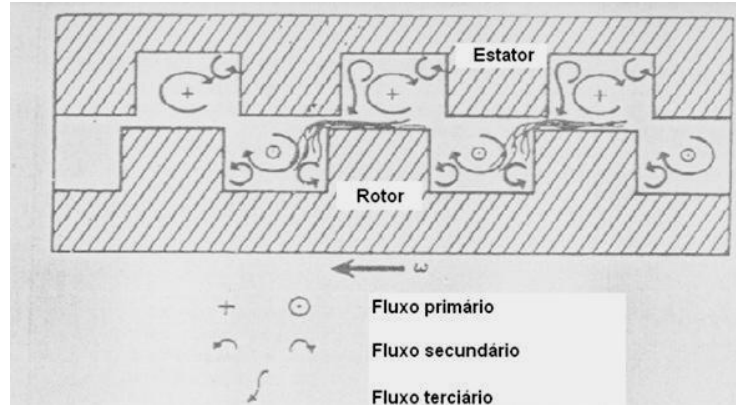


Figura 59 – FUENTE: (47)

La combinación de estos tres flujos impone el posicionamiento de las fibras en el refinador y su acumulación sobre las aristas del rotor, punto donde se les transfiere energía de refinado durante el impacto de ambas guarniciones. Debe hacerse notar que, aunque con diferencias estructurales, la práctica totalidad de los refinadores industriales descansan en el mismo principio de actuación de la tricentenaria pila holandesa, que las primeras patentes de refinadores cónicos y de disco datan de 1850, y que con una configuración muy similar a la actual ya existían en la década de 1940 (47).

#### 8.4. EFECTOS DEL REFINADO

Los efectos del refinado pueden ser divididos en efectos primarios sobre la fibra, y efectos secundarios sobre la fibra, el sistema fibra-agua y el papel. Estos efectos son producidos cuando las fibras pasan entre las cuchillas del refinador (figura 60).

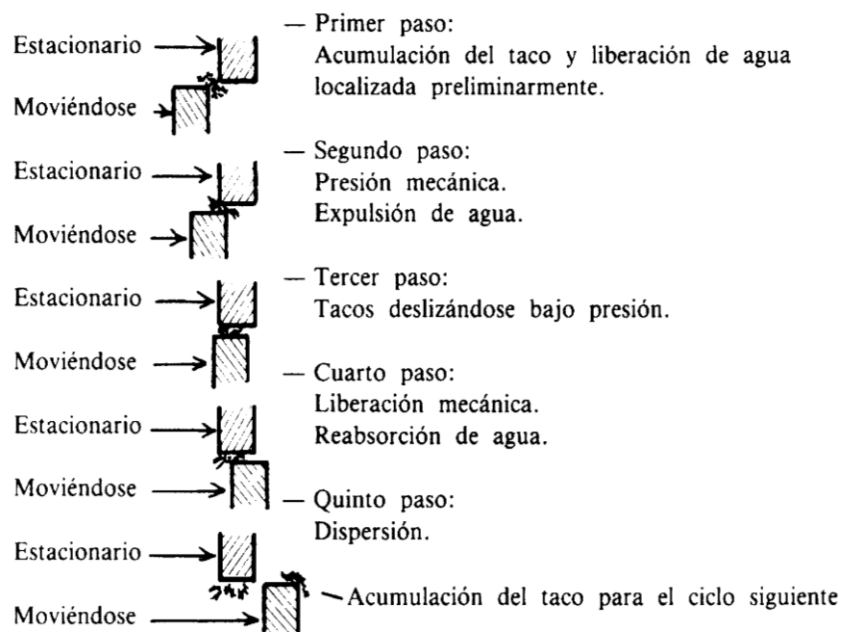


Figura 60 – FUENTE: (52)

## Efectos primarios

Los efectos primarios sobre la fibra son (figura 61) (47):

- Fibrilación interna o rotura de enlaces dentro de la fibra.
- Fibrilación externa e defoliación.
- Formación de finos.
- Acortamiento de fibras.

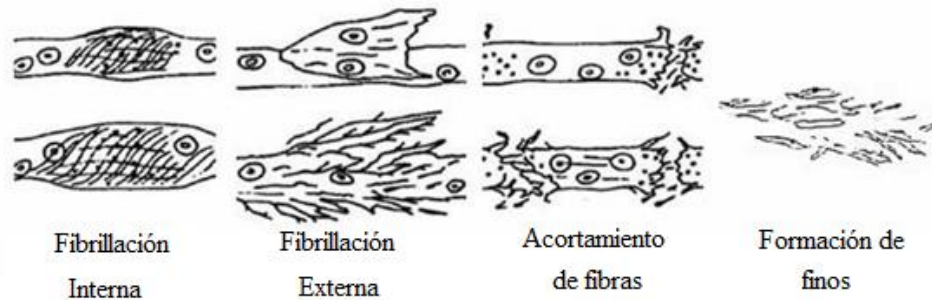


Figura 61 – FUENTE: (6)

### 8.4.1.1. Fibrilación interna

La fibrilación interna supone una rotura de los enlaces puente de hidrógeno existente primitivamente en el interior de las fibras, entre moléculas de celulosa o hemicelulosas, y su transformación en nuevos enlaces entre los grupos hidroxilos de celulosa o hemicelulosas y las moléculas de agua que han ido produciendo el hinchamiento de la fibra. La reorganización de los enlaces se realiza en la fracción amorfa de la celulosa y en las hemicelulosas que son casi totalmente amorfas. La fibrilación interna es, quizás, el fenómeno más importante del refinado en cuanto al aumento de las características mecánicas, ya que durante el proceso de fabricación del papel – eliminación del agua – se produce una reorganización de los enlaces puente de hidrógeno, que se satisfacen bien con otras moléculas de la misma fibra, o bien con moléculas de fibras contiguas, ya que al desaparecer las capas más externas de la fibra durante el refinado no existe ningún impedimento para que esto suceda (47).

### 8.4.1.2. Fibrilación externa

Como consecuencia del desprendimiento de las capas externas de la fibra, las microfibrilas dejan de estar empaquetadas, formando una capa pilosa que rodea la superficie de la fibra. La posibilidad de formación de enlaces entre fibras contiguas es, por tanto mayor que antes del refinado (47).

#### 8.4.1.3. Formación de finos

La causa principal de la formación de finos es el desprendimiento de las capas externas de las fibras (esencialmente P y S1) y de haces de microfibrilas. Debido a la heterogeneidad de estas partículas, es difícil juzgar la importancia que tienen sobre las propiedades finales del papel, existiendo gran diversidad de criterios (47).

#### 8.4.1.4. Acortamiento de fibras

Este fenómeno puede ser producido, además de por el efecto directo de las guarniciones, por la acción ejercida por un flujo a gran velocidad o por un gradiente de aceleración. La extensión de este efecto depende principalmente del tipo de pasta (47).

### 8.4.2. Efectos secundarios

Los efectos secundarios son causados por los efectos primarios, y están relacionados con estos, tal como se muestra en la figura 62 esquemáticamente (47).

#### 8.4.2.1. Efectos secundarios del refinado sobre la fibra

##### Aumento del volumen específico

Influye positivamente en este efecto secundario la fibrilación interna y externa. El hinchamiento de la fibra provocado por el refinado está directamente relacionado con la fibrilación interna, siendo ésta la principal causa del aumento del volumen específico (47).

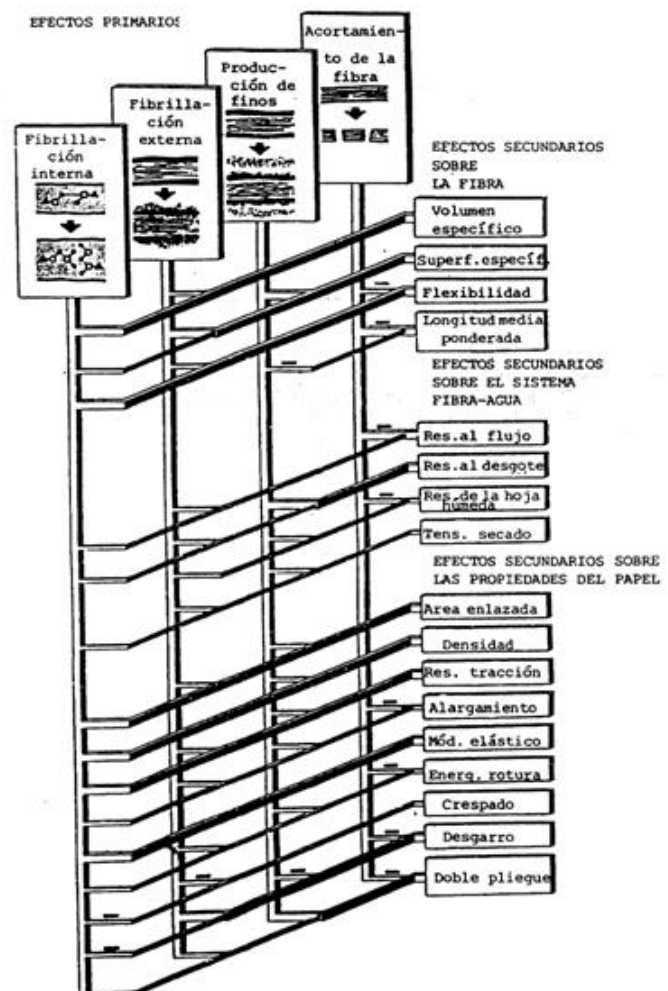


Figura 62 – FUENTE: (6)

La influencia de la fibrilación externa, caracterizada por la aparición de microfibrilas adosadas a la superficie de las capas externas, no es tan acusada (47).

**Aumento de la flexibilidad**

La fibrilación interna, al provocar la rotura de los enlaces laterales entre moléculas adyacentes, provocan un aumento de flexibilidad. La eliminación de parte de las capas externas de la fibra, fibrilación externa, y el acortamiento de las fibras también influyen en este efecto secundario (47).

**Aumento de la superficie específica**

La fibrilación externa y la formación de finos afectan primordialmente al aumento de este parámetro. Menos importancia tiene la fibrilación interna, ya que el hinchamiento de la fibra provoca un aumento superficial claramente inferior al producido por los otros dos efectos primarios (47).

**Disminución de la longitud de las fibras**

La longitud de las fibras ponderada está afectada por el acortamiento de las fibras y la producción de finos (47).

**8.4.2.2. Efectos secundarios del refinado sobre el sistema fibra-agua****Resistencia al flujo**

El acortamiento de fibras disminuye la resistencia al flujo, al disminuir el tamaño de las fibras y afectar por tanto la viscosidad. La fibrilación interna y externa provocarán un aumento de la viscosidad (47).

**Resistencia al desgote**

Influye en este efecto secundario principalmente la formación de finos, y en menor escala la fibrilación interna y externa (aumento de la viscosidad) (47).

**Resistencia de la hoja húmeda**

La resistencia de la hoja húmeda tiende a aumentar con el refinado. Este aumento, en ausencia de enlaces puentes de hidrógeno, es debido al aumento del rozamiento entre las fibras y a la tensión superficial. En este aspecto influyen positivamente la fibrilación externa y la formación de finos. El acortamiento de fibras influirá negativamente (47).



**Tensiones durante el secado**

Las fuerzas de tensión superficial juegan un papel importante, particularmente en las primeras etapas del refinado, por lo que la fibrilación externa y la formación de finos contribuyen al aumento de las tensiones en el secado. Por otra parte, la plastificación de la fibra, resultante de las roturas de uniones internas, originará al final del secado unas tensiones en las zonas de contacto de unas fibras con otras (47).

**8.4.2.3. Efectos secundarios del refinado sobre las propiedades del papel****Área enlazada**

Influye prioritariamente la fibrilación interna y en menor manera la fibrilación externa y la formación de finos (47).

**Densidad**

La densidad de la hoja está íntimamente ligada a la fibrilación interna al permitir un mayor compactamiento de la fibra durante el secado. Los finos que rellenan los intersticios existentes entre las fibras también provocan un aumento de la densidad (47).

**Resistencia a la tracción**

El aumento de éste parámetro está ligado al aumento del área de enlace, y por tanto a la fibrilación interna, externa y a formación de finos (47).

**Alargamiento**

Ningún efecto tiene individualmente una influencia decisiva sobre el alargamiento. Diversas experiencias efectuadas confirman este apartado. Así, tratando con álcalis diluidos las fibras, lo cual provoca un hinchamiento, se observa un ligero aumento del alargamiento del papel fabricado con ellas (influencia de la fibrilación interna). En el caso de refinar las fibras previamente tratadas con álcali diluido, los valores del alargamiento siguen aumentando, lo que muy probablemente sea debido a la fibrilación externa. Si se adicionan finos a una pasta determinada se produce un ligero aumento de este parámetro. Por otra parte, la disminución del tamaño de las fibras reduce el alargamiento, posiblemente debido a que los segmentos más cortos son menos flexibles (47).

### **Módulo elástico**

La principal influencia sobre este parámetro parece ser la ejercida por la fibrilación interna, ya que esta incide sobre el número de enlaces puentes de hidrógeno. Sin embargo, la dificultad para asignar en los estudios realizados una medida cuantitativa a la influencia sobre el módulo elástico de la fibrilación externa y la producción de finos, no debe ser tomada como que estas influencias sean despreciables (47).

### **Energía de rotura**

La energía de rotura depende directamente del alargamiento, por lo que lógicamente viene afectada por los efectos primarios de una manera similar a éste (47).

### **Crepado (deslizamiento)**

El alargamiento del papel sometido a carga constante tiende a disminuir al evolucionar el refinado. Las observaciones realizadas al efecto parecen poner de manifiesto que el mecanismo del deslizamiento viene afectado más preferentemente por el movimiento entre las fibras que por la distensión de la matriz sólida. Debido a lo anterior el mayor enlace entre fibras (fibrilación interna) y el aumento de la fricción entre ellas (fibrilación externa) reducen el deslizamiento (47).

### **Índice de desgarro**

En general se constata que la resistencia al desgarro tiende a aumentar ligeramente en las primeras etapas del refinado, y posteriormente disminuye rápidamente. Una respuesta a este fenómeno puede considerarse que la fibrilación externa, que tiende a aumentar la fricción entre fibras contiguas, ejercerá una influencia positiva, mientras que la fibrilación interna y la producción de finos, que tienden a dar una mayor homogeneidad en el papel, así como el acortamiento de las fibras ejercerán un efecto negativo. Hay que tener en cuenta que, cuando se aplica un esfuerzo de desgarro a una hoja de papel las fibras deslizan unas sobre otras hasta que son separadas por completo, y por otra parte, el esfuerzo de desgarro está localizado sobre un punto determinado (no sobre una gran área como en el caso de la carga a la rotura, por ejemplo), y la pequeña concentración de uniones por puente de hidrógeno en este punto no podrá impedir el desgarro, incluso en el caso de esfuerzos relativamente pequeños (47).

## Resistencia al plegado

En este caso, a diferencia del anterior, la homogeneidad de la hoja de papel ejerce un efecto beneficioso. El principal efecto primario será la formación de finos, los cuales rellenarán los intersticios fibrosos. El acortamiento de fibras ejercerá un efecto negativo, aunque salvo en el caso de corte excesivo no tendrá una gran influencia. La fibrilación externa e interna influirán positivamente aunque en menor escala (47).

En la figura 63 se muestra algunas propiedades del papel en función de nivel de refino.

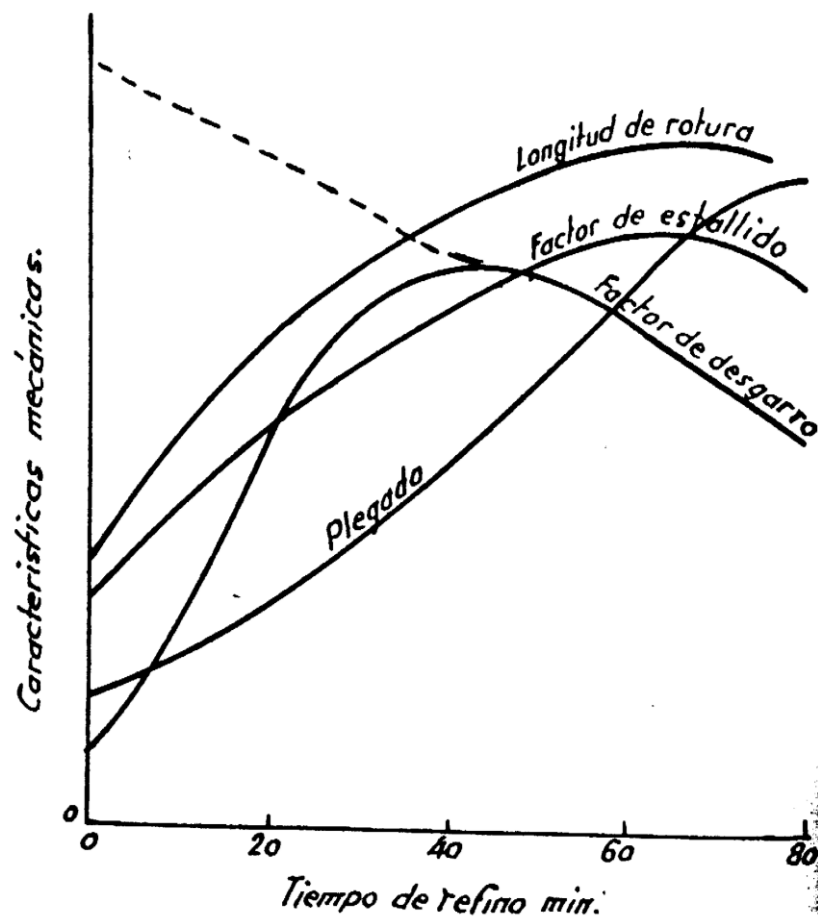


Figura 63 – FUENTE: (6)

## 8.5. PARÁMETROS QUE INFLUYEN EN EL REFINADO

En el refinado existen una serie de factores que afectan al mismo y que no están ligados a la propia tecnología del refinador. Entre ellos pueden ser destacados los siguientes.

### 8.5.1. Aptitud de una pasta al refinado

La aptitud de una pasta al refinado suele caracterizarse por la energía específica (o el tiempo) necesaria para alcanzar un determinado grado de refinado, empleando material

determinado. El grado de refinado puede ser avaluado mediante medidas sobre la suspensión fibrosa (por ejemplo °SR, I.R.A., etc.), características físicas de la pasta (por ejemplo, superficie específica de la fibra), propiedades mecánicas del papel, etc. La aptitud de una pasta al refinador viene condicionada por diversos parámetros, tales como el proceso de obtención, la naturaleza de la fibra o su constitución química. En lo referente a la morfología cabe indicar que las fibras de pared fina y flexible, refinan mejor que las de pared gruesa (47).

La constitución química de la fibra afecta a su aptitud al refinado. Mientras que la celulosa pura, altamente polimerizada y con poca fracción amorfa, es poco sensible al refinado, la presencia de hemiceluloses tiende a facilitar el mismo. La lignina, de carácter hidrofóbico, dificulta la accesibilidad de los componentes holocelulósicos, por lo que a mayor contenido en lignina de una pasta, mayor será su dificultad para el refinado. El procedimiento de obtención de la pasta tiene una marcada influencia sobre la aptitud al refinado de la misma, puesto que afectarán a la constitución química final de la fibra, reparto de los componentes en la pared celular y grado de polimerización y polidispersión de la fracción holocelulósica. Otro factor que afecta a la aptitud de la pasta al refinado, y que no depende de su naturaleza, es el secado previo de la misma antes de la puesta en suspensión en la fábrica de papel. Así se ha observado que las pastas que no han sido sometidas a secado refinan mejor que las pastas secadas. Esto es debido a alta temperatura (cierre de los microporos existente en la pared fibrosa), y que afectan parcialmente a su aptitud de hidratación e hinchamiento (47).

### **8.5.2. pH**

El pH en la operación de refinado afecta a la posibilidad de hinchamiento de la fibra, por lo que valores de pH ácidos o fuertemente alcalinos pueden ocasionar disminuciones en las propiedades mecánicas respecto a las encontradas refinando a pH ligeramente alcalino. Por otra parte, el requerimiento energético de la operación es superior cuando se trabaja a valores bajos (pH 4÷4,5) que a pH 7 (47).

### **8.5.3. Presencia de aditivos**

Los diferentes productos que, en forma de aditivos, suelen estar presentes en la suspensión fibrosa en el momento del refinado ejercen un efecto sobre el mismo, pudiendo ser éste favorable o desfavorable. Los efectos de los aditivos suelen estar referidos a medidas de desgote (°SR) o desarrollo de alguna propiedad física del papel, pero hoy en día no existe ninguna teoría global clara respecto a sus mecanismos de actuación. Los coloides hidrofílicos,

---

tales como la glucosa, el almidón y la carboximetilcelulosa, tienen un efecto acelerador del refinado; en el mismo sentido actúan algunos colorantes directos, los agentes que favorecen el hinchamiento, los secuestrantes de los cationes polivalentes y las resinas de encolado. Entre los agentes favorables se encuentran los cationes polivalentes y los productos que rebajan la tensión superficial (47).

#### **8.5.4. Temperatura**

El aumento de la temperatura afecta negativamente al refinado, salvo en las pastas de alto rendimiento en las que se utiliza el refinado a temperatura elevada debido a las propiedades viscoelásticas de la lignina (47).

#### **8.5.5. Consistencia**

La consistencia de la suspensión fibrosa sometida al refinado es un parámetro que lo afecta considerablemente. Así, se ha constatado prácticamente que las bajas consistencias favorecen la acción de corte. Al ir aumentando la consistencia el efecto de corte disminuye y aumenta la fibrilación. El intervalo más usual de consistencia en la operación de refinado es de 3,5 a 6 %, salvo cuando se realiza a alta consistencia (20 a 40 %). El tratamiento a consistencia elevada parece comportar una interacción considerable entre fibras, por lo que la deformación sufrida por las mismas es menor que en el refinado a baja concentración, lo que se traduce en una mayor longitud de la fibra tratada y una menor formación de finos. Otra característica es que las fibras refinadas a alta consistencia se presentan plegadas, ondulada y torcidas, lo que confiere un aumento del alargamiento en el papel con ellas fabricado (47).

### **8.6. INFLUENCIA DE LA CONCEPCIÓN DE LOS REFINADORES EN LA OPERACIÓN DE REFINADO**

La operación de refinado se ve afectada, obviamente, por la concepción y realización del material empleado en ella. Entre estos parámetros destacaremos:

#### **8.6.1. Dirección del flujo**

La dirección del flujo de pasta respecto a las cuchillas tiene un importante efecto sobre el refinado, de tal manera que para evitar la acción de corte el flujo debe ser perpendicular a la cuchilla. Como casos extremos pueden citarse la pila holandesa y los refinadores cónicos de pequeño ángulo con cuchillas según la generatriz del cono (Jordans) (47).

### 8.6.2. Velocidad

La velocidad relativa existente entre las guarniciones presenta gran influencia sobre el efecto de refinado. Así, se ha comprobado que en los refinadores de disco, para velocidades tangenciales en la borda del disco inferiores a 20 m/s la acción predominante será de corte, por encima de 25 m/s el efecto preponderante será la fibrilación, y entre ambas se producirá un efecto mixto. En los refinadores cónicos, para velocidades comprendidas entre 14 y 17 m/s habrá corte y fibrilación y por debajo de 14 m/s preponderantemente corte (47).

### 8.6.3. Naturaleza de las guarniciones

El material constructivo también afecta al tipo de refinado. En general, los materiales porosos tienden a dar pastas más “engrasadas” que los materiales lisos. Empleando guarniciones de lava o materiales sintéticos se obtiene un refinado con menor efecto de corte que con guarniciones metálicas, pero estas últimas, al conservar durante más tiempo sus aristas vivas, aseguran una calidad de refinado constante (47).

### 8.6.4. Dimensiones de las cuchillas

En la figura 64 se representa un corte de una guarnición, siendo “a” la anchura de la cuchilla, “b” la separación entre cuchillas y “c” la profundidad.

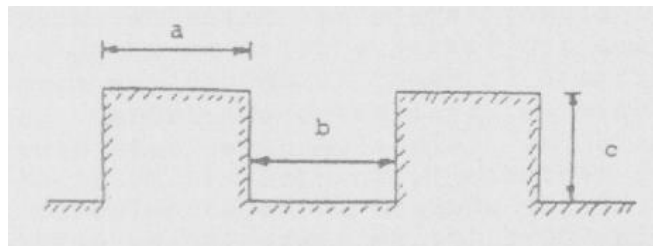


Figura 64 – FUENTE (47)

La anchura de las cuchillas “a” afecta al resultado de la operación; cuchillas anchas favorecen la hidratación y la fibrilación, mientras que las estrechas tienen tendencia a acortar las fibras. La transferencia de energía se realiza al entrar en contacto las guarniciones, sin embargo hay que hacer notar que la zona de transferencia cambia según evoluciona el refinado. A principio, la carga es soportada principalmente por el borde de ataque del rotor (figura 65), y a medida que va progresando el refinado la carga se va desplazando hacia el borde trasero. Este tipo de acción explica los desgastes encontrados en las cuchillas tras su uso (47).

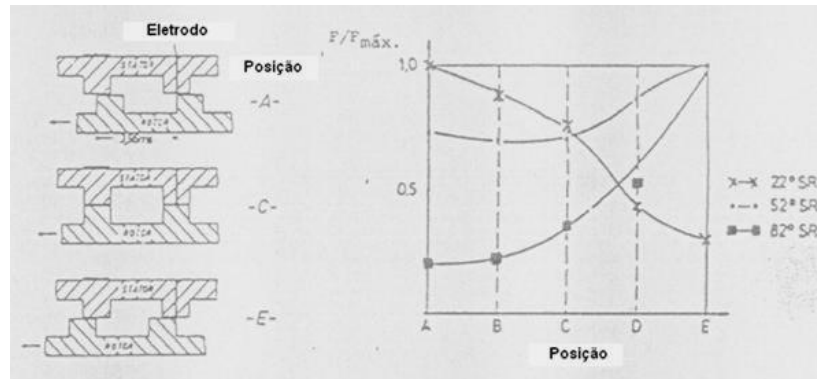


Figura 65 – FUENTE: (47)

En el caso de la profundidad “c”, esta viene dada por un compromiso, pues a mayor profundidad mayor duración de las garniciones, pero también mayores pérdidas en vacío (47).

### 8.6.5. Ángulo de las cuchillas

En los discos es el ángulo que las cuchillas forman con la dirección radial del disco (figura 66). Las cuchillas con mayor ángulo de inclinación consumen más energía total, con menor consumo de energía efectiva, produciendo más fibrilación y menos acortamiento de fibras, resultando en una pasta con mejores propiedades físicas. Ejemplo de especificación de cuchilla: 3 x 3 x 5°.

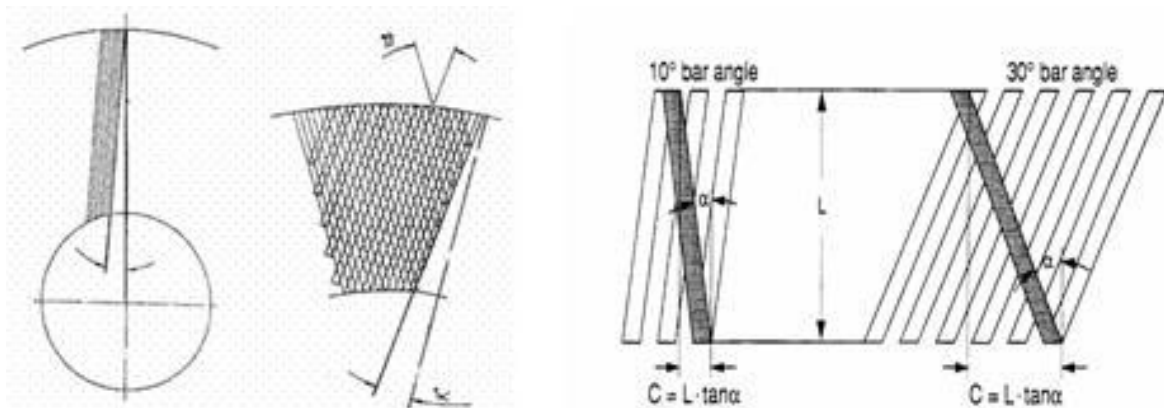


Figura 66 – FUENTE: (7)

## 8.7. POTENCIAS EN EL REFINADO

La potencia total absorbida por un refinador es:

$$P_t = P_u + P_o$$

Donde  $P_u$  representa la potencia útil, o potencia empleada en el refinado de la pasta, y  $P_o$  es la potencia en vacío. Este último término engloba las diferentes potencias disipadas por pérdidas y rozamientos mecánicos, turbulencia en los alveolos formados por las cuchillas y la potencia de bombeo. En las máquinas actuales las pérdidas por rozamientos mecánicos han sido minimizadas en comparación con los otros términos; la potencia disipada por turbulencia puede cifrarse como proporcional a la quinta potencia del diámetro de la placa y a la tercera potencia de la velocidad angular, y la potencia por bombeo como proporcional a los cuadrados del diámetro y de la velocidad angular (47).

Sin embargo, la potencia útil es sensiblemente proporcional a la tercera potencia del diámetro de las placas y a la primera potencia de la velocidad angular, por lo que a medida que aumenta porcentualmente la velocidad del refinador, la potencia por pérdidas aumenta porcentualmente respecto a la potencia total (figura 67), y de aquí la tendencia generalizada a la disminución, dentro de lo que permite el desarrollo de las propiedades requeridas, de la velocidad tangencial, de manera que la relación  $P_u/P_t$  sea la mayor posible (47).

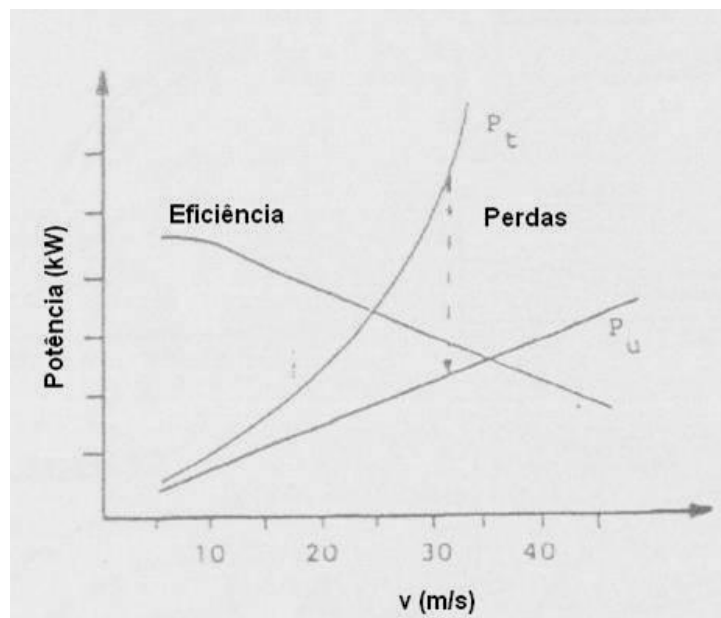


Figura 67 – FUENTE: (47)



## 8.8. ENTREHIERRO

El entrehierro es la distancia existente entre el rotor y el estator, y determina la potencia absorbida por la máquina. En la figura 68 puede verse la evolución de la potencia absorbida por un refinador en función de la distancia entre sus guarniciones. Para un valor del entrehierro elevado el refinador solo ejerce un efecto de bombeo; al ir disminuyendo la separación entre placas (hacia la derecha en la figura) se alcanza un valor a partir del que la potencia aumenta de manera muy rápida al comenzar a refinar la máquina. Este punto, denominado entrehierro crítico, separa dos zonas de diferente tipo de turbulencia: en la zona de bombeo la macroturbulencia es predominante, mientras que en la zona de refinado la turbulencia es de pequeña escala. El valor de entrehierro crítico es del orden de  $100 \div 30 \mu\text{m}$  (47).

A medida que el refinado progresa el valor del entrehierro disminuye, tal como puede observarse en la figura 69 que muestra su variación a medida que evoluciona el refinado, manteniendo constante la carga. Dado que la separación entre las guarniciones es superior al diámetro de una fibra individual, salvo para los valores de  $^{\circ}\text{SR}$  elevados, cabe suponer que se refinan agregados de fibras y que el número de fibras que constituyen los agregados disminuye a lo largo del refinado, debido al corte y al aumento de flexibilidad (47).

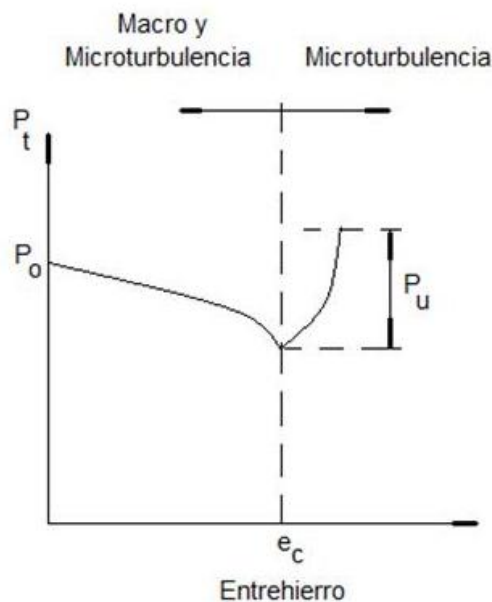


Figura 68 – FUENTE: (47)

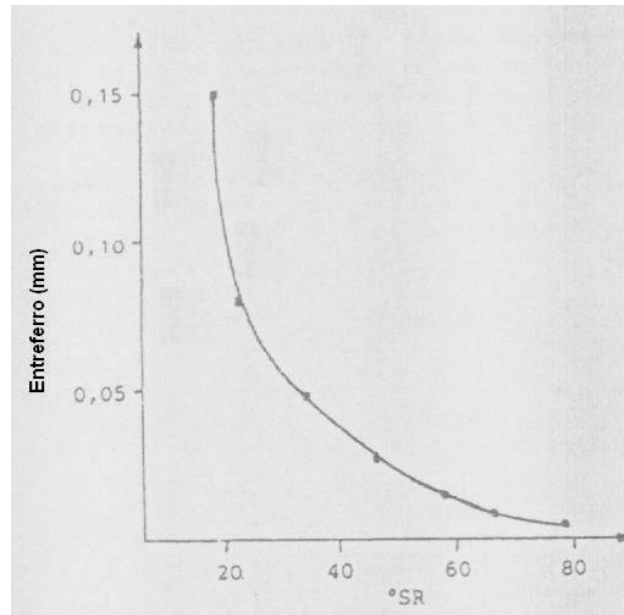


Figura 69 – FUENTE: (47)

### 8.9. CARACTERIZACION DEL REFINADO

Para describir la acción de un refinador suelen utilizarse dos conceptos independientes: la “cantidad de refinado” y la “calidad de refinado” (47).

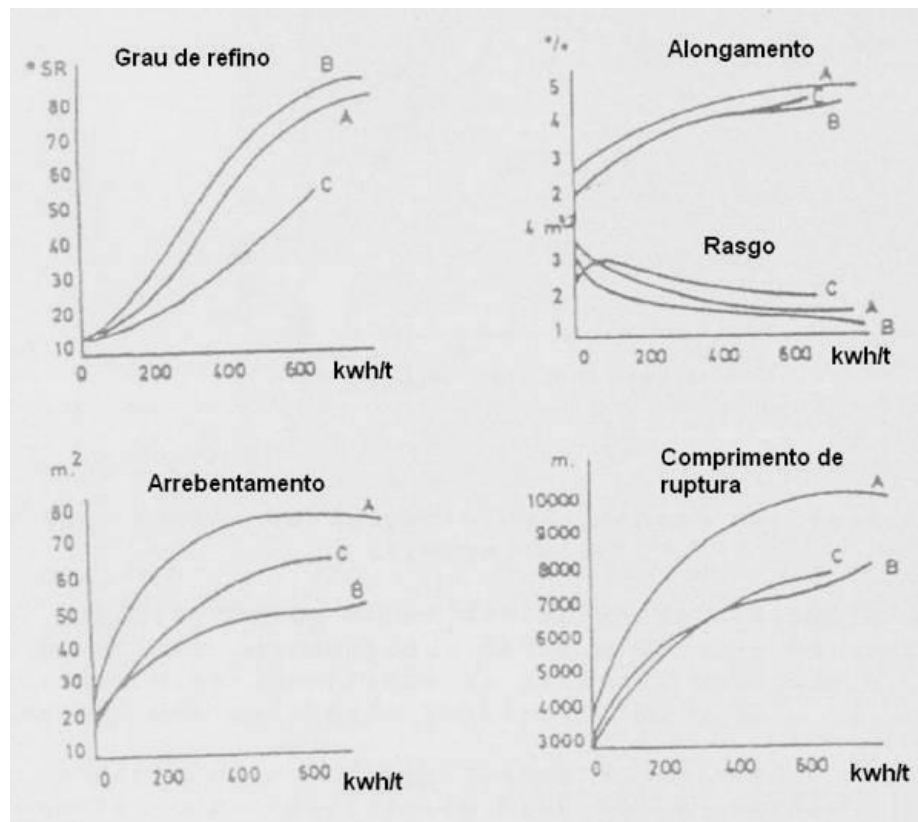


Figura 70 – FUENTE: (47)

La cantidad de refinado viene definida por la energía específica neta (kWh/t), esto es, la potencia útil absorbida dividida por el caudal másico tratado, y depende de las guarniciones elegidas y del tipo de pasta, tal como se indica en la figura 70 que muestra los resultados obtenidos en la caracterización de una pasta con un determinado equipo y diferentes guarniciones (47).

El aspecto cualitativo del refinado está referido a la mayor o menor intensidad a que éste ha sido ejecutado, y se refleja de manera particular en el mayor corte producido a las fibras para una energía específica dada. Viene definido por la carga específica de borde (“Specific Edge Load”) (47).

$$Bs = Pu / Lc \text{ (Ws/m = J/m)}$$

Donde Lc es la velocidad de corte o longitud de arista cortada (“cutting length”) que viene dada por la expresión (47):

$$Lc = n.Zr.Zs.l \text{ (m/s)}$$

Siendo “n” la velocidad de rotación (rps), “Zr” y “Zs” el número de cuchillas del rotor y estator, respectivamente, y “l” la longitud de la cuchilla [m]. Cuanto mayor es Lc, mayor el número de impactos de la guarnición contra las fibras y, a potencia constante, más débil será la energía por impacto. Por tanto la carga específica de borde cuantitativa la severidad de los impactos recibidos por las fibras (47).

La experiencia ha demostrado que con una pasta dada, refinadores con la misma anchura, material y ángulo de cuchillas, trabajando con la misma anchura, material y ángulo de cuchillas, trabajando con la misma carga específica de borde, darán pastas con el mismo estado de refinado (mismas características), lo que permite comparar dos aparatos aparentemente diferentes. “Bs” depende de la pasta (existe para cada pasta un valor crítico que no conviene sobrepasar), pero permite caracterizar el trabajo de un refinador. Para valores altos de Bs se favorece el corte, y para valores bajos la fibrilación (47).

En la figura 71, se representa la diferente evolución del índice de tracción frente a la energía específica para dos cargas específicas de borde y en la 9b los valores del °SR obtenidos en el refinado. Como puede observarse la severidad del refinado a 4 Ws/m hace que para un mismo valor de energía específica el desarrollo de la propiedad física sea notablemente más elevado que para 1 Ws/m. Debe ser también remarcada la ambigüedad del valor del °SR con una evolución diferente según sea el valor de Bs y con nula significación en el caso de 1 Ws/m. Es sin embargo en la comparación del índice de tracción con el índice de desgarramiento del ensayo anterior donde puede observarse mejor la influencia de Bs (47).

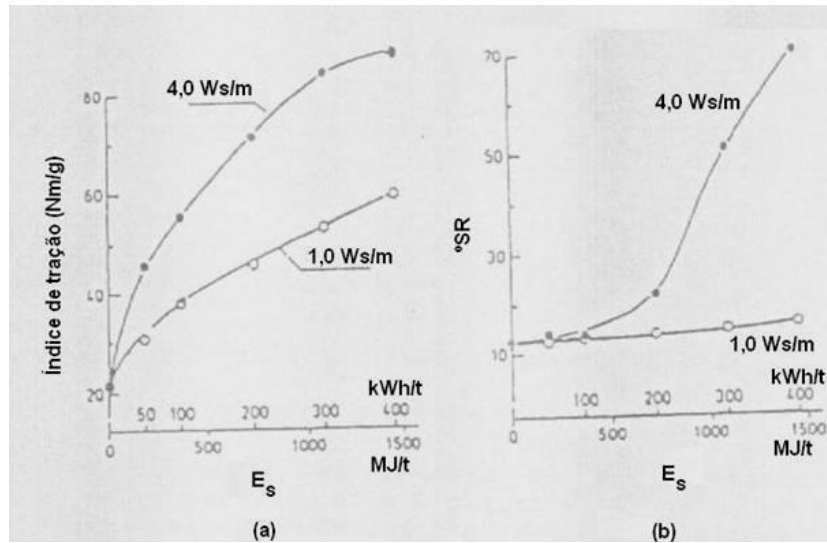


Figura 71 – FUENTE: (47)

La posibilidad de hacer variar industrialmente el valor de  $B_s$  puede ser conseguida, de acuerdo con su definición, mediante dos vías: variando la potencia aplicada o variando la velocidad del refinador (variación de  $L_c$ ). La modificación de la potencia aplicada tendrá como consecuencia una modificación bien en la energía específica, o bien en la producción del refinador. La modificación de la velocidad es la que realmente convierte en independientes los parámetros  $E_s$  y  $B_s$ , permitiendo encontrar el óptimo de las propiedades buscadas (figura 72). Debe hacerse notar, tal como se ha dicho anteriormente, que la carga específica de borda no tiene en cuenta la anchura, material y ángulo de las cuchillas de las guarniciones, parámetros que pueden tener una gran importancia para el resultado del refinado (47).

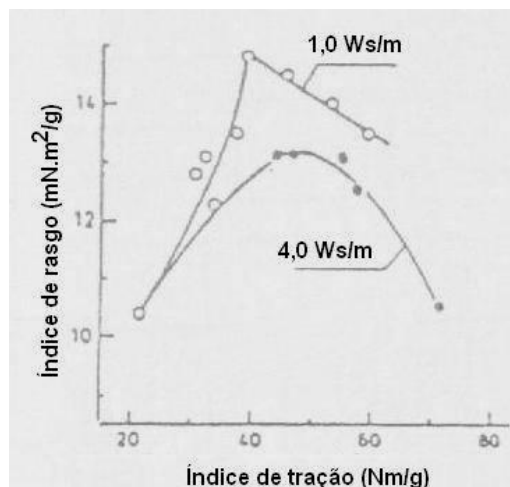


Figura 72 – FUENTE: (47)

## 9. ADITIVOS FUNCIONALES

Los aditivos funcionales constituyen la parte fundamental para determinar las características del papel. Abajo algunos aditivos usados en la fabricación de papel par cartpon corrugado:

### 9.1. SULFATO DE ALUMÍNIO (ALAMBRE)

O sulfato de aluminio se utiliza para modificar o alterar un pH (potencial de hidrógeno) de pasta si se trata de producir papel, determinado de un sistema acuoso. Es una sal ácida, ingresa con una concentración de 47 al 49% en estado líquido. Es un acondicionador del potencial de hidrógeno existente en un sistema para obtener mayor eficiencia de otro producto químico que es la resina encolante. Se dosifica en el silo de máquina en la succión de la bomba “FAN”. Además se coloca una línea de agua blanca para aumentar la disolución que a su vez permite aumentar la eficiencia del alumbre sobre la resina.

### 9.2. RESINA ENCOLANTE

La resina encolante es usada para obtener un papel semipemeable, capaz de retardar el proceso de absorción de agua a las fibras de celulosa que forman el papel. La resina encolante faculta al papel cierta semipermeabilidad, es decir que el papel no se humectará rápidamente al contacto con el agua, ya que sus fibras recubiertas por una película que impiede que las fibras absorban de manera rápida el agua. El papel encolado trabaja en un rango de pH de 4,4 a 4,8 y en ciertos casos alcanza hasta 5.2 como “testliner”. Se adiciona en el tanque de mezcla o almacenamiento, por medio de un embudo, además se adiciona agua fresca para aumentar la diluición del producto y dar un mejor recubrimiento de la resina sobre la fibra.

Hay una variedad blanca y negra de la resina encolante. La variedad blanca es de color blanca y se usa en papeles blancos y la variedad negra se usa para papeles coloreados o de pulpa sin blanquear. La cola generalmente se añade a la pasta con suficiente anticipación antes de la formación de la hoja, a fin que se distribuya uniformemente sobre la fibra. Mediante la adición del alumbre se coagula o fija la cola sobre la fibra.

### 9.3. RESINA CON RESISTENCIA EN HÚMEDO

El objetivo de esta resina es proporcionar o mantener en el papel la resistencia física, aún cuando este haya sido humedecido. Esta resina se caracteriza por su carácter catiónico,

---

permitiendo una mejor reacción con las fibras celulósicas utilizadas en la fabricación de diferentes tipos de papel. Trabaja normalmente con un pH alcalino más cuando se une directamente con el sulfato de aluminio. El producto debe ser almacenado a 25 °C bajo techo para lograr su mayor tiempo de vida útil.

#### 9.4. ALMIDÓN CATIONICO

Otro aditivo es el almidón que se usa principalmente para dar rigidez al papel, incorporándola a la pasta antes de la formación de la hoja. Este aditivo es usado para aumentar los valores de pruebas físicas del papel y aumentar la retención de finos del sistema en el papel. El derivado del almidón de maíz ha sufrido una modificación tal que sus moléculas son catiónicas, es decir cargadas positivamente. Las cargas catiónicas del almidón catiónico son atraídas por la fibra de celulosa que son de naturaleza aniónica, dando como resultado:

- Aumento de la resistencia física del papel. El almidón contribuye al no-ensuciamiento de prensas húmedas y secadores por levantamiento de fibras.
- Aumento de retención de finos y cargas minerales. Mejorando la formación de la hoja, opacidad y reduciendo la tendencia ...
- Aumenta el drenaje del agua sobre la mesa logrando disminuir el grado de refinación;
- Reducción de humedad;
- Reducción de reventones en el papel;
- Papel más seco, incremento en la velocidad de la máquina.

#### 9.5. COLORANTES

Se le añaden a la pasta sustancias colorantes de naturaleza mineral u orgánica (según el tipo de papel). Los colores obtenidos de sustancias minerales son más resistentes a la luz que los derivados orgánicos. Se puede añadir el color en masa (en las mezcladoras) o en algunos tipos de papel se efectúa cuando se forma la hoja en la máquina continua.

## **10. AYUDANTES DE PROCESSO**

### **10.1. AGENTE DE RETENCIÓN**

El objetivo del agente de retención é reducir la basura aniónica en el papel mediante la aportación de cargas positivas que se fijarán posteriormente a la fibra celulosa, y se añade en la fabricación del papel para mejorar la retención de las cargas cuando la hoja de papel se está formando. Mas que un aditivo se considera un elemento auxiliar del papel. Normalmente, es un polímero catiónico de bajos peso molecular. Líquido muy viscoso. Trabaja en rangos pH ácidos, neutro y ligeramente alcalino. Se dosifica en el tanque de mezcla con una línea de difusión para obtener una mayor eficiencia del producto.

### **10.2. ANTIENCRUSTANTE**

Su objetivo es eliminar, mediante el uso de una de presión, depósitos de gomas, breas formadas sobre la tela de la mesa de formación. Es un polímero utilizado en el molino de prevención de formación. La selección especial de polímeros catiónicos inhibe la formación de depósitos orgánicos.

### **10.3. ANTIBACTERICIDA**

Su objetivo es controlar o disminuir el desarrollo microbacteriano originado por la materia orgánica, obteniendo un producto en el cual puedan almacenarse o ponerse en contacto directamente con productos alimenticios. Es una mezcla de productos orgánicos. Son también componentes cuya función es la de destruir determinados tipos de hongos y bacterias que se instalan en la formación del papel, las cuales incluso pueden provocar roturas en el papel.

### **10.4. HIDRÓXIDO DE SÓDIO (SODA CÁUSTICA)**

El hidróxido de sódio es uma sal extremadamente alcalina. El hidróxido de sodio líquido ingresa con una concentración del 48 al 50% de sólidos. En la máquina de papel, se utiliza la sosa cáustica para el lavado y limpieza de la tela de la mesa de formación, lavado de la malla del espesador, ablandamiento de la fibra celulosa e para modificar o alterar el pH en los cambios de tipo de papel encolados.

### 10.5. DISPERSANTE

El dispersante es un agente penetrante y dispersante orgánico, con propiedades antiespumantes. Se utiliza como auxiliar en la elaboración de pasta química y semiquímica. Para dispersar la resina, incrustaciones y otros materiales para evitar o prevenir la formación de depósitos en los lavadores, rejillas, telas de formación, mallas y otros equipos.

## 11. CIRCUITO DE APROXIMACIÓN

La mezcla preparada en la etapa después es bombeada a la cuba de máquina para entrar al circuito de aproximación. En este punto la pasta tiene una consistencia de aproximadamente 3 %, la cual alimenta a un cajón de nivel para luego entrar al silo de agua de máquina donde se produce una dilución de la pasta al 0.8%. La pasta es ingresada por una bomba de velocidad variable que alimenta en su recorrido a dos equipos de depuración, centricleaner y colador vertical, para luego alimentar el equipo principal de esta etapa que es el cajón presión. El punto de unión entre circuito de aproximación y etapa de formación es el cajón presión (52).

En esta etapa se agregan tres productos químicos a la pasta, uno para dar el tono al papel periódico (matizante), adicionando en la succión de la bomba que saca la pasta de la cuba máquina. Adicionalmente se agregan dos productos como agentes de retención de finos de la hoja, un coagulante que se adiciona en la succión de la bomba “fan” y un floculante adicionado en la salida del colador vertical. Hoy día las fibras son preparadas más comumente usando refinadores continuos. Frecuentemente, las fibras refinadas son almacenadas en un tanque de almacenaje desde el cual se suministra al sistema de preparación de la pasta para la máquina de papel. La disposición de flujos en sistema de preparación de la pasta varia consideravelmente de máquina a máquina. Una disposición posible se muestra en la figura 73 (52).



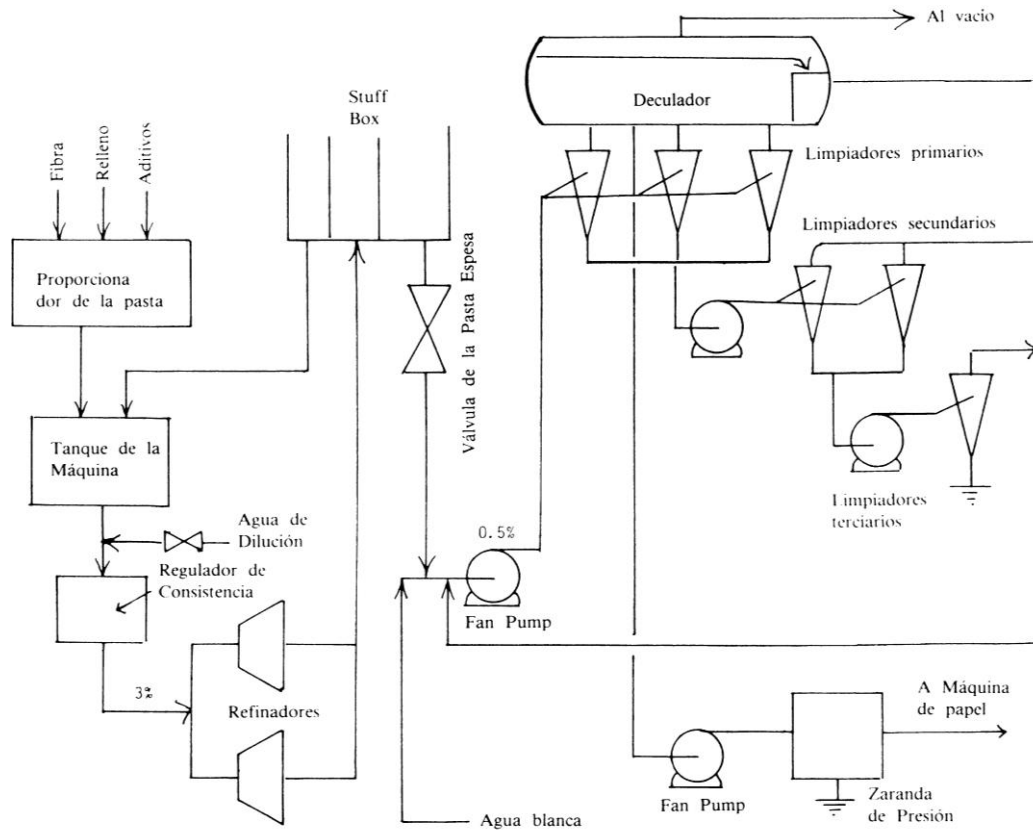


Figura 67 – FUENTE: (52)

La pulpa lavada refinada y aditivos se mezclan en un sistema proporcionador de pastas el cual puede operar por “batches” en forma continua. La pulpa lavada puede venir de los refinadores, almacenaje de alta densidad o un pulpeador. El pulpeador es esencialmente un gran tanque con agitador en el cual a pulpa seca, pulpa en hojas secas o papel desperdicio seco se dispersa en agua. Los componentes de la mezcla se descargan al tanque de la máquina. La consistencia de la descarga del tanque en la máquina controlada por medio de un regulador de consistencia y pasa a través de los refinadores. Estos refinadores pueden usarse para mejorar las propiedades de la fabricación del papel o pueden ser operados para mejorar la tasa de drenaje e formación sobre la tela de “fourdrinier”. Las descargas de los refinadores van al “stuff box” el cual es esencialmente una caja de nivel constante. En rebosadero de la “stuff box” regresa al tanque de la máquina. La pasta espesa del “stuff box” es inyectada en la succión de la “fan pump” principal (52).

El flujo de la pasta espesa a la “fan pump” principal es regulado por una compuerta para controlar el peso básico de la hoja producida por la máquina de papel. La mayor parte del flujo a la succión del “fan pump” es agua blanca recirculada de la máquina de papel. La

descarga de la “fan pump” principal vá a un grupo de depuradores centrífugos primários. Los depuradores remueven pequeñas partículas de mugre de la pasta (52).

El depurador centrífugo consiste en un cono que tiene una entrada y dos salidas. La pasta entra tangencialmente por el borde ancho del cono y pasa al borde pequeño del cono. Un movimiento circular es impartido al flujo de pasta debido a la entrada tangencial. Las fuerzas centrífugas actúan sobre las partículas pesadas y sobre las fibras alojando a las regiones exteriores del cono. Las partículas de suciedad pueden deslizarse por la superficie del cono hacia abajo a la salida en el extremo estrecho. Cuando el flujo de pasta alcanza al el extremo estrecho del cono se revuelve e pasa a través del centro del cono hacia a la salida en el extremo ancho llevando algo de suciedad provablemente con las fibras. Así que descarga el rechazo en el extremo angosto recibirá partículas pesadas. La descarga de aceptados en el otro extremo puede aún contener algunas partículas de suciedad. Para salvar fibra adicional los rechazos serán limpiados en un grupo de depuradores secundarios como se muestra en la figura 74 (52).

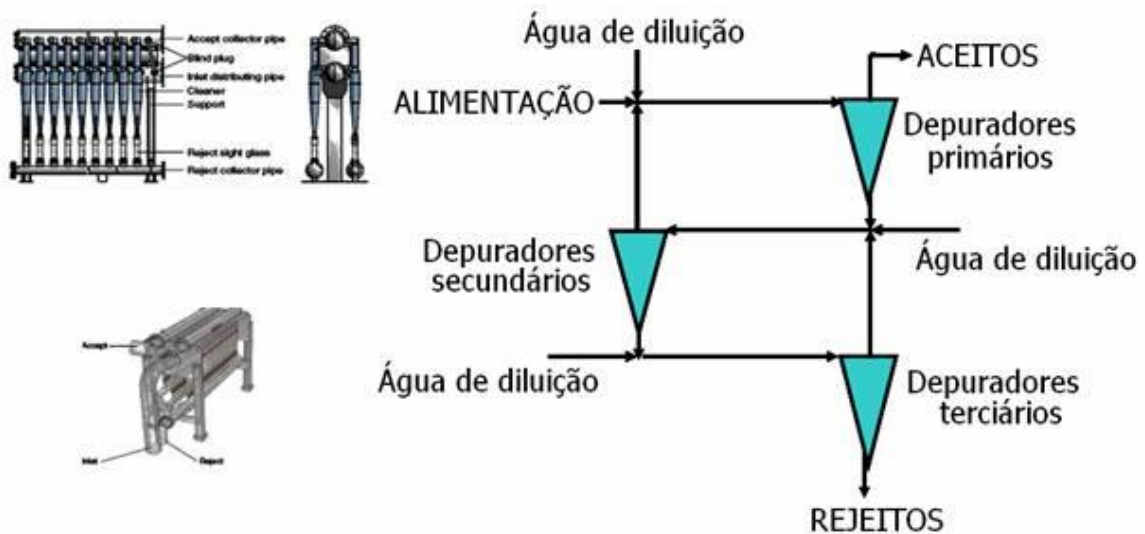


Figura 74 – FUENTE: (6)

Los rechazos de los depuradores secundarios serán limpiados usando depuradores terciarios, y los rechazos de los terciarios posiblemente serán descartados. El aire disuelto de la pasta, aceptado por depuradores primários será eliminado en el deculador, el cual elimina aire aplicando vacío. La descarga del deculador es bombeado por una “fan pump” secundaria a través de zarandas a al caja de entrada (“headbox”) de la máquina. Las zarandas remueven partículas contaminantes de peso ligero en la pasta (52).

---

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS (Internet: marzo y abril/2009)

- (1) <http://servicio.cid.uc.edu.ve/ingenieria/revista/v11n2/11-2-7.pdf>
- (2) <http://enciclopedia.us.es/index.php/Papel>
- (3) <http://www.papermarket.cl/>
- (4) [http://www.porquebiotecnologia.com.ar/educacion/cuaderno/ec\\_97.asp?cuaderno=97](http://www.porquebiotecnologia.com.ar/educacion/cuaderno/ec_97.asp?cuaderno=97)
- (5) <http://www.uchile.cl/cultura/grabadosvirtuales/apuntes/papel.html>
- (6) [http://semades.jalisco.gob.mx/02/pdf/uso\\_sustentable\\_papel.pdf](http://semades.jalisco.gob.mx/02/pdf/uso_sustentable_papel.pdf)
- (7) [CAMPOS, E. S. Curso de fabricação de papel. “In company”: Adamas. Apostila ABTCP, 2008.](#)
- (8) <http://es.wikipedia.org/wiki/Papel>
- (9) <http://www.ipe.es/upload/Diagnostico.pdf>
- (10) KEIM, K. El papel, 1966.
- (11) [http://www.aspapel.es/memoria\\_final.pdf](http://www.aspapel.es/memoria_final.pdf)
- (12) <http://www.papermarket.cl/papermarket/site/pags/20030528182418.html>
- (13) <http://www.reciclapapel.org/htm/info/tecnica/ciclo/Tipospapel.asp>
- (14) <http://html.rincondelvago.com/tipos-de-papel.html>
- (15) <http://www.iconio.com/ABCD/B/pdf/papel.pdf>
- (16) CAMPOS, E.S. Curso de fabricação de celulose e papel. “In company”: Bracelpa. Apostila ABTCP, 2009.
- (17) [http://www.fing.edu.uy/iq/maestrias/icp/materiales/2007/08-Papermaking/FundamFabPapel\\_14\\_4pp.pdf](http://www.fing.edu.uy/iq/maestrias/icp/materiales/2007/08-Papermaking/FundamFabPapel_14_4pp.pdf)
- (18) POCOVI, D.H.C. Nuevas tendencias em la fabricación del papel para ondular. El Papel, Marzo/Abril 1988 (versión 2009), pg. 81-84.
- (19) TURRADO, J. et al. Optimización del proceso de fabricación del cartón corrugado. MARI/Board Converting News, Mayo 1994, pg. 45-49.
- (20) MOLINERO, J.O. Aptitud de los papeles kraft en el pegado del cartón corrugado. Inv. Téc. Papel núm. 98, 1988, pg. 873-883.
- (21) <http://www.reciclapapel.org/htm/info/tecnica/tpsofibras.asp>
- (22) \_\_. Preparación y refinado de pastas. Universidad Politécnica de Barcelona. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Terrassa. Cátedra de tecnología papelera/CIPAGRAF, s.d.

- 
- (23) <http://www.monografias.com/trabajos46/hemicelulosas-maderas/hemicelulosas-maderas2.shtml>
  - (24) [https://www.u-cursos.cl/forestal/2008/2/TM029/1/material\\_docente/objeto/1793](https://www.u-cursos.cl/forestal/2008/2/TM029/1/material_docente/objeto/1793)
  - (25) <http://www.monografias.com/trabajos15/composicion-madera/composicion-madera.shtml>
  - (26) <http://www.papelnet.cl/celulosa/fase4.htm>
  - (27) [www.globalequip.com](http://www.globalequip.com)
  - (28) <http://www.scielo.cl/pdf/infotec/v19n5/art14.pdf>
  - (29) [http://www.jetro.go.jp/chile/pdf/nedo\\_papel\\_pulpa.pdf](http://www.jetro.go.jp/chile/pdf/nedo_papel_pulpa.pdf)
  - (30) <http://www.textoscientificos.com/papel/pulpa/comparativa>
  - (31) <http://www.textoscientificos.com/papel/pulpa/pasta-termomecanica>
  - (32) <http://www.p2pays.org/ref/20/19329.pdf>
  - (33) [www.sappi.com](http://www.sappi.com)
  - (34) <http://www.textoscientificos.com/polimeros/introduccion>
  - (35) [www.regmed.com.br](http://www.regmed.com.br)
  - (36) [http://www.empacar.com.bo/calidad\\_corrugado.htm](http://www.empacar.com.bo/calidad_corrugado.htm)
  - (37) [www.fing.edu.uy/iq/maestrias/icp/materiales/2007/08-Papermaking/FundamFabPapel\\_14\\_4pp.pdf](http://www.fing.edu.uy/iq/maestrias/icp/materiales/2007/08-Papermaking/FundamFabPapel_14_4pp.pdf)
  - (38) [www.fing.edu.uy/iq/maestrias/icp/materiales/2007/08-Papermaking/FundamFabPapel\\_13\\_4pp.pdf](http://www.fing.edu.uy/iq/maestrias/icp/materiales/2007/08-Papermaking/FundamFabPapel_13_4pp.pdf)
  - (39) <http://www.textoscientificos.com/papel/pulpa>
  - (40) <http://www.textoscientificos.com/papel/pulpa/produccion-mecanica>
  - (41) <http://www.conama.org/documentos/140.pdf>
  - (42) <http://www.cismadeira.com/especies/downloads/pastapapel.pdf>
  - (43) <http://arte.upla.cl/texto-imagen/el-papel.pdf>
  - (44) [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/leip/villarreal\\_j\\_la/capitulo4.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leip/villarreal_j_la/capitulo4.pdf)
  - (45) <http://www.monografias.com/trabajos44/celulosa-madera/celulosa-madera.shtml>
  - (46) <http://www.fabriano.com.ar/laempresa.php>
  - (47) LÓPEZ, A.L.T., Tecnología del Papel (apuntes de curso). Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Terrassa, s.d.
  - (48) SENAI CETCEP. Preparação de massa e desagregação da massa (unidade 3). Apostila do curso de Tecnologia da fabricação de papel.
  - (49) SENAI CETCEP. Fabricação de papel – preparação de massa. Livro.

- (50) RENÉ et al. Depuración de las pastas. Comites Técnicos de Pastas y Papeles. Asociación de Investigación Técnica de la Industria Papelera Española, s.d.
- (51) GÓMEZ, B. et al. Refino de pastas. Comites Técnicos de Pastas y Papeles. Asociación de Investigación Técnica de la Industria Papelera Española, s.d.
- (52) \_\_. Fundamentos de operación de máquinas de papel (guía de estudio). TAPPI, s.d.
- (53) [www.cib.espol.edu.ec/bivir/tesis.asp](http://www.cib.espol.edu.ec/bivir/tesis.asp)