

## MÉTODOS UTILIZADOS EN EL DESTINTADO DE PAPEL DESPERDICIO – APROXIMACIÓN AL ESTADO DEL ARTE

Andrea Alzate Machado\*<sup>†</sup>, Hader H. Alzate Gil\*

\**Universidad Pontificia Bolivariana, Cir. 1a #70-01, Medellín, Colombia.*

Recibido 2 Septiembre 2011; aceptado 12 Mayo 2012  
Disponible en línea: 26 Junio de 2012

**Resumen:** Este trabajo consolida la información relacionada con los diferentes procesos de destintado, tales como: alcalino, neutro y enzimático; además, de las nuevas alternativas tecnológicas: destintado por ultrasonido, por radicales libres, en columnas de flotación, entre otros. La información proporcionada en este documento se refiere al papel que desempeñan algunas de las sustancias químicas empleadas en los procesos, a las condiciones óptimas de trabajo, a las enzimas específicas para los diferentes tipos de papeles impresos, a las modificaciones en equipos y a las mejores combinaciones de papel impreso vs. proceso de destintado para obtener las mejores propiedades en la fibra destintada. *Copyright © 2011 UPB*

**Palabras clave:** Papel Reciclado, Tintas, Destintado por Flotación, Destintado Alcalino, Destintado Neutro, Destintado Enzimático, Sistema de Radicales Libres, Ultrasonido.

**Abstract:** This work aims to consolidate information related to the different deinking processes, such as: alkaline, neutral, and enzymatic, in addition, new technological alternatives: deinking by ultrasound, free radicals, flotation columns, among others. The information provided in this document refers to the role of some of the chemicals used in the process, the optimal conditions, the specific enzymes for different types of printed paper, changes in equipment and the best combinations vs. printed paper deinking process to obtain the best properties in the deinked fiber.

**Keywords:** recovered paper, inks, flotation deinking, alkali deinking, neutral deinking, enzymatic deinking, free radicals system, ultrasound.

### 1. INTRODUCCIÓN

La incorporación de las fibras secundarias al proceso de fabricación del papel es una estrategia que se ha venido utilizando desde hace décadas. La información referente a la reutilización de papel reciclado data del siglo XVII en Dinamarca, mientras que la primera publicación sobre destintado de papel viejo aparece en Alemania en 1774 y la primera patente sobre destintado se dio en Inglaterra en 1800. Sin embargo, no fue hasta

la aparición de la máquina de papel (inventada a finales del siglo XVIII, perfeccionada por los hermanos Foudrinier y con implantación progresiva a lo largo del siglo XIX) que el papel reciclado empezó a utilizarse a gran escala ([Sánchez, 2000](#)).

El desarrollo del uso de las fibras recicladas en la industria del papel ha aumentado exponencialmente en la segunda mitad del siglo XX, convirtiéndose en una materia prima indispensable para el desarrollo sostenible.

---









Autor al que se le dirige la correspondencia:

<sup>†</sup> Tel. (+574) 3672707.

E-mail: [andreaam@une.net.co](mailto:andreaam@une.net.co) (Andrea Alzate).

La utilización de fibras secundarias como es el caso del papel desperdicio, se ha convertido para la industria papelera en una de las mejores opciones de materia prima, ya que el material reciclado es más barato que el original, se reducen los costos de manufactura y se disminuye el impacto ambiental, preservando cada vez más los recursos forestales y contribuyendo con la acumulación ó eliminación de basuras.

La [Figura 1](#) muestra un ejemplo del efecto en el ahorro de materias primas, cuando se emplea papel reciclado en lugar de fibra virgen para fabricar una tonelada de papel.

Para fabricar una tonelada de papel	Materia prima Kg m <sup>3</sup> madera árboles	Consumo de agua litros	Consumo de energía Kw/h Tep	Generación de residuos Kg
Papel de fibra virgen, pasta química	 3,5 m <sup>3</sup> 14 árboles 2.300 kg	 15 m <sup>3</sup>	 9.600 kw/h 0,4 tep	 1.500 kg
Papel reciclado	 1.250-1.400 kg papel usado	 8 m <sup>3</sup>	 3.600 kw/h 0,15 tep	 100 kg

tep: tonelada equivalente de petróleo

**Fig. 1.** Consumos típicos en la fabricación de papel a partir de pulpa virgen ó recuperada ([CPRAC, 2008](#)).

La mayor desventaja del papel desperdicio son las considerables cantidades de tinta lo cual afecta directamente la calidad de la pulpa esperada, por lo que es necesario sustituir los tratamientos químicos convencionales para el destintado de pulpa por procesos económicamente viables y que no generen impactos ambientales negativos, además de involucrar fenómenos interfaciales con el fin de limpiar la fibra, es decir, remover la tinta adherida a la fibra y separarlas en la mayoría de los casos, por flotación. Los aditivos químicos juegan un papel determinante en este proceso, debido a que mediante mecanismos físico-químicos permiten llevar a cabo la modificación o remoción de las tintas de la superficie del papel, siendo relevante buscar métodos alternos de destintado, con los cuales se puedan obtener los mismos o mejores niveles de blancura, con menor costo en las materias primas y con reducción de sólidos y aguas de desechos provenientes de los procesos convencionales de destintado.

## 2. MARCO TEORICO DEL DESTINTADO

### 2.1. Información general del proceso de destintado

El destintado es un proceso de remoción de contaminantes (tinta impresa y materiales de terminación aplicados) de la fibra de celulosa reutilizable del papel. Básicamente, el proceso de destintado se puede dividir en dos grandes etapas: La desintegración de papel impreso, en la cual se produce el desprendimiento de la tinta y otros contaminantes, y la separación de los mismos de la suspensión fibrosa. Algunos procesos de destintado incorporan, luego de la desintegración, tres etapas para la separación de la tinta: lavado, flotación y dispersión; además, se agregan etapas de tamizado mecánico para contaminantes pesados, y de centrifugación u otros limpiadores especiales para la remoción de contaminantes livianos.

### 2.2. Proceso de destintado de papel desperdicio

Las primeras etapas para el proceso de destintado son similares en las plantas de obtención de pulpa. El destintado se lleva a cabo gracias a la acción de tres formas de energía: mecánica, térmica y química.

#### 2.2.1. Pulpeo

El equipo comúnmente empleado para la desintegración de la pulpa se llama pulper, en el cual se produce una agitación mecánica que desintegra el papel y se produce el hinchamiento de las fibras, debilitando los enlaces interfibras, degradando determinados componentes y reduciendo o eliminando las fuerzas de enlace entre tinta y soporte fibroso, produciéndose la modificación o retiro de los pigmentos de las tintas de la superficie del papel, como consecuencia del agregado de agua y productos químicos.

### 2.2.2. Curado

En algunos sistemas se incorpora esta etapa, el curado es el tiempo adicional de acción de los reactivos químicos sobre la pasta obtenida en el pulpeo. El resultado depende de la concentración de los reactivos agregados, del tiempo adicional (curado) y de la temperatura.

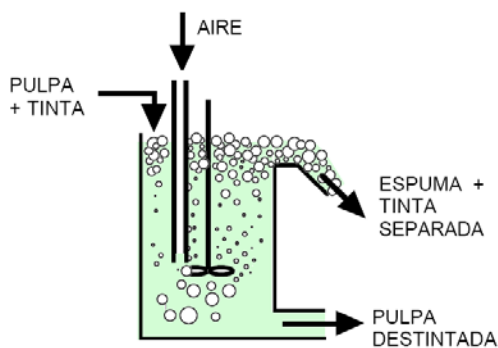
### 2.2.3. Tamizado y limpieza centrifuga

En esta etapa se lleva a cabo la limpieza o remoción de contaminantes que puedan estar presentes en la pulpa, esta limpieza se da por medios mecánicos, ya sea por diferencia de tamaños utilizando tamices o por diferencia de densidades, utilizando limpiadores centrífugos o hidrociclones.

### 2.2.4. Flotación

El proceso de flotación es un proceso de separación ampliamente utilizado. Éste se lleva a cabo en celdas de flotación, de tipo tanque agitado, en el cual se introduce la suspensión acuosa obtenida en el pulper la cual contiene las fibras de celulosa y las partículas de tinta que se han desprendido de la fibra.

La [Figura 2](#) ilustra la introducción de burbujas de aire en la parte inferior de la celda, en general debajo del sistema de agitación, cuyo propósito es no solo de agitar la suspensión sino también dividir las burbujas de aire a dimensiones mínimas.

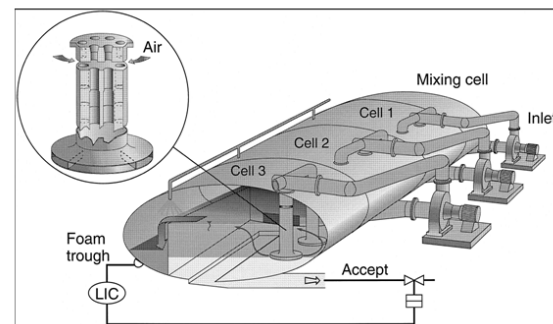


**Fig. 2.** Principio de una celda de flotación ([Rojas y Bullon, 2007](#)).

El ajuste físico – químico - mecánico es tal que las burbujas de aire se adhieren a las partículas de tinta pero no a las fibras, como consecuencia las partículas de tinta son arrastradas hacia arriba con las burbujas de aire. El sistema contiene un agente espumante que estabiliza la espuma y

permite formar una espuma rígida casi seca, la cual se descarga por un vertedero o cualquier sistema de arrastre que pueda implementarse. La suspensión de fibras se recoge por la parte inferior, lo cual corresponde a la pulpa destintada.

Actualmente en la industria de papel para el proceso de destintado por flotación se usan celdas de flotación como la EcoCell, la cual es una máquina de flotación con mezcladores estáticos. El cuerpo básico de la ECOCELL ([Kemper, 1999](#)) es un tubo horizontal con sección transversal elíptica. La cámara de suspensión y el canal de recogida de la espuma están separados por un vertedero. La suspensión se elimina uniformemente por la base de la celda y se bombea a través del elemento de aireación de la siguiente celda, como se observa en la [Figura 3](#). El diseño multi-etapa crea diferentes zonas de micro turbulencia las cuales generan una amplia gama de tamaños de burbuja de aire. Esto es esencial para la flotación de un amplio rango de tamaños de partículas contaminantes.



**Fig. 3.** EcoCell - máquina de flotación ([Kemper, 1999](#)).

### 2.2.5. Lavado

Éste se basa en la gran diferencia de tamaño existente entre las partículas de tinta y las fibras. El principio de la separación consiste en retener las fibras en tamices de dimensiones de malla adecuadas, que permiten el paso de las partículas de tinta y elementos finos, para esto se emplean detergentes que dispersan los constituyentes de la tinta en partículas muy finas suspendiéndolas en el líquido para que finalmente puedan ser arrastradas por él ([Vargas y Vélez, 2005](#)).

### 2.2.6. Dispersión

La dispersión consiste en la reducción de las manchas de tintas visibles en el papel o en hojas formadas por medio de esfuerzos de cizalla

mecánicos a alta temperatura hasta hacerlas imperceptibles para el ojo humano. Aunque este mecanismo no separa la tinta de la pulpa, logra eliminar y/o reducir la cantidad de manchas visibles, pero reduce el grado de blanco, lo cual puede no ser aceptable dependiendo de la calidad de producto requerido. Por lo que se recomienda agregar una etapa de flotación posterior para eliminar las partículas de tinta resultantes con el tamaño conveniente para la separación. Como otra alternativa, es posible contrarrestar la disminución en el grado de blanco mediante un blanqueo final de la pulpa.

### 2.2.7. *Blanqueo*

El blanqueo se lleva a cabo en torres operadas a co-corriente ó a contracorriente, con variedades de reactivos mezclados con la pulpa antes del ingreso de la pulpa a la torre ([Alvarez, 2001](#)). Dependiendo de la calidad del producto final deseado, como en el caso de papeles supercalandrados, papel de oficina o higiénicos, se suele completar la producción de pasta de papel recuperado mediante una o varias fases de blanqueo. El blanqueo se lleva a cabo generalmente en tanques con un tiempo de residencia relativamente elevado en los cuales se añade un reactivo de blanqueo ó una variedad de reactivos mezclados que favorecen la eliminación de la tinta residual, esto se hace antes del ingreso de la pulpa a la torre. Los tratamientos de blanqueo pueden ser oxidativos o reductivos. Entre los productos oxidantes el más común es el peróxido de hidrógeno que se complementa con hidróxido sódico, silicato de sodio y algunos agentes quelantes. También pueden ser usados el oxígeno y el ozono. Entre los productos reductores el más utilizado es el hidrosulfito sódico. La blancura finalmente obtenida depende tanto de la original de los papeles empleados como del proceso de preparación de la pasta utilizado y de las fases de blanqueo, llegándose a blancuras de hasta 84° ISO ([Vilaseca, 2000](#)).

## 3. DESTINTADO ALCALINO

### 3.1. *Introducción*

Este tradicional tipo de destintado permite la eliminación de tintas. En condiciones alcalinas (pH del medio próximo a 11), se favorece la desintegración del papel y los posibles

contaminantes como agentes de encolado y ligantes, mientras que los pigmentos de la tinta y componentes del vehículo se dispersan y se saponifican en algunos casos ([Hoyos y López, 2006](#)).

En la actualidad el proceso de destintado combina métodos con dos etapas de flotación, algunas industrias consideran conveniente utilizar dos etapas alcalinas o en algunos casos dos etapas neutras, pero los resultados más satisfactorios se presentan cuando se utilizan inicialmente una etapa de pulpeo y flotación en condiciones neutras y una segunda etapa de pulpeo (ayudado por el blanqueo del peróxido de hidrógeno) y flotación en condiciones alcalinas ([Vargas y Vélez, 2005](#)).

### 3.2. *Sustancias químicas empleadas en el destintado* ([Ferguson, 1992](#))

Las sustancias químicas se emplean para aumentar la hidrofobicidad, controlar la selectividad, disminuir los porcentajes de pérdida de fibra, aumentar la eficiencia de destintado y afectar la velocidad (cinética) de procesos de separación ([García, 2001](#)).

Las principales sustancias químicas utilizadas en el destintado son:

#### 3.2.1. *Hidróxido de sodio*

El hidróxido de sodio (sosa cáustica, NaOH), se emplea en el proceso de destintado para ajustar el pH a la región alcalina y saponificar o hidrolizar las resinas de la tinta. En medio alcalino se produce el hinchamiento de la fibra y modifica los compuestos ligantes de las tintas, lo cual ayuda a la liberación de la tinta de la superficie de las fibras, facilitando la penetración de las demás sustancias químicas. El pH empleado convencionalmente para el pulpeo es de 9,5 a 11,0, intervalo en el cual las fibras adquieren mayor flexibilidad.

El agua amoniacal (NH<sub>3</sub>) es una especie alcalina que puede sustituir a la sosa cáustica con la probabilidad de reducir el amarillamiento provocado por el álcali sin afectar las propiedades ópticas y físico - mecánicas del papel.

### 3.2.2. *Peróxido de hidrógeno*

El peróxido de hidrógeno, se utiliza como agente de blanqueo y es empleado para decolorar los grupos cromóforos generados por el alto pH presente en la etapa de desintegración.

### 3.2.3. *Agentes Quelantes*

La quelatación es la habilidad de un compuesto químico para formar una estructura en anillo con un ion metálico resultando en un compuesto con propiedades químicas diferentes a las del metal original. El quelante impide que el metal siga sus reacciones químicas normales.

### 3.2.4. *Silicato de sodio*

El silicato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) se emplea comúnmente en las fábricas de destintado como una solución de 41,6° Baumé de metasilicato de sodio. Éste se compone de una mezcla de muchos aniones de complejos poliméricos de silicato. Se cree que el silicato funciona formando una estructura coloidal con los iones metálicos pesados, pero la acción específica no se ha determinado. Por lo anterior se considera que opera como un estabilizador del peróxido, aunque realmente lo que estabiliza es el ambiente en el cual trabaja el peróxido. Algunos autores han reportado que el silicato opera como un dispersante para prevenir la redeposición de la tinta en la superficie de la fibra.

### 3.2.5. *Surfactantes*

Los surfactantes que se utilizan para el destintado tienen dos principales componentes: un componente hidrófilo (parte de la molécula que le gusta el agua) y un componente hidrófobo (parte de la molécula que odia el agua). Cuando un surfactante se adiciona dentro del pulper, ó justo antes del proceso de flotación, la parte hidrófoba se asocia con la tinta, aceite, y suciedad mientras la parte hidrófila se mantendrá en el agua ([Ferguson, 1992](#)).

En este tipo de destintado son importantes tres tipos de surfactantes ([Zhao et al., 2004](#)):

- Dispersantes: ayudan a separar las partículas de tinta de la superficie de las fibras y prevenir la redeposición de las partículas de tinta separadas en las fibras durante el destintado por flotación.

- Colector: su función es aglomerar pequeñas partículas de tinta que han sido liberadas de las fibras por la acción de la desintegración y cambiar la superficie de estas de hidrofílicas a hidrofóbicas.
- Espumante: su función es generar una capa de espuma estable en la superficie de la celda de flotación, para remover la tinta.

### 3.3. *Estudios realizados bajo el proceso de destintado convencional.*

#### 3.3.1 *Estudios sin modificación de sustancias químicas*

En México ([Turrado et al., 2007](#)), se estudió el mecanismo de acción que sucede entre la materia prima (unión tinta – fibra) y cada uno de los reactivos utilizados en el destintado por flotación de papel desperdicio, con el objetivo de entender con mayor precisión los fenómenos que ocurren, lo cual es de gran importancia para optimizar y mejorar las técnicas de este proceso.

El efecto de los productos químicos utilizados en el proceso contribuyen a crear un medio más apropiado para optimizar el proceso por flotación, ya que el pH alcalino aumenta la repulsión electrostática entre las fibras y las partículas, además del hinchamiento de las fibras para facilitar la remoción de los pigmentos de las tintas, por lo que son importante para hacer más eficiente el proceso por los fenómenos fisicoquímicos involucrados. El objetivo básico es mejorar las propiedades en el papel sin perder grandes cantidades de fibras.

El tiempo de reacción también es un factor clave para la optimización del destintado. Para un periodo de 30 minutos se logró obtener los mayores rendimientos y las mayores eficiencias del proceso, ya que se logró una mejor selectividad de las partículas de tintas, y con la menor pérdida de fibras con respecto a los demás intervalos de tiempo. Para este mismo periodo de tiempo se obtuvo la mejor blancura, lo que demuestra la importancia que tienen los fenómenos fisicoquímicos involucrados y las sustancias químicas adicionadas en el proceso eficaz de separación de las partículas de tintas.

El papel periódico obtuvo eficiencias similares en todos los tiempos, esto se debe a que requiere de mayores dosis de reactivos para activar los mecanismos fisicoquímicos para este tipo de pulpa y de impresión.

En España ([López, 2002](#)) se realizó estudios para el destintado de impresiones flexográficas en blanco y negro. El tipo de tinta utilizada en la flexografía es tradicionalmente base agua. Las finas partículas de tinta flexo no son eficientemente eliminadas, ya que a condiciones alcalinas se dispersan y establecen una suspensión muy estable. Es precisamente en las fábricas de papel que utilizan procesos de reciclado para el tratamiento de tintas hidrófobas, y por lo tanto tratamientos alcalinos, donde la presencia de tintas flexo en la materia prima supone el mayor problema.

Con el surfactante no iónico y la flotación a pH ácido y temperatura alrededor de 55°C, esta selectividad se ve incrementada muy significativamente, pudiendo llegar a blancura ISO de 70% con pérdidas por debajo del 10%. Además se observó que la blancura para uno y otro surfactante es muy parecida, sin embargo, la menor blancura inicial después de la desintegración, empleando el surfactante catiónico hacen que la blancura final, después del destintado, sea mayor para el no iónico.

Otros autores han optado por investigar los roles de algunas sustancias químicas empleadas en el proceso de destintado por flotación y su interacción con los papeles impresos con diferentes tintas. Por ejemplo, Pauck y Marsh ([2002](#)) investigaron sobre la capacidad de silicato de sodio para dispersar la tinta, tanto sólo y en la presencia de iones de calcio y jabones de ácidos grasos. Para esta investigación se empleó papel periódico de Mondi Marebank.

El silicato de sodio mostró ser un pobre dispersante de las partículas de tinta, sin embargo, pareció influir gradualmente en las propiedades de dispersión del jabón en la presencia de iones de calcio.

La naturaleza de las interacciones entre el silicato de sodio, iones de calcio y el jabón colector fueron estudiadas para poder aclarar el papel del silicato de sodio que compite con los jabones por los iones calcio por virtud del efecto de ión común.

### *3.3.2. Estudios con modificación de sustancias químicas*

En el destintado por flotación, el aire se burbujea a través de la mezcla de pulpa. Los iones calcio y los surfactantes promueven la formación de

espuma y la unión de las partículas de tinta a las burbujas de aire.

Acosta et al. ([2003](#)) proponen una investigación donde comparan las diferencias en destintado por flotación de papeles de oficina (sorted office papers) impresos con tintas base agua y tóner con el empleo tanto de dodecanoato de sodio como de octanoato de sodio como surfactantes, junto con calcio.

Para la tinta tóner con ambos surfactantes y en ausencia de iones de calcio, el conteo de puntos negros disminuyó a diferencia de cuando se empleó calcio sin surfactantes. Cuando se usó los surfactantes con calcio, la disminución del número de puntos negros fue incluso más pronunciada.

### *3.3.3 Estudios con modificación de equipos*

Zhu, Wu y Deng ([1998](#)) experimentan una novedosa aproximación en el destintado por flotación de papeles con impresión tóner usando un equipo de reparto de espumante, p. ej. un atomizador en spray, para controlar diferentes variables claves del proceso que afectan la remoción de tinta, la estabilidad de la espuma, la dinámica de fluido en la espuma, la contaminación de la fibra, pérdidas de fibra y agua, y el consumo de espumante. En el proceso convencional, en lugar de adicionar directamente el espumante dentro de la suspensión de pulpa antes de la flotación, se empleo un atomizador presurizado para rociar la solución de espumante en la parte de encima de la columna de flotación. Muchas ventajas pueden ser logradas usando este atomizador de espumante en spray. Por ejemplo, el spray entrega el espumante concentrado en la capa superior de la espuma y no en la suspensión de la pulpa para crear un fuerte gradiente de concentración en la región de la espuma y en la interfase de suspensión de la pulpa.

Los resultados obtenidos en una columna de flotación de laboratorio indicaron que el espumante en spray, puede reducir la pérdida de fibra en 50%, la pérdida de agua en 75%, y el consumo de espumante en 95% sin sacrificar la eficiencia del destintado.

## 4. DESTINTADO ENZIMATICO

### *4.1. Introducción*

Comparando el destintado enzimático con el destintado químico, encontramos que en el

destintado químico se usa hidróxido de sodio, el cual ayuda al hinchamiento de las fibras y por lo tanto al desprendimiento de las tintas, cuando éstas son poliméricas. Por el contrario si las tintas no son poliméricas, el hidróxido de sodio puede actuar directamente sobre la película de tinta. El destintado enzimático es el proceso que se efectúa utilizando enzimas, las cuales pueden atacar el papel o en algunos casos las partículas de tinta. Para el destintado enzimático, las más comunes son las celulasas, las cuales degradan la celulosa liberando las partículas de tinta que están aferradas al papel, y posteriormente puedan ser removidas, dando como resultado un papel con cantidades menores de tinta. Estas enzimas pueden ser ayudadas en algunos casos por los surfactantes.

En el destintado enzimático es importante mantener los tamaños de partícula de tinta en un intervalo específico para que la separación sea viable. Es bueno anotar que la eficiencia del proceso depende del tipo de tinta a destintar, ya que según Pala et al. (2004), cada proceso tiene sus pro y sus contra, por ejemplo, el proceso de destintado químico es tan eficiente como el destintado enzimático en MOW (**mixed office waste**) con la enzima Celluclast 1.5 L y la celulasa IOGEN, en cambio en el papel de fotocopia las enzimas actúan disminuyendo la resistencia del papel y favoreciendo el drenaje, mientras que el destintado químico es más efectivo para este tipo de impresión debido a la fortaleza con la que se adhieren las tintas poliméricas.

#### 4.2. Principales enzimas industriales y usos típicos ([Hoyos y López, 2006](#); [Bajpai, 1998](#)).

Las enzimas más empleadas en el destintado incluyen a las lipasas, esterasas, pectinasas, hemicelulasas, celulasas y enzimas lignolíticas. La mayoría de la literatura publicada sobre destintado se ha desarrollado con celulasas y hemicelulasas.

Los ataques enzimáticos son de dos tipos uno a la tinta, y otro a la superficie de la fibra. Las lipasas y las esterasas pueden degradar las tintas basadas en aceites vegetales. Las pectinasas, hemicelulasas, celulasas y enzimas lignolíticas alteran la superficie de la fibra.

Las amilasas son muy eficientes para limpieza de estanques de almidón cocido, sistemas de encolado de almidón que incluyen cuchillas encoladoras, sistemas de adhesivo para corrugado y prensas de encolado, como también en la conversión de perlas de almidones para encolado en masa o prensa encoladora. Este tipo de aplicación continúa ganando aceptación y es muy popular en fábricas que buscan evitar el uso de sosa cáustica para la limpieza de equipos.

Se ha demostrado que las celulasas mejoran el destintado de fibras secundarias. Ellas son utilizadas en conjunto con ayudantes de flotación para reducir considerablemente los conteos de puntos en pulpas destintadas del mercado, procesadas a partir de mezclas de papel blanco (MOW, **mixed office waste**).

Las lipasas pueden emplearse en control de pitch en pulpas kraft, sulfito y termomecánicas mediante el rompimiento de pitch y resinas de madera hacia triglicéridos simples.

Las proteasas son útiles en la prevención de la acumulación rápida de biofilms en sus dispersiones.

Las lipasas alcalinas son necesarias para facilitar la remoción de tintas base aceite.

Las xilanasas son enzimas que producen la liberación de xilanos, los cuales actúan como barrera física a la penetración de agentes de blanqueo, ya que estos se encuentran en la superficie de la pulpa.

Welt y Dinus (1995) aseguran que se manejan nueve mecanismos para el destintado enzimático, sin embargo, la importancia relativa de cada mecanismo podría ser dependiente del sustrato de la fibra, de la composición de la tinta y de la mezcla de la enzima.

#### 4.3. Estudios realizados bajo el proceso de destintado enzimático.

El objetivo básico del destintado enzimático es contrarrestar el uso intensivo de sustancias químicas en el proceso convencional, especialmente porque disminuye el impacto ambiental, además los resultados obtenidos con enzimas son similares que los logrados con las

sustancias químicas, aunque estos resultados dependen del tipo de enzima empleada. Pala et al. demostró que una buena combinación de enzimas comerciales como Celluclast, Buzyme, entre otras son eficientes para la extracción de pigmentos ya que se han referido a la primera como agente efectivo de destintado y la segunda como agente eficiente en procesos preliminares (Pala et al., 2004; Pala et al., 2006); otros autores como Zhang et al. (2008), además de la celulasa, emplea sustancias químicas como sulfitos para mejorar el rendimiento del proceso.

El empleo de enzimas es una alternativa para el destintado clásico de papel reciclado, y la transformación de éste en productos de calidad. En la mayoría de los trabajos realizados bajo el proceso de destintado enzimático, las enzimas son empleadas en procesos preliminares a la etapa de flotación, es decir, un pretratamiento con enzimas que se le hace a las fibras que se van a destintar. El pretratamiento enzimático que presenta Spiridon y Machado (2005) se hace bajo la influencia de tres enzimas: celulasa, lipasa y una mezcla de celulasa y xilanasa, sobre las propiedades del papel periódico viejo (ONP), con siete meses de envejecimiento, este pretratamiento se hace antes de la convencional técnica del destintado por flotación.

El tratamiento enzimático afectó las propiedades mecánicas de la hoja de papel. Así, índices de tracción y explosión se mantuvieron constantes para las pulpas tratadas con la preparación que contiene una mezcla de xilanasa y celulasa y también para aquellas tratadas con lipasa. Índice de rasgado mostró disminución sistemática para todos los tratamientos usados. Las propiedades ópticas: blancura, opacidad y ERIC (contenido residual efectivo de tinta) mejoraron en todos los casos. Las mejores propiedades se obtuvieron cuando en el tratamiento se empleó lipasa y mezcla de celulasa – xilanasa.

Se ha demostrado que el destintado enzimático reduce costos, mejora la eliminación de pigmentos y stickies (adhesivos que se encuentran en el papel desperdicio) y reduce la DQO y DBO en los efluentes de aguas residuales del proceso (Viesturs, 1999). Una de las desventajas del empleo de enzimas es que se debe escoger un surfactante apropiado para evitar la redeposición de micropartículas de tinta en las fibras (Pala, 2006).

Pala et al. (2004) hacen una comparación entre el destintado enzimático con diferentes tipos de enzima y el destintado químico para MOW (mixed office waste), papel fotocopia y MIX (Mezcla de láser, ink jet y papel fotocopia), ellos utilizan 11 diferentes tipos de enzima entre las cuales están: Viscozyme L, Celluclast 1.5 L, celulasa IOGEN, Buzyme 2523, entre otros.

La separación tinta fibra se realizó de tres formas diferentes: lavado, flotación y otro donde se realizan los dos en serie. Para las partículas de tinta desprendidas del papel MOW fueron separadas de la fibra por medio de lavado, mientras que en el papel MIX la tinta fue separada por medio de flotación.

Los resultados obtenidos dicen que para el papel MOW los dos métodos de destintado funcionan muy bien, pero para impresiones tipo fotocopia y MIX el destintado enzimático no fue tan eficiente mientras que el destintado químico permitió un buen desprendimiento de la tinta. Los mejores resultados obtenidos en el destintado enzimático se lograron con Celluclast 1.5L y la celulasa IOGEN, con las cuales se obtuvo un buen desprendimiento de tinta y un aumento en la resistencia del papel. El mejor desprendimiento de tinta se obtuvo con la mezcla enzimática AXC, pero ésta causó una disminución considerable de la resistencia del papel.

En la industria papelera se han desarrollado nuevas formulaciones denominadas biodispersantes enzimáticos (Dorronsorro, 1998). Éstos son productos biodispersantes estabilizados que incorporan enzimas en un sistema acuoso. Estos productos han sido diseñados como dispersantes de biofilms para circuitos de pasta y papel y ayudan a disminuir la rápida tendencia a la formación de depósitos de biológicos y mixtos, mediante el mantenimiento en suspensión de los componentes de estos depósitos.

Los biodispersantes enzimáticos son formulaciones patentadas cuyos ingredientes activos son enzimas estabilizadas y permiten el control de depósitos mediante tratamiento enzimático. Las enzimas son altamente específicas y solo transformarán sustratos determinados de productos específicos. Esto permite seleccionar los resultados de reacción con una gran exactitud, por lo tanto, las enzimas pueden actuar eficazmente dentro de mezclas muy complejas, y por su alta especificidad, solamente afectaran al sustrato elegido y no a los demás componentes de la mezcla.



Heise et al. (1996) reportan el resultado de tres pruebas a escala industrial para evaluar el destintado enzimático de impresiones de tóner de no impacto. Un incremento de la remoción de tinta fue realizado usando un nivel bajo de una enzima comercial en combinación con un surfactante. Los valores de blancura de la pulpa con destintado enzimático fue dos puntos más alto que el de la pulpa control. No hubo diferencias significativas en la calidad y tratabilidad del agua de proceso, aunque los efluentes de esas pruebas tienen más baja demanda de oxígeno y toxicidad que los efluentes de la pulpa control.

Un novedoso proceso que une la tecnología de la separación con un tratamiento con celulasa ha sido descrito por Woodward et al. Ellos reportan que las partículas de tinta desalojadas de papel periódico, presumiblemente por la actividad de la celulasa, se vuelven a adherir a las pequeñas fibras originalmente presentes ó a las creadas por la acción enzimática. Las fibras pequeñas y la tinta adherida, luego fueron separadas de las largas fibras destintadas, éstas últimas son usadas dentro de los tratamientos posteriores. Cuando la tinta se adhiere a las fibras pequeñas, el lavado convencional o la flotación podría ser innecesaria, y la tinta no sería removida de los efluentes. La razón para esta fuerte asociación entre la tinta y las pequeñas fibras no ha podido ser identificada. La separación de algunas fibras es técnicamente factible (Hoyos y López, 2006).

En el 2006 (Hoyos y López, 2006), se publicó una investigación, en la cual se realizaron pruebas de laboratorio para el destintado enzimático de papel impreso por el método offset utilizando celulasa, alfa-amilasa, y una mezcla de las dos (con una composición del 50% en celulasa). Los resultados obtenidos para las enzimas por separado fueron interesantes, pues para la celulasa se lograron aumentos en la blancura ISO del 8,53%, es decir, pasar de una blancura ISO en la muestra original de 55,56% a una blancura ISO de 64,09%. Con la alfa-amilasa se lograron incrementos en la blancura de 7,87%, o sea que se pasó de 55,56% a un valor de 63,43%.

Al combinar ambas enzimas se evidenció que las condiciones de trabajo eran muy distantes la una de la otra, por ejemplo, la temperatura para la celulasa era 50 °C mientras que para la alfa-amilasa fue 65°C, el pH de la celulasa era 5,5 mientras que el de la alfa-amilasa fue de 6,85. De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede

concluir que la mezcla de ambas enzimas es compleja, pero para realizarlo, se debe tener en cuenta que los rangos de pH y temperatura sean coincidentes con el fin de evitar posibles inhibiciones por estas dos variables.

Jobbins y Franks (1997) hicieron un trabajo para la optimización de las condiciones del destintado enzimático de MOW utilizando un surfactante y una enzima (no especificada). La dosis de enzima se fijó en 0,037 %, la concentración de surfactante en el intervalo de 0,04-0,2%, la consistencia se fija en 16 % obteniendo altos rendimientos en la remoción de tinta, el pH se ajusta a 7,5; la temperatura se fija en el rango entre 45-55°C y por último, el tiempo de residencia en el pulpeo varió entre 30-45 minutos, sin olvidar que el mínimo tiempo de desfibrado es de 30 minutos.

El MOW es una materia prima muy difícil de destintar. Una gran proporción de este tipo de papel es impreso utilizando fotocopiadoras o impresoras láser que funden el tóner sobre las fibras, haciendo difícil la eliminación posterior de éste. Es por esto que López et al. (2000) proponen realizar un pretratamiento enzimático. En este estudio se utilizaron amilasas con el objetivo de degradar y eliminar el almidón presente en el papel. Con esto se pretendía reducir la cohesividad de la hoja y de esta manera facilitar su desintegración.

En este estudio se observó cómo todas las muestras tratadas con amilasas contenían, después de la desintegración, un porcentaje menor de aglomerados que aquéllas no tratadas. Un tratamiento previo con amilasas facilita la desintegración, con lo que permite obtener unas pastas en mejores condiciones para ser destintadas.

Después de este trabajo se pudo afirmar que las amilasas pueden tener un efecto significativo sobre la estructura del papel. Este efecto se traduciría en una mayor facilidad en la desintegración posterior de este papel.

El tratamiento previo del papel de archivo MOW (**mixed office waste**) con amilasas provoca un debilitamiento de la estructura superficial del papel, y por tanto una disminución de la resistencia del papel a la penetración de fluidos.

Este tratamiento enzimático puede ser utilizado en la etapa anterior a una desintegración previa al destintado. De esta manera se facilitaría la desintegración del papel, y se obtendría una pasta en unas mejores condiciones para ser destintada.

Dovale (2009) presenta un trabajo basado en el destintado enzimático de papel MOW (Mixed Office Waste) empleando celulasa, el cual realizó en dos etapas. En una primera etapa realizó un pretratamiento enzimático a la pulpa a destintado y posterior a esto en una segunda etapa, realizó el destintado en la celda de flotación.

Las condiciones de destintado óptimas para obtener mayor blancura y menor cantidad de puntos negros fueron: dosis de enzima de 0,15%, tiempo de acción enzimático de 20min, consistencia de flotación de 0,5%, valores de pH de 5 y temperatura de 50°C.

Con estas condiciones óptimas, el 70% de los ensayos alcanzó blancura ISO por encima del 70% con un máximo de 80%. Para estos niveles de blancura, se usó quelante al 1% y con una dosis de surfactante de 400mg/L.

## 5. DESTINTADO NEUTRO

### 5.1. Introducción

El destintado neutro se refiere a aquellos procesos de destintado que se realizan en un ambiente químico que ofrece un pH cercano a 7.0.

El destintado neutro además tiene un proceso equivalente al destintado tradicional, sus principales variaciones se pueden apreciar en los tipos de reactivos utilizados y en las condiciones de operación. Una de las variaciones apreciables en los reactivos, aunque no siempre se usa, es la incorporación de sulfito de sodio, este a menudo reduce o reemplaza el hidróxido de sodio, peróxido de hidrógeno y silicato en el pulper (Rosencranse, 2007), otra modificación en el proceso de destintado en medio neutro es el empleo de Nonil Fenol POE, un tipo de surfactante no iónico etoxilado con un pH de 5,6, posee un porcentaje de humedad aproximado al 0,04 %. Además de actuar como surfactante, también lo hace como estabilizante, ya que se adsorbe sobre la superficie hidrófoba de las partículas de tinta y de las fibras dando lugar a una repulsión partícula-fibra (García, 2001). Es apropiado para el destintado neutro utilizar una concentración de 200 mg/L, ya que en concentraciones superiores a 500 mg/L pueden disminuir la eficiencia de la flotación, pues el surfactante a altas dosis ocasiona repulsión entre las partículas de tinta y las burbujas, al mismo tiempo incrementa la elasticidad de la fina película de líquido haciéndola menos propensa a

romperse, así mismo, disminuye la tensión superficial del líquido y el ángulo de contacto superficie de partícula – aire – líquido, aumentando la posibilidad de que se rompan los agregados formados (Vargas y Vélez, 2005).

Jobbins y Heise (1996) realizaron un estudio de destintado a condiciones de pH neutro en un proceso de lazo cerrado a escala piloto en Voith Sulzer Papertechnology, Estados Unidos, empleando nuevas formulaciones de surfactantes, quienes demostraron que se puede realizar la remoción de pigmentos en condiciones neutras con beneficios tales como mejoras en la blancura de la fibra obtenida, reducción de costos en productos químicos (hidróxido de sodio, silicato de sodio, peróxido de hidrógeno y polímeros), reducción de DQO, entre otros, pero se enfatiza en la reducción ceniza, lo cual significa la tolerancia incrementada en el proceso de destintado de papel recubierto (o estucado). Se destacan las siguientes condiciones en el proceso de desintegración: Temperatura de 55°C, consistencia de 16% y concentración de surfactante de 0,125%. Las pruebas experimentales se realizaron tanto en medio neutro como en alcalino.

### 5.2. Destintado neutro vs. Destintado próximo al neutro

Generalmente se tiene una confusión de términos entre el destintado neutro y el destintado cerca al neutro ó álcali reducido, estas son algunas diferencias:

Valores de pH

- Destintado neutro, pH 7,0 en el pulper.
- Destintado cerca al neutro ó álcali reducido, pH 8,0 – 8,2 en el pulper.

Opciones de destintado

- Destintado neutro, no requiere silicato.
- Destintado cerca al neutro ó álcali reducido, requiere silicato y Requiere ó no sulfito de sodio

### 5.3. Estudios realizados bajo el proceso de destintado neutro

Lakshmana et al. (Lakshmana et al., 2008) estudia el destintado de ONP (old newspaper), las propiedades ópticas y las propiedades físicas de resistencia de la pulpa destintada, usando un ayudante de destintado, Casurf-108, derivado

sulfonatado biodegradable (obtenidos de la cascara de la nuez de la india).

El Casurf-108 funciona como dispersante (realiza la función de un dispersante y un colector en un solo compuesto ó formulación) y se ha observado que el Casurf-108 funciona efectivamente en la remoción de tinta y separación de partículas de tinta de las superficies de las fibras.

Después de este estudio, se pudo concluir que el destintado neutro minimiza el consumo de sustancias químicas y se obtiene una carga contaminante más baja. El silicato de sodio evita la descomposición del peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) en estado iónico y también actúa como agente de antiredeposición de la tinta en la fibra. El surfactante biodegradable Casurf-108 juega un papel significativo como ayudante en el destintado neutro. Las propiedades ópticas y la resistencia de la pulpa destintada permiten que ésta sea mezclada con pulpa mecánica virgen.

En Marzo de 2004, Katahdin Paper Company implementó un proceso de destintado en medio neutro para la producción de pulpa a partir de papel periódico viejo (ONP, **old news paper**) y de revistas viejas (OMG, **old magazines**). Después de año y medio de operaciones han logrado reducir considerablemente los costos de pulpeo y de blanqueamiento, eliminando el uso de varias sustancias químicas, manteniendo la calidad de pulpa y de producción. El cambio al verdadero destintado neutro ha mejorado la estabilidad del proceso comparada con el proceso alcalino antes usado ([Morrow et al., 2005](#)).

Rosencranse ([2007](#)), quien también realizó los estudios con Katahdin Paper Company, indica lo concerniente a la evaluación de un proceso de destintado en medio neutro y libre de sulfito para papel reciclado. Las pruebas se realizaron en tres escenarios diferentes: una planta de producción de papel y dos plantas piloto.

Pocos procesos de destintado en medio neutro han sido patentados. Frankz y Page ([2004](#)) patentaron sobre un proceso de destintado en el cual se emplea lipasa y éster de ácido graso. Acá se propone un método de destintado ligeramente ácido (próximo a pH de 4,0) a ligeramente alcalino (próximo a pH de 8,5) el cuál es seguro, económico y ambientalmente deseable.

El trabajo doctoral de Sarquella ([2005](#)) indica pruebas de desintegración en medio neutro con pH cercano a 7,0 en el cual no agrega sustancias químicas (Fase A), estas pruebas son comparadas

contra otras que se llevan a cabo en medio alcalino, en el cual emplea hidróxido de sodio y peróxido de hidrógeno, sin adición de surfactante en unos casos (Fase B) y con adición del mismo (Fase C). En la Fase A se pretende evaluar la influencia de las variables físicas, tales como velocidad de rotación, consistencia y tiempo de desintegración y en la fases B y C evaluar aspectos físicos y químicos. De estas pruebas se destaca que la presencia de hidróxido de sodio juega un papel fundamental en el desprendimiento de la tinta, además, la comparación entre las fases B y C indicó que a mayores tiempos de contacto entre la suspensión de fibras y el surfactante mejor es la eficacia del proceso de flotación.

Theander y Pugh ([2004](#)), han propuesto un mecanismo primario de flotación empleando ácidos grasos entre lo cual se destaca: precipitación del jabón de calcio, micro-encapsulamiento de la tinta a través del mecanismo de hetero-coagulación y captura burbuja/partícula de la tinta. También estos autores indican que el punto de nube y el HLB son parámetros importantes cuando se emplean surfactantes no-iónicos, pues estos surfactantes influyen la blancura y la eficiencia de lavado y de la flotación.

#### *5.4. Estudios de destintado con combinación de etapas neutras y alcalinas*

Galland et al. ([1997](#)), en la primera parte del estudio de las ventajas de combinar el destintado neutro y alcalino, propone un proceso de destintado en dos etapas, una primera etapa en condiciones neutras y una segunda etapa en condiciones alcalinas. Después de desarrollado, se puede concluir que este proceso es eficiente para destintar todos los grados de papel desperdicio, ya que la blancura obtenida con este proceso siempre fue mayor.

Vargas y Vélez ([2005](#)) realizan un estudio para destintar papel desperdicio que contenga mezclas de tintas flexográficas y tintas convencionales (offset), en una proporción 50/50, por medio de la combinación de etapas neutras y alcalinas. El proceso consta de una etapa de pulpeo y flotación en condiciones neutras, seguido de una etapa similar en condiciones alcalinas. De esta manera, las tintas flexográficas serán removidas en la primera etapa y las convencionales en la segunda.

Para el proceso de destintado tanto neutro como alcalino es necesario utilizar concentraciones medias de surfactante (aproximadamente 200mg/L) pues la pérdida de fibra se relaciona directamente con la cantidad utilizada de éste, ya que a elevadas concentraciones hay una mayor producción de espuma, la cual arrastra más fibras en la flotación. Así mismo es necesario utilizar concentraciones medias de colector (aproximadamente 200 mg/L) para garantizar la aglomeración de las partículas de tinta que serán removidas eficientemente en la flotación favoreciendo la blancura de la pulpa. El surfactante usado en este proceso fue nonil fenol etoxilado (surfactante no iónico).

### 5.5. Estudios de destintado con combinación de etapas neutras y enzimáticas

Elegir, realiza dos trabajos en los cuales combina etapas neutras y enzimáticas:

Un primer artículo ([Elegir et al., 2000](#)) indica un destintado neutro complementado con enzimas, nace de la necesidad de remover las tintas láser y xerográficas de los papeles de oficina, los cuales forman parte de la pulpa reciclada que cada vez requiere procesos más eficientes de destintado. El objetivo de este trabajo fue evaluar la eficiencia de una mezcla de enzimas celulasa y amilasa en un proceso de destintado neutro, para lo cual se encontró 21% mayor eficiencia (remoción de tinta) respecto un destintado neutro sin adición de enzimas.

Elegir y Bussini ([2008](#)) en un segundo artículo indican un proceso de destintado enzimático en medio neutro. La materia prima fue papel periódico con impresión flexográfica y offset. Lo anterior se comparó con el proceso de destintado convencional. Los resultados indican que la contaminación en el papel desperdicio se redujo significativamente con el proceso enzimático y que además, la DQO se redujo entre 20 y 50%, dependiendo del tipo de impresión del papel desperdicio. Las propiedades mecánicas de la pulpa con el proceso enzimático no cambiaron o mejoraron ligeramente.

Bobu et al. ([2008](#)) estudian el comportamiento de la mezcla de impresiones bajo las condiciones del destintado neutro y del destintado alcalino, establecidas con pruebas experimentales para cada impresión individual.

Los papeles y tipos de impresiones usados en este trabajo fueron: papel de copia Xerox, LWC (**light weight coated**), SBS (**solid bleached bristol**), papel periódico, 80% fibras recicladas con impresión offset.

Un importante efecto de los tratamientos de destintado neutro con amilasa y celulasa es la reducción de la pérdida de flotación para todos los tipos de impresiones. Este efecto, puede ser resultado de la sinergia entre ambas enzimas, la celulasa facilitando el desprendimiento de la tinta y la amilasa hidroliza el almidón de las fibras internas favoreciendo la separación durante el pulpeo.

## 6. OTRAS ALTERNATIVAS EN EL PROCESO DE DESTINTADO

### 6.1. Destintado por Ultrasonido ([Ramírez et al., 2004](#))

Una alternativa para reducir el tamaño de las partículas de tinta tóner es usar microondas por ultrasonido con frecuencias más altas que 20kHz, las cuales en medio líquido pueden ser generadas por transductores piezoeléctricos, transductores magnéticos y generadores mecánicos. Estos sistemas ya han sido usados por algunos autores, p. ej. Turai y Teng emplearon un generador mecánico de ultrasonido para producir frecuencias de 16 – 22 kHz. Ellos encontraron que después del tratamiento, las partículas residuales de tinta tenían un tamaño cercano a 0,01mm, comparados con tamaños de 1,0mm para los sistemas convencionales sin tratamientos por ultrasonido. Además, la eficiencia obtenida con el destintado convencional es mucho más baja que la de los sistemas por ultrasonido.

En otro trabajo del mismo autor se ensayó el destintado por ultrasonido de papel reciclado usando frecuencias de 16 – 24 kHz y un flujo de la suspensión de 5,7 L/min. Ellos encontraron las mejores condiciones de trabajo para obtener la mayor blancura en fibras secundarias donde la consistencia es del 4%, el tiempo de tratamiento es de 2,5 min y el intervalo de temperatura entre 65 – 70°C.

Norman, estudió destintado por ultrasonido de papel de oficina, empleando frecuencias de 22, 34 y 54 kHz, consistencias de 0,5; 1,0; 1,5 y 2,0 % de consistencia y tiempos de tratamiento de 1 – 15 min. Después de los análisis de la distribución de tamaños de partículas de tinta, se mostró que a

bajas frecuencias (22 kHz) se reducía el tamaño de las partículas de tinta mayores de 400  $\mu\text{m}$ , las cuales después del tratamiento con altas frecuencias (57 kHz) son reducidas en partículas aun más pequeñas de 260  $\mu\text{m}$ , haciendo más fácil separar las partículas de tinta por flotación y por lavado.

El objetivo del trabajo realizado por Ramírez et al. (2004), fue reducir las partículas de tinta tóner en tamaños menores a 100  $\mu\text{m}$  por tratamiento con ultrasonido y luego removerlas por flotación y lavado.

Dentro de los parámetros probados, las mejores condiciones fueron 0,5% de consistencia, alta modulación en las ondas de ultrasonido, temperatura de la suspensión de 55°C, pH con un valor de 5, y 20 minutos de tiempo de tratamiento con ultrasonido. El tratamiento generó un incremento del 91% en el intervalo de tamaños de partícula de 1 – 50  $\mu\text{m}$  y del 27 % para el intervalo de 50 – 100  $\mu\text{m}$ , lo que facilitó la separación eficiente de las partículas por flotación y por lavado.

### 6.2. Destintado asistido por steam-explosion (Marchessault et al., 1997)

El proceso con steam-explosion (también llamado hidrólisis “flash”) implica un rápido calentamiento del sustrato bajo condiciones específicas de presión, vapor y tiempo. El material se descarga rápidamente en una cámara de expansión a presión atmosférica.

En el caso de los tratamientos de las impresiones láser, la acidez del vapor, contribuye a la hidrólisis de las cadenas de celulosas (efecto químico); las altas temperaturas provocan un debilitamiento de las partículas de tinta tóner y fomentan su aglomeración (efecto térmico); el vapor causa el hinchamiento de las fibras y la despresurización instantánea induce a la desfibración del papel (efecto mecánico).

Otros estudios del destintado de impresiones láser-xerográficas usando técnicas de steam-explosion, también emplean la susceptibilidad magnética del tóner para la separación de las partículas individuales de tinta de la mezcla de fibra.

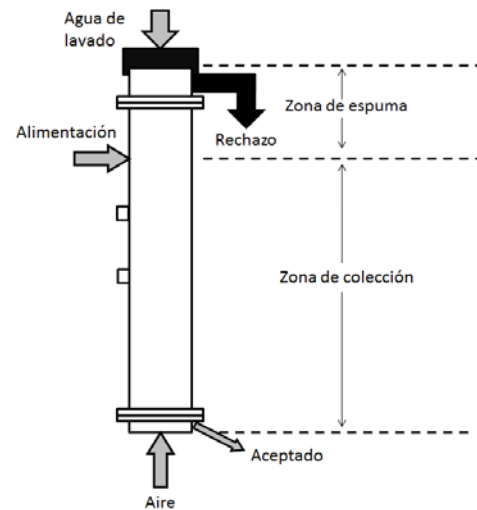
Marchessault y otros experimentan el proceso de hidrólisis “flash”. El tóner se basó sobre un copolímero de estireno – acrilato, su  $T_g$  fue 65°C y este contenía un 33% de óxido de hierro. El tóner fue separado de las fibras por sumergir un

imán de álnico en forma de U en 1,5 L de una suspensión de 2 g/L de pulpa hidrolizada.

Comparando la técnica de steam-explosion con el destintado convencional se observa que este método es eficiente en el destintado de papeles con impresión láser (con remoción magnético del tóner). Los rendimientos de la fibra final estuvieron entre 60 y 85%. El repulpeo por steam explosion conduce a mayores pérdidas en las propiedades físicas de la fibra, especialmente propiedades mecánicas.

### 6.3. Destintado en columnas de flotación (Ben et al., 2006)

Las columnas de flotación difieren de las celdas convencionales por su mayor altura a las relaciones de diámetros, carencia de agitación mecánica y la presencia de corrientes de agua bajando para lavar una espuma de altura. La columna de flotación se muestra en la Figura 4 y está patentada en Canadá hace más de 40 años por Boutin and Tremblay para la separación y la recuperación de minerales.



**Fig. 4.** Diagrama esquemático de una columna de flotación para aplicaciones de papel reciclado (Ben et al., 2006).

Como se muestra en la figura, el principio de la celda de flotación es muy sencillo. La mezcla es alimentada desde  $\frac{1}{4}$  a  $\frac{1}{3}$  desde la parte superior de la columna y desciende a contracorriente de las burbujas de aire que van en ascenso, las cuales son generadas en la base de la columna por sistemas de burbujeo interno o externo. Se acostumbra separar la columna en dos zonas: zona de colección y zona de espuma. En la zona

de colección las partículas hidrófobas son colectadas por burbujas de aire y transferidas a la zona de espuma. La espuma fluye desde la parte superior mientras que la pulpa aceptada es removida desde la base de la columna. El agua de lavado se adiciona a la espuma en la parte superior de la columna de flotación para estabilizar la espuma e incrementar la selectividad de contaminantes reduciendo el arrastre.

Para papeles ONP (**old news paper**)/OMG (**old magazine**) y MOW (**mixed office waste**) con ensayos a escala piloto e industrial mostraron que la columna de flotación da similares valores de blancura y eficiencias de remoción comparadas con la hiperflotación, la cual es, por definición, la mejor flotación posible bajo condiciones de laboratorio.

Ben et al. (2006) realizaron ensayos comparativos empleando una celda Leeds y columna de flotación. Para lo cual encontraron que la columna de flotación fue eficiente para remoción de contaminante y se redujo significativamente la pérdida de fibra. Este trabajo demostró que la columna de flotación puede ser usada en procesos de pulpa reciclada y otras corrientes de pulpa contaminada. Debido a su alta selectividad, espacio mínimo requerido, adaptabilidad a control automático y bajo capital requerido, costos de operación y mantenimiento, esta tecnología probablemente se esparcirá ampliamente para aplicación en la industria de pulpa y papel y reemplazará en muchas industrias, las celdas convencionales de flotación.

#### 6.4. Destintado por radicales libres ([Qian y Goodell, 2005](#))

La investigación sobre la aplicación de los radicales libres en los procesos de pulpa y papel apenas comienzan, y la mayoría de los estudios se han centrado en el blanqueo de la celulosa y tratamiento de aguas residuales. Sólo algunos trabajos se han hecho en el campo del reciclaje de papel. Algunos estudios ([Xu y Goodell, 2001](#); [Lind y Merényi, 1997](#)) mostraron que los radicales de hidroxilo tienen una capacidad similar a algunas enzimas hidrolíticas para la degradación de la celulosa, componente químico dominante de las fibras de madera.

Lind y Merényi (1997) estudiaron la pérdida de viscosidad de la celulosa inducida por los radicales de hidroxilo durante la irradiación de pulpa. La pérdida de viscosidad final se atribuyó principalmente a los radicales generados dentro de la fibra. Se tiene la hipótesis, de que para

controlar las condiciones de una reacción de radical libre, se puede limitar potencialmente las reacciones de radicales libres a la zona exterior de la fibra donde se encuentran los finos ó microfibrillas, por lo que el efecto del destintado esperado se puede lograr afectando en un mínimo las propiedades físicas de la fibra. Por lo tanto, en el trabajo que presentan Qian y Goodell (2005) exploran cómo un quelante mediante el sistema de radicales libres en un sistema de control puede ser empleado en los procesos de destintado como una mejora potencial para proporcionar ahorros de costes sobre los procesos de destintado convencional y enzimático.

Para este trabajo se empleo papeles con impresión laser, y se llevaron a cabo 3 procesos de repulpeo: C-1, T-1 y T-2. El proceso C-1 es un proceso convencional de destintado que se llevó a cabo bajo condiciones cáusticas. T-1, involucró la aplicación de agentes químicos Fenton en lugar de químicos cáusticos convencionales durante el repulpeo. T-2, proceso de repulpeo de dos pasos, fue estudiado para evitar los siguientes problemas presentados en el repulpeo convencional tales como, hinchamiento de las fibras de celulosa y adherencia de las tintas que no promueven un óptimo sistema de radicales libres.

El análisis de imagen indica que ambos tratamientos con radicales libres (T-1 y T-2) dieron mayores eficiencias de remoción de tóner en comparación con el tratamiento de repulpeo convencional (C-1).

Entre los dos tratamientos de radicales libres, la combinación del repulpeo alcalino-radicales libres muestra mayor eficiencia.

#### 6.5. Destintado magnético de papel desperdicio

Marwah et al. (1996) patenta un proceso para mejorar el destintado de papel desperdicio que contiene impresión láser, electrostática y otros tóner de impresión sin impacto (tintas para producir alta calidad, altos valores de blancura, poco o ningún contenido de la suciedad) con poco ó nada de pérdidas de fibras. El proceso consiste en la adherencia de partículas de tinta en la pulpa de papel de desecho a un material magnético con la ayuda de un agente de aglomeración, seguido de la eliminación de las partículas de tinta por separación magnética. El tratamiento magnético se lleva a cabo a temperatura ambiente o superior, a pH neutro o alcalino y a baja consistencia de pulpa. La aglomeración y la adición magnetita, seguido por la exposición del papel de desecho a

un campo magnético, proporciona la remoción completa de tinta sobre la exposición al campo magnético sin pretratamientos. Además, el proceso puede ser empleado como un paso adicional en un proceso convencional para remover de los papeles impresos las tintas de reprografía, tales como la eliminación de la tinta mediante cribado, flotación, limpieza centrífuga, lavado y sedimentación, con o sin decantación.

## CONCLUSIONES

La gran variedad de tipos de papel y de métodos de impresión hacen que el proceso de destintado exija de diferentes alternativas para llevar a cabo el proceso con mayor eficiencia. Este trabajo muestra un panorama de los diferentes tipos de destintado como también de nuevas alternativas que hacen posible la remoción de los pigmentos de las tintas. Se destaca la importancia que han ganado los procesos de destintado en medio neutro y enzimático para el destintado de impresiones tóner y de papel periódico recuperado. Se observa que las nuevas alternativas de destintado, indicadas en el numeral 6 de este artículo, favorecen el tratamiento de ciertos tipos de impresión con mayor eficiencia que los procesos convencionales.

## REFERENCIAS

Acosta, D. A., J. F. Scamehorn y S. D. Christian (2003). "Flotation deinking of office paper using sodium octanoate and sodium dodecanoate as surfactants and calcium as the activator". *Journal of Pulp and Paper Science*, **29**: 35-41.

Alvárez, R., F. Bidegaray, N. Ferrari y M. Vásquez (2001). Destintado de desechos de papel para producción de pulpa de alta calidad. En línea en [\[http://recyt.ibict.br/files/PremioMercosul/2000UR/DocumentoCompleto.pdf?PHPSESSID=35549aba0381ee3f48ce1005e709bb7e\]](http://recyt.ibict.br/files/PremioMercosul/2000UR/DocumentoCompleto.pdf?PHPSESSID=35549aba0381ee3f48ce1005e709bb7e), consultado en 2011-04-10.

Bajpai, P. (1998). Deinking with enzymes: A Review. *Tappi Journal*, **81**: 111-117.

Ben, Y., G. Dorris y N. Pagé (2006). Application of column flotation in paper recycling. *Progress in Paper Recycling*, **15**: 25-35.

Bobu, E., F. Ciolacu y A. Cretu (2008). Deinkability of mixed prints: alkaline vs.

neutral deinking. *Progress in Paper Recycling*, **18**: 23-31.

CAR/PL (2005). Manual de prevención de la contaminación en el sector papelerero. En línea [\[http://www.cprac.org/es/descargas/documentos/estudios-sectoriales?page=1\]](http://www.cprac.org/es/descargas/documentos/estudios-sectoriales?page=1). Consultado 2011-03-15.

Dorronsorro, R. (1998). Las enzimas en la industria papelera. *Ingeniería Química*, **30**: 215-218.

Dovale S., A. M. Evaluación del proceso de destintado enzimático de papel tipo MOW (Mixed Office Waste) empleando celulasa. Medellín, 2009, 111 p. Tesis (Ingeniero Químico) Universidad Pontificia Bolivariana. Escuela de Ingenierías. Facultad de Ingeniería Química.

Elegir, G., E. Panizza y M. Canetti (2000). Neutral-enzyme-assisted deinking of xerographic office waste with a cellulose-amylose mixture. *Tappi Journal*. **83**: 71

Elegir, G. y D. Bussini (2008). Evaluation of enzymatic assisted deinking of wood containing paper versus conventional deinking. *Progress in Paper Recycling*, **18**: 40-44.

Ferguson, L. D. (1992). Deinking chemistry: part 1. *Tappi Journal*. **75**: 75-83.

Franks, N. y K.W. Page. Neutral deinking with a deinking composition comprising a lipase and a fatty acid ester. Patente No. 20040099385, May. 2004. 8p.

Galland, G., Y. Vernac y B. Carré (1997). The advantages of combining neutral and alkaline deinking, part II. *Pulp and Paper Canada*, **98**: 60-63.

García, J. A. (2001). Fundamentos del destintado por flotación (y II). *Ingeniería Química*, **33**: 265-272

Heise, O.U., J.P. Unwin, J.H. Klungness, W.G. Fineran and S. Abubakr (1996). Industrial scaleup of enzyme-enhanced deinking of nonimpact printed toners. *Tappi Journal*. **79**: 207-212.

Hoyos, J. J. y G. J. López. Destintado enzimático de papel impreso por el método offset. Medellín, 2006, 82 p. Tesis (Ingeniero Químico). Universidad Pontificia Bolivariana. Escuela de Ingenierías. Facultad de Ingeniería Química.

Jobbins, J. M. y O. U. Heise (1996). Neutral deinking of mixed office waste in a closed -

- loop process. *Recycling Symposium (Tappi)*, Atlanta. (1996); p. 27-32.
- Jobbins, J. M. (1997). Enzymatic deinking of mixed office waste: process condition optimization. *Tappi Journal*, **80**: 73-78.
- Kemper, M. (1999). State-of-the-art and new technologies in flotation deinking. *International Journal of Mineral Processing*, **56**: 317-333.
- Lakshmana, B. H., R. G. Nayak y K. Vasanthakumar (2008). Neutral flotation deinking - A new opportunity for Indian paper industries. *IPPTA J.*, **20**: 143-145.
- Lind, J. y G. Merényi (1997). Hydroxyl radical induced viscosity loss in cellulose fibers. *J. Wood Chemistry Technology*, **17**: 111-117
- López, D.; J. F. Colom, T. Vidal y A. L. Torres. Aplicación previa de Amilasas a la desintegración del papel reciclado. Barcelona, 2000, p. 7. Tesis (Ingeniero Textil y Papelera) Escuela Universidad Politécnica de Cataluña. Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Terrassa.
- López, D. (2002). Estudio del destintado de tintas flexográficas. Proposición de un modelo experimental. Congreso Iberoamericano de investigación en celulosa y papel 2002, CIADICYP. España.
- Marchessault, R. H., E. M. Debzi y G. Excoffier (1997). Deinking of xerographic prints assisted by steam-explosion. *Pulp & Paper Canada*, **98**: 59-62.
- Marwah, N. y Allen A. Gold. Magnetic deinking of waste papers. U.S. Pat. No. 5527426, Jun. 1996. 6p.
- Morrow, H., B. Horacek, K. Hale y S. Rosencrance (2005). True-neutral deinking. *Paper Age*, **121**: 34-37.
- Pala, H., M. Mota y F. M. Gama (2004). Enzymatic versus chemical deinking of non-impact ink printed paper. *Journal of Biotechnology*, **108**: 79-89.
- Pala, H., M. Mota y F. M. Gama (2006). Factors influencing MOW deinking: Laboratory scale studies. *Enzyme and Microbial Technology*, **38**: 81-87.
- Pauck, J. y J. Marsh (2002). The role of sodium silicate in the flotation deinking of newsprint at Mondi Marebank. *Tappi Journal*. 20-25.
- Qian, Y. y B. Goodell (2005). Deinking of laser printed copy paper with a mediated free radical system. *Bioresource Technology*, **96**: 913 - 920.
- Ramírez, R., J. Ramos y J. Turrado (2004). Deinking of laser printed paper by ultrasound, flotation and washing systems. *Progress in Paper Recycling*. **13**: 29-36.
- Rojas, O. y J. Bullon (2007). Cuaderno FIRP S847-A. Fenómenos interfaciales en el destintado de papel desperdicio. En línea en [<http://www.firp.ula.ve/archivos/cuadernos/S847A.pdf>]. Consultado 2010-10-12
- Rosencrance, S. (2007). Non-sulfite neutral deinking for recycled fibre. *Pulp and Paper Canada*, **108**: 15-18.
- Sánchez, F. (2000). El reciclado de papel. *Ingeniería Química*, **32**: 101-108.
- Sarquella, P.. Aspectes físics i químics del destintatge de paper revista mitjançant tensioactius catiónics. Girona, 2005, 373 p. Tesis (Doctor en Ciències Ambientals) Universitat de Girona.
- Spiridon, J. y A. Machado (2005). Enzymatic deinking of old newspaper (ONP). *Progress in Paper Recycling*, **14**: 14-18.
- Theander, K. y R. J. Pugh (2004). Surface chemicals concepts of flotation de-inking. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. **240**: 111-130.
- Turrado, J., M. L. Castillo, A. Saucedo, H. Alzate (2008). Aspectos físicos y químicos del destintado por flotación. Taller de reciclaje de papel. CIADICYP 2008. Guadalajara.
- Vargas, A. y J. P. Vélez. Destintado de papel desperdicio mediante la combinación de etapas neutras y alcalinas. Medellín, 2005, 117 p. Tesis (Ingeniero Químico). Universidad Pontificia Bolivariana. Escuela de Ingenierías. Facultad de Ingeniería Química.
- Viesturs, U., M. Leite, M. Eisimonte, T. Eremeeva y A. Treimanis (1999). Biological deinking technology for the recycling of office waste papers. *Bioresource Technology*, **67**: 255-265.
- Vilaseca, F. (2000). Estudio del destintado de papeles reciclados. *Ingeniería Química*, **32**: 223-228.
- Welt, T. y R. Dinus (1995). Enzymatic deinking. *Progress in Paper Recycling*, **4**: 36-47.
- Xu, G. y B. Goodell (2001). Mechanisms of wood degradation by brown-rot fungi: chelator-mediated cellulose degradation and binding of iron by cellulose. *Journal of Biotechnology*, **87**: 43-57.



- Zhang, X., S. Renaud y M. Paice (2008). Cellulose deinking of fresh and aged recycled newsprint magazines (ONP/OMG). *Enzyme and microbial technology*, **43**: 103-108.
- Zhao, Y., Y. Deng y J. Y. Zhu (2004). Roles of surfactants in flotation deinking. *Progress in Paper Recycling*, **14**: 41-45.
- Zhu, J.Y., G. H. Wu y Y. Deng (1998). Flotation deinking of toner- printed papers using froth agent spray. *Journal of Pulp and Paper Science*, **24**: 295-299.