

**DETERMINACIÓN DE LA EXISTENCIA
DE INFORMACIÓN TÉCNICA EN RECICLABILIDAD
DE PAPELES CON ADHESIVO PSA**

ALEJANDRO RÍOS CADAVID

**Medellín
Universidad EAFIT
Escuela de Administración
Maestría en Administración
2010**

**DETERMINACIÓN DE LA EXISTENCIA
DE INFORMACIÓN TÉCNICA EN RECICLABILIDAD
DE PAPELES CON ADHESIVO PSA**

ALEJANDRO RÍOS CADAVID
Código 200919416006

**Trabajo de grado para optar al título
de Magíster en Administración -MBA-**

Asesor metodológico: Doctor Iván Darío Toro J.
Asesora técnica: Natalia Uribe R.

**Medellín
Universidad EAFIT
Escuela de Administración
Maestría en Administración
2010**

Nota de aceptación

Presidente del jurado

Jurado

Ciudad y fecha

A Gloria, Daniela, Miguel y Nicolás por aceptar con paciencia la ausencia puntual de un esposo y padre, en pos de un ideal que se concreta a través del presente trabajo.

AGRADECIMIENTOS

A Natalia Uribe R. asesora técnica, por su constante apoyo como ingeniera.

Al doctor Iván Darío Toro J., asesor metodológico, por la concreción de su orientación desde el inicio del curso Metodología de la Investigación.

CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE TABLAS	10
RESUMEN	11
ABSTRACT	12
INTRODUCCIÓN	13
1 MARCO TEÓRICO	18
1.1 Tipos de adhesivo (PSA)	18
<u>1.1.1</u> Base caucho	18
<u>1.1.2</u> Base acrílico	18
1.2 Tipos de construcciones autoadhesivas.....	19
1.3 Fuentes de generación de desperdicio con PSA preconsumo	19
1.4 Fuentes de generación de desperdicio postconsumo	20
1.5 Reciclaje de papel y papel autoadhesivo	21
2 JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA	22
3 DESARROLLO DE LA EXPLORACIÓN DE INFORMACIÓN TÉCNICA.....	28
3.1 Propiedades del PSA y su efecto en la tamizabilidad de <i>stickies</i> durante el proceso de reciclaje de papel	28
3.2 Controlando el comportamiento del adhesivo durante el reciclado	37
3.3 Estudio en planta piloto de la reciclabilidad de los adhesivos sensibles a la presión.....	41
3.4 Efecto de aditivos del tipo <i>amphiphilic</i> en el comportamiento de los adhesivos base acrílico sensibles a la presión durante el proceso de reciclaje del papel	48
3.5 Remoción de <i>stickies</i> empleando un medio enzimático neutro en el tamizado a presión del proceso de repulpado.....	54

3.6 El efecto de los materiales de <i>liner</i> en los contaminantes de adhesivo y en el reciclaje del papel	58
3.7 El rol de las propiedades del papel de cara de impresión (<i>facestock</i>) en la determinación de la eficiencia de remoción de adhesivos sensibles a la presión de las operaciones de reciclado	62
3.8 Proceso de remoción de contaminantes de la pulpa de papel usando una composición para destintado que comprende adhesivos sensibles a la presión.....	63
3.9 Remoción de PSA vía lavado en solvente de especificación no publicada.....	64
CONCLUSIONES	65
BIBLIOGRAFÍA	67

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Consumo en Europa de papel <i>tissue</i> en comparación con P&W recubierto y no recubierto	23
Figura 2. Consumo en Norteamérica de papel <i>tissue</i> en comparación con P&W recubierto y no recubierto.....	23
Figura 3. Índices de recuperación	24
Figura 4. Demanda de fibra en China	25
Figura 5. Consumo mundial de fibra reciclada.....	26
Figura 6. Precio en dólares por tonelada de fibra NBSK y eucalipto	26
Figura 7. Resistencia adhesión <i>tack</i> -tosa (<i>loop tack</i>) vs. tamizabilidad.	31
Figura 8. Resistencia al despegado (<i>peel strength</i>) vs. tamizabilidad ...	32
Figura 9. Resistencia al esfuerzo cortante (<i>shear strength</i>) vs. tamizabilidad	33
Figura 10. Resistencia al esfuerzo tensil (<i>tensile strength</i>) vs. tamizabilidad	34
Figura 11. Índice de elongación vs. tamizabilidad.....	35
Figura 12. Ángulo de contacto (<i>contact angle</i>) vs. tamizabilidad	36
Figura 13. Contenido de <i>tackificante</i> vs. tamizabilidad	37
Figura 14. Tamaño de partícula vs. temperatura de <i>pulper</i>	38
Figura 15. Eficiencia de tamizado vs. tamaño aparente de partícula	39
Figura 16. Eficiencia de tamizado vs. pérdida de resistencia tensil	40
Figura 17. Cambio de energía superficial en función de concentración de agente dimensional a 50 °C.....	41
Figura 18. Proceso típico de reciclaje de papel	42

Figura 19. Disposición de proceso de un tamiz secundario	43
Figura 20. Disposición de proceso de doble tamiz secundario	44
Figura 21. Conteo de partículas vs. tamaño de partículas en el <i>pulper</i> .45	
Figura 22. Conteo de partículas vs. tamaño de partículas en tamiz burdo (primario).....	45
Figura 23. Conteo de partículas en tamiz burdo en la prueba de septiembre	46
Figura 24. Conteo de partículas en tamiz fino primario.....	46
Figura 25. Conteo de partículas en tamiz fino secundario	47
Figura 26. Partículas de adhesivos luego del proceso de repulpado sin agente humectante adicional	50
Figura 27. Partículas de adhesivos luego del proceso de repulpado con 1,75% de agente humectante.....	50
Figura 28. Partículas de adhesivos luego del proceso de repulpado con 5,75% de agente humectante.....	51
Figura 29. Eficiencia de remoción a 50 °C en función de la concentración del agente humectante	52
Figura 30. Eficiencia de remoción en función de la concentración del agente emulsificante relativo a dos tipos de papel <i>facestock</i>	52
Figura 31. Adhesivo repulpado en presencia de <i>liner</i>	59
Figura 32. Adhesivo repulpado sin presencia de <i>liner</i>	60

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Precios de fibra NBSK de agosto a octubre de 2010.....	27
Tabla 2. Resultados del conteo en tamiz burdo (primario)	45
Tabla 3. Resultados del conteo en tamiz fino primario.....	46
Tabla 4. Efecto del agente humectante sobre la energía superficial, los componentes de la energía superficial, el trabajo de autoadhesión en agua y eficiencia de remoción (RE) a 50 °C.....	49
Tabla 5. Efecto de la dispersión <i>tackificante</i> en valor de <i>loop tack</i> , temperatura de transición vítrea, resistencia a la tensión de humectación, autoadhesión en agua y eficiencias de remoción en tamizado (RE) a 50 °C.....	53
Tabla 6. Propiedades mecánicas y superficiales de tres <i>facestocks</i> y la eficiencia de remoción de los tres adhesivos del estudio, laminados sobre éstas.....	53
Tabla 7. Medición de contaminantes en cinco etapas del proceso de remoción de <i>stickies</i>	55
Tabla 8. Tamaño de partícula promedio hasta 0,02 mm ² y mayor a 4 mm ²	56
Tabla 9. Micro- <i>stickies</i> medidos por adsorción en <i>polyfoam</i> desde el agua de proceso luego de los tamices de 0,3 y 0,15 mm.....	56
Tabla 10. Análisis de muestras presecadas del modelo postconsumo...	61

RESUMEN

Los adhesivos sensibles a la presión (PSA) han sido y son la mayor fuente de *stickies*, o pequeñas partículas de adhesivos contaminantes, en la industria de reciclaje del papel y constituyen una de sus principales barreras técnicas. Los métodos existentes en la literatura disponible a la fecha para sortear dicha problemática no son concluyentes, por lo cual se explorarán todas las alternativas encontradas en busca de una potencialmente aplicable en nuestro medio. Lograr resultados en reciclabilidad de papeles adhesivos se hace imprescindible dados los altos precios de la pulpa virgen, la oferta superada por la demanda en papeles recuperados para reciclar, y el alto costo de la fibra reciclada en Colombia.

Palabras clave: Adhesivos PSA, *stickies*, reciclaje de papel, fibra reciclada

ABSTRACT

The pressure sensitive adhesives (PSA) have been and remain the major source of “stickies” or small adhesive contaminant particles in the paper recycling industry, and thus are constituted as one of the main technical barriers to it. Methods to overcome this problem are not decisive in the literature available to date; therefore all alternatives identified will be explored in search of one potentially applicable in our city. To achieve results in recycling of paper adhesives is essential, given the high price of virgin pulp, demand exceeding supply in paper recovering for recycling, and particularly high price of recycled fiber in Colombia.

Key Words: PSA Adhesives, Stickies, Paper recycling, Recycled fiber

INTRODUCCIÓN

El presente texto se desarrolla para cumplir con el requisito de elaborar un trabajo de grado del MBA de la Universidad EAFIT, teniendo como marco el aprendizaje adquirido en la materia Metodología de la Investigación. En este sentido, los propósitos son investigar sobre un tema del cual se posea conocimiento, tener algún factor motivacional en función del aporte que éste entregue y aprender del proceso mismo de desarrollo de la investigación, entre otros aspectos.

Los desperdicios de papeles con adhesivo sensible a la presión (PSA, por la sigla de pressure sensitive adhesives) provenientes de la industria productora de ellos y de las empresas flexográficas no son, hasta la fecha, aceptados por los molinos de las empresas productoras de papel, por lo cual terminan indefectiblemente como relleno sanitario. Esto representa un desaprovechamiento de toneladas de papel potencialmente valiosas en la cadena del reciclaje y aporta negativamente tres metros cúbicos de ocupación de relleno sanitario por tonelada dispuesta. Algunas de las ventajas del reciclaje de estos papeles serían (Smurfitkappa, 2010):

- Disminución de la necesidad de fibras vegetales vírgenes (una tonelada de papel recuperado evita la tala de 12 a 14 árboles).
- Reducción de la contaminación del agua (el papel reciclado requiere el 10% del agua que se usa en el obtenido de la pulpa virgen).

- Disminución de la contaminación atmosférica (el papel reciclado requiere el 55% de la energía necesaria para obtener papel a partir de pasta virgen, generando una cuarta parte de la contaminación).

La recolección y el reciclaje como cadena productiva generan desarrollo económico y más empleos por tonelada que la disposición vía relleno sanitario, la cual constituye un gasto tanto desde el punto de vista económico como ambiental. Ante el aparente desinterés de las grandes industrias papeleras por este tema, probablemente debido al alto costo que implica aproximarse a la procesabilidad de materiales con alto contenido de PSA, el presente trabajo propone la exploración de una alternativa de emprendimiento en este sector.

El no reciclaje de papeles con adhesivo PSA y su disposición en relleno sanitario implican costo económico y ecológico, así como desaprovechamiento de toneladas de fibra potencialmente recuperable.

El uso de estos adhesivos en múltiples construcciones en papeles o películas ha crecido dramáticamente en las últimas dos décadas. Durante este mismo período la recuperación y el reciclaje del papel ha presentado el mismo comportamiento, a tal punto que, desde 1995, la demanda de papel recuperado ha excedido la oferta (Abubakr, 2000), haciendo cada vez más difícil mantener la ecuación del costo de la fibra reciclada frente al precio de la fibra virgen. Simultáneamente, la industria papelerá cerró el ciclo de agua de proceso, al tiempo que se dio el *boom* de las estampillas autoadhesivas. Sumados todos los factores citados, la problemática asociada a los *stickies* tomó

dimensiones de relevancia tal que el problema fue elevado al Servicio Postal de Correos de Estados Unidos (United Status Postal Service, USPS), el mayor usuario de adhesivos PSA (12%) de ese país (Bormett, 1999), por el consumo de estampillas y cintas de cierre de material autoadhesivo, en general adheridas a sobres de correo elaborados en papel. Si bien las estampillas como un todo tienen una incidencia menor en la cadena del reciclaje de papel, su alta rata de aumento en uso de PSA, al pasar de tener tan sólo un 1% de éstas con PSA en 1989 a un 96% para el 2004, ilustra claramente la gran aceptación de los productos con PSA por parte de los consumidores (Guo, 2004) y captura la atención de toda la cadena (proveedores – consumidores) de cara a la posibilidad de un manejo ecológico.

El tema llegó al USPS hacia 1990, cuando unos estudiantes que desarrollaban investigaciones referentes a reciclaje se encontraron con la dificultad que representaban las estampillas autoadhesivas para ese proceso. El USPS tomó cartas en el asunto y para 1995 patrocinó una conferencia a la cual fueron invitados la industria de los adhesivos, el laboratorio de productos forestales (Forest Products Laboratory, FPL), la firma de investigación Springborn Testing and Research, la industria de reciclaje del papel, la industria de recolección del papel y proveedores químicos, con el fin de participar en el programa de desarrollo de un adhesivo sensitivo a la presión ambientalmente benigno para aplicaciones en estampillas de correo (Environmentally Benign Adhesive, EBA) (Katz, 2009).

Los *stickies* en Norteamérica han arrastrado a la quiebra cuatro plantas de reciclaje de siete que se abrieron entre los años 1994 y 1997, y ya

para el año 2005 se estimaba que éstos le costaban a la industria papelerera de ese país entre US\$600 y US\$700 millones por año en paros de equipos, bajas de productividad, métodos de control y pérdida de valor en ventas debido a generación de productos sub-estándar (Zhao *et al*, 2005).

El presente trabajo compila propuestas de corto y largo plazo que pretenden, desde varias perspectivas, minimizar o erradicar el impacto negativo de los *stickies* en la industria del papel. Estas propuestas cubren todos los aspectos de la elaboración de papel adhesivo (PSA), ya que algunas consideran la reformulación del papel de impresión o *facestock*, la reformulación de los adhesivos y la segregación del papel de respaldo (*liner*); pasando por varias posibilidades de alteración del proceso de recuperación en sí mismo.

Aunque no incluye la base de prueba científica que le aportaría una fase de experimentación, el presente trabajo es una exploración básica con validez académica. Su alcance llega, sin lugar a dudas, hasta documentos de difícil acceso en materia de disponibilidad e idioma, permitiendo extraer información de alto contenido técnico relevante a los objetivos del trabajo.

Este trabajo se limita a la búsqueda de información accesible vía internet o a través de la biblioteca de la Universidad EAFIT, bien sea en textos físicos o a través de sus bases de datos. La información seleccionada como alternativa técnica debe provenir de investigaciones publicadas con el respaldo de entidades que garanticen seriedad y legitimidad en la materia. Se preferirá aquella información proveniente

de *journals* o de artículos técnicos sometidos, como mínimo, a revisión de pares. La disponibilidad de la información es en algunos casos parcial, dado que los *journals* no ofrecen todos los artículos de manera libre. El costo de los artículos oscila entre los 30 y los 100 dólares.

1 MARCO TEÓRICO

1.1 Tipos de adhesivo PSA

Los adhesivos sensibles a la presión (PSA) se dividen en categorías basadas en la química de su composición, y pueden ser con base caucho (*hot melt*, emulsión) y con base acrílico (base agua, base solvente). Esta composición es un factor determinante en el desempeño del adhesivo en sus diversas aplicaciones.

1.1.1 Base caucho

Adhesivos que están formulados a partir de gomas y resinas orgánicas. Los de base goma son generalmente menos costosos, aunque son afectados más fácilmente por la oxidación.

1.1.2 Base acrílico

Adhesivos que están formulados a partir de polímeros acrílicos, los cuales son típicamente más costosos, pero resistentes a altas temperaturas y a la oxidación. Estos presentan en general una más baja respuesta a la aplicación inicial (antes de ejercer presión *-tack-*) y requieren un tiempo mayor para alcanzar su máxima adhesión, sin embargo son menos propensos a desarrollar bordes pegajosos y mantienen un nivel más consistente de reposicionabilidad en las etiquetas removibles.

1.2 Tipos de construcciones autoadhesivas

En función de la aplicación, los adhesivos pueden constar de diferentes materiales en las caras de impresión (*facestock*) y de respaldo (*liner*), los cuales pueden llevar capas de productos o tratamientos (como “primer” o tratamiento corona, entre otros) que ayudan tanto al proceso de recubrimiento o impresión como al desempeño final de la etiqueta.

Tipos de materiales:

Transferencia térmica

Térmico con recubrimiento

Térmico sin recubrimiento

Papel bond

Esmaltados semibrillantes

Foil

Foil de aluminio

Películas plásticas

Polipropileno (blanco, transparente, metalizado, holográfico, transferencia térmica)

Polietileno (transparente, blanco, adhesivo y no adhesivo)

Vinilo (blanco, negro o transparente)

1.3 Fuentes de generación de desperdicio con PSA preconsumo

Para el presente trabajo se entenderá como desperdicio preconsumo todo aquel generado durante el proceso de fabricación del material

autoadhesivo, el cual normalmente corresponde a descarte de porciones de la banda de papel, bien sea en la máquina de recubrimiento y laminación o en las máquinas de corte. El proceso de fabricación obliga al descarte de una franja lateral (1 cm aproximadamente) de la banda de material laminado, el cual se conoce como orillo o tirilla, y a porciones completas del ancho de la banda en el caso de empates o revientes de la misma. Mientras estas últimas permiten un deslaminado manual con el propósito de darle destino separado al *facestock* y al *liner*, en el orillo deben ser descartados conjuntamente.

1.4 Fuentes de generación de desperdicio postconsumo

Para el presente trabajo se entenderá como desperdicio postconsumo todo lo relacionado con material descartado en los procesos de impresión (en empresas de flexografía o litografía, por ejemplo). Este se relaciona principalmente con el desperdicio “obligado” del proceso, conocido como *descolille*, el cual resulta de eliminar el material sobrante de la cara de impresión una vez realizado el pretroquelado de la etiqueta en el rollo de material autoadhesivo. También se puede generar desperdicio por orillo, equivalente al que se da en el preconsumo. Existen agentes adicionales presentes en los desperdicios de la industria flexográfica como tintas (base solvente, base agua o UV), barnices, estampados en frío o al calor de metalizados (*foils*) y cintas de laminación.

1.5 Reciclaje de papel y papel autoadhesivo

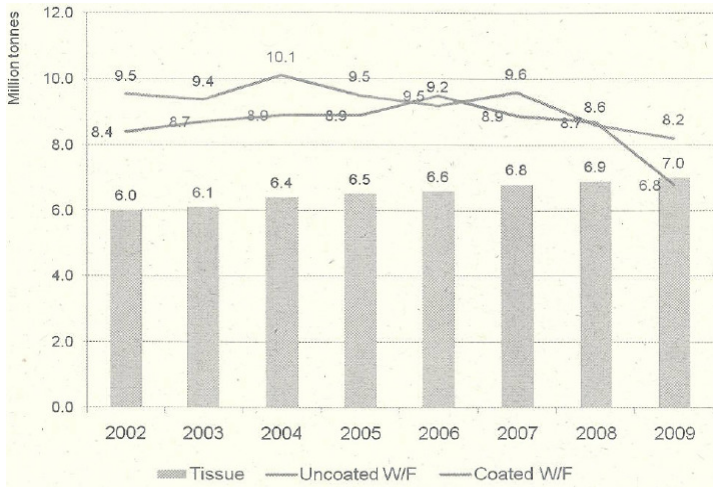
Hoy en día es común el proceso de aprovechamiento del papel vía recolección, separación y repulpeo, ya que el papel en sí mismo es perfectamente reciclable. Sin embargo, aparece una complicación cuando se presentan autoadhesivos adheridos a éste. En esos casos los llamados *stickies* comienzan a interferir con la productividad y la calidad de los procesos de la industria del reciclaje. El tema puede verse desde la perspectiva de los adhesivos adheridos a papel provenientes del llamado MOW (*Mixed Office Waste*), pero también desde el desperdicio de papel adhesivo de las empresas productoras y de los impresores. Y reviste una dimensión tal que los molinos simplemente rechazan cualquier posibilidad de incorporar dicha cantidad de desperdicio a sus procesos dada la imposibilidad de manejar el fenómeno de los *stickies* a gran escala.

2 JUSTIFICACIÓN ECONÓMICA

El presente trabajo reviste importancia desde el punto de vista económico, dada la situación mundial y local de demanda de papel recuperado, la cual hoy en día supera la oferta, con la consecuente presión al alza sobre los precios de la fibra reciclada. El precio de la fibra virgen está estable actualmente y con la apreciación del peso se favorece su importación. Sin embargo, su costo es alto para aplicaciones de bajo valor agregado como los papeles tipo *tissue*, que son los motores del consumo de la fibra reciclada.

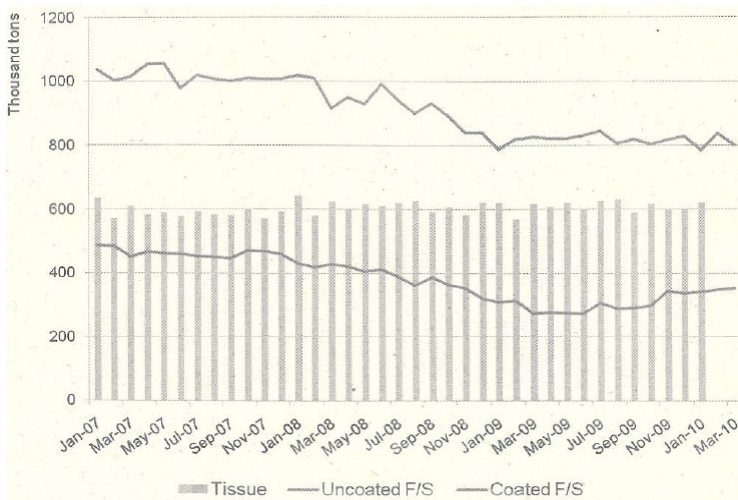
El consumo de papel *tissue* viene al alza alrededor del mundo, al pasar de 4,9 kg per cápita en 2009 a 10 kg per cápita proyectados a 2030, es decir que de 28 millones de toneladas pasará a 88 millones de toneladas; en tanto el consumo de los papeles de impresión y escritura (Printing & Writing, P&W) viene en descenso (en Estados Unidos decreció 15,5% de 2008 a 2009) dado el cambio cultural que está migrando la información del medio impreso al digital (figuras 1 y 2); y son estos últimos papeles (P&W) los que, por excelencia, luego de su ciclo de vida, alimentan la cadena del reciclaje. Es decir, el *tissue* cada vez tiene menos fibra reciclada disponible de cara al futuro.

Figura 1. Consumo en Europa de papel *tissue* en comparación con P&W recubierto y no recubierto



Fuente: RISI

Figura 2. Consumo en Norteamérica de papel *tissue* en comparación con P&W recubierto y no recubierto

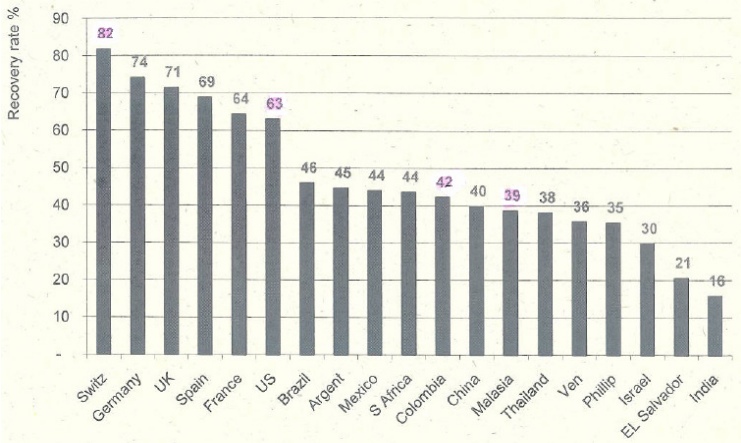


Fuente: RISI

Otro factor importante es el índice de recuperación en nuestra región y en general en el mundo, porque salvo algunos países de Europa como Suiza (82%) y Alemania (74%), los índices están por debajo del 50%. Particularmente China, país que concentra gran parte del consumo

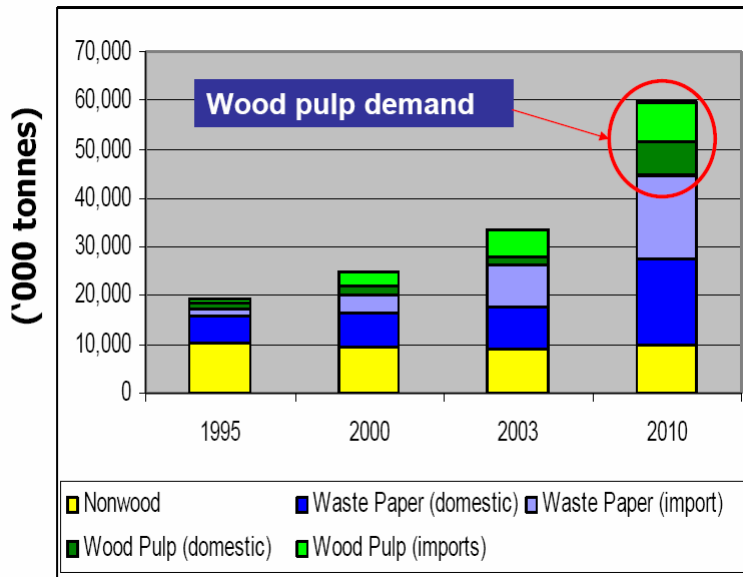
mundial de fibra (figura 3), tiene un índice de recuperación de apenas 40% y una producción local insuficiente, por lo que requiere de grandes importaciones (figura 4). Los vaivenes de su demanda mueven los precios mundiales de la fibra. India es otro caso de desbalance que hay que tener presente como proyección al 2015 dada su baja tasa de recuperación (16%).

Figura 3. Índices de recuperación



Fuente: RISI

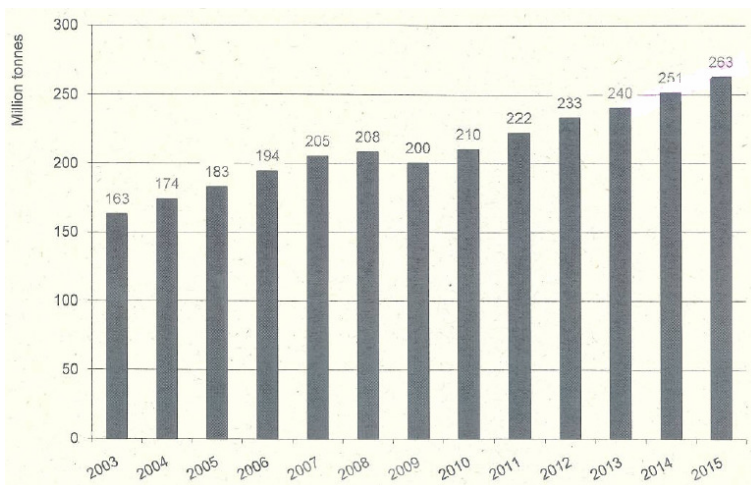
Figura 4. Demanda de fibra en China



Fuente: China Economic Consulting, citado por Barr y Cossalter

El consumo mundial de *tissue* en 2009 fue de 28 millones de toneladas y se espera un aumento en el consumo global de fibra reciclada del orden de los 10 millones de toneladas para 2010, de 23 millones de toneladas para 2012 y de 60 millones de toneladas para 2015, con China (+8,4% en 2009) e India como principales gestores de este crecimiento. A nivel mundial, históricamente el consumo de fibra reciclada solo ha decrecido en 2009 debido a la crisis económica (figura 5) y hoy, un año después, ya recuperó la brecha y muestra crecimiento.

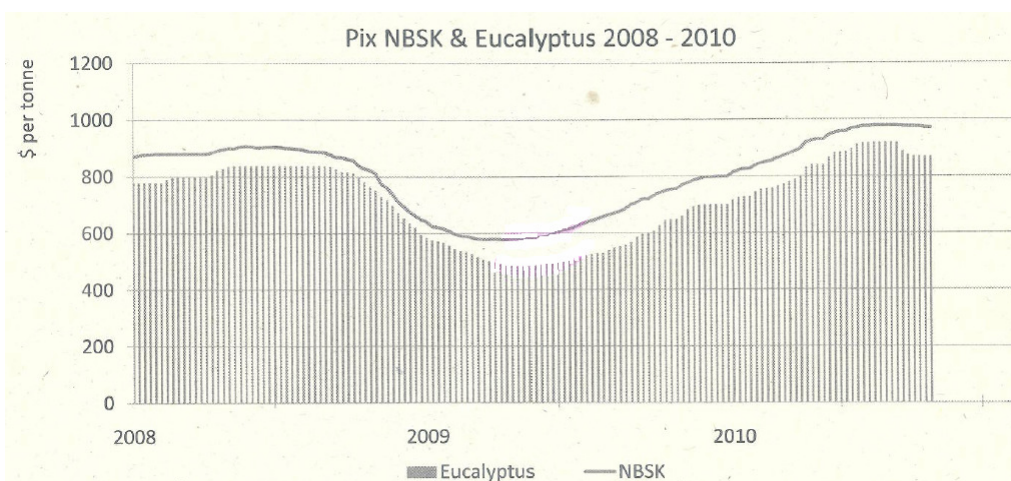
Figura 5. Consumo mundial de fibra reciclada



Fuente: RISI

Los precios de la fibra reciclada en Colombia se han incrementado un 57% entre 2009 y 2010, pasando de US\$177 a US\$278 por tonelada, y se pronostica que alcanzará los US\$300 en 2011; en tanto que la fibra virgen *northern bleached softwood kraft* (NBSK) aumentó un 38% en el mismo período, pasando de US\$667 a US\$919 por tonelada (figura 6, tabla 1).

Figura 6. Precio en dólares por tonelada de fibra NBSK y eucalipto



Fuente: Foex indexes ltd.

Tabla 1. Precios de fibra NBSK de agosto a octubre de 2010

Date	NBSK in the U.S. (USD)	NBSK in Europe (USD)
12-Oct-10	974.78	967.70
5-Oct-10	984.78	969.83
28-Sept-10	990.00	972.91
21-Sept-10	990.00	973.12
14-Sept-10	990.00	970.55
7-Sept-10	990.49	971.33
31-Aug-10	999.78	974.19
24-Aug-10	999.78	975.37
17-Aug-10	999.78	975.63
10-Aug-10	1011.22	977.49

Fuente: Foex indexes Ltd.

En lo expuesto en los párrafos anteriores se aprecia que la situación global de la fibra reciclada requiere con urgencia de fuentes diferentes al P&W para recuperar la brecha que se ha gestado en la cadena del reciclaje, así como de nuevas alternativas en los procesos de manufactura que permitan ampliar el espectro de aceptación de materiales en los molinos. La combinación de ambos factores aportaría una solución de crecimiento sostenible del sector papelerero. Hoy, en los materiales para empaque (como por ejemplo las cajas) se incorpora fibra reciclada en niveles del 92,3%, mientras en los papeles de impresión (no periódicos) solo se incorpora hasta el 10%.

La propuesta del presente trabajo es incorporar a la cadena de la fibra reciclada un actor hasta la fecha rechazado por la problemática de los *stickies*, como es el desperdicio de papel con adhesivo PSA, que en Colombia tiene un costo de disposición en relleno sanitario tanto ecológico como económico.

3 DESARROLLO DE LA EXPLORACIÓN DE INFORMACIÓN TÉCNICA

La información técnica encontrada a través del presente trabajo de investigación se puede dividir en varias áreas o tendencias:

- Relativa a obtener reciclabilidad del papel con adhesivo PSA modificando la formulación del adhesivo mismo.
- Relativa al impacto del papel de respaldo (*liner*) en el proceso de reciclaje.
- Relativa al aprovechamiento del adhesivo como apoyo en otras etapas del reciclaje del papel.
- Relativa al ataque al adhesivo durante el proceso de reciclaje, bien sea vía solución en un medio solvente o con algún medio mecánico.
- Relativa al rol del papel de cara de impresión (*facestock*) y posibles variaciones en éste para mejorar la reciclabilidad de los PSA.

El presente trabajo investigativo se basa, como se podrá apreciar más adelante, en publicaciones de ejercicios de laboratorio o experimentos realizados principalmente por investigadores asociados a universidades norteamericanas, adscritos al Departamento de Agricultura en el Laboratorio de Productos Forestales de ese mismo país, entre otros.

3.1 Propiedades del PSA y su efecto en la tamizabilidad de *stickies* durante el proceso de reciclaje de papel

Los investigadores Yulin Zhao (Institute of Paper Science and Technology, Atlanta, Georgia), Zegui Yan (Franklin International,

Columbus, Ohio) y Yulin Deng (School of Chemical and Biomolecular Engineering at Georgia Institute of Technology) (2005) presentan una propuesta en la que plantean que un entendimiento fundamental de las relaciones entre las propiedades del PSA y la tamizabilidad puede ser fuente de inspiración para el diseño de nuevos adhesivos ciento por ciento tamizables en el proceso de reciclaje del papel.

Una aproximación es el diseño de PSA soluble en agua que no se traduzca en *stickies* durante el proceso de reciclaje. Sin embargo las alternativas desarrolladas presentan problemas debido a su poca resistencia a la humedad y baja adhesión. Además, el adhesivo disuelto se convierte en un problema en materia de tratamiento de agua residual.

Otra estrategia es desarrollar PSA de mayor densidad, que puedan ser fácilmente separados en sistemas de lavado progresivo, o PSA de baja densidad que puedan ser removidos en las etapas de lavado en contraflujo o de flotación. En realidad, la variación en la densidad de los PSA no garantiza el éxito en la remoción de los mismos, ya que los *stickies*, además de PSA, llevan adheridos porciones de fibra y contaminantes, entre otros elementos, lo cual hace que su densidad varíe de manera aleatoria en función de dichos componentes.

Finalmente, es en realidad deseable lograr adhesivos PSA que sean lo suficientemente resistentes para romperse únicamente en partículas relativamente largas, de manera que puedan ser separadas completamente durante el proceso de tamizado.

Aunque ya se ha logrado desarrollar adhesivos con excelente capacidad de ser removidos en los procesos de tamizado y flotación, no hay un entendimiento claro de la relación entre dichas capacidades y las propiedades mismas de los PSA. La alternativa en cuestión pretende hallar esta relación.

Los materiales empleados son 18 adhesivos PSA comerciales de base acrílico, dos *tackificantes* también comerciales, papel de fotocopia recubierto con una capa de adhesivo de 0,025 in de espesor secado a 90 grados por 5 minutos. Se retiró el *liner* siliconado para simular situación de material de postconsumo.

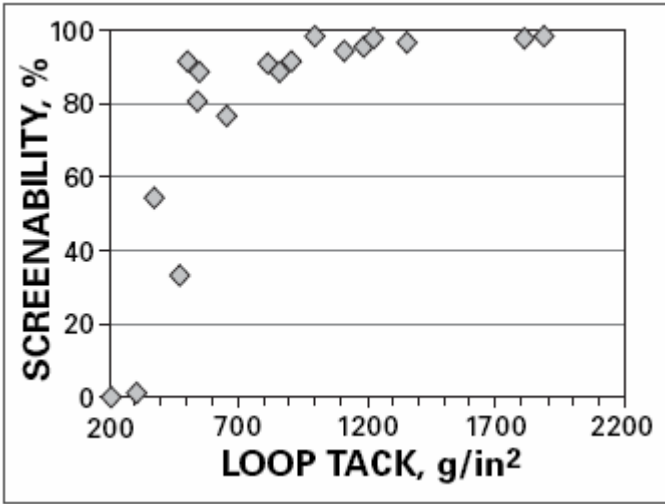
Del presente experimento se derivan los siguientes resultados:

La tamizabilidad de los PSA aumenta si el *loop tack* aumenta (figura 7). *Tack* se define como la fuerza requerida para separar un adhesivo de una superficie inmediatamente después de que hayan hecho contacto sin aplicación de presión. Así pues, el *tack* representa la capacidad del adhesivo de adherirse rápidamente y se mide en dos pasos: contacto y separación.

Durante la primera etapa, el contacto con la superficie lo determinan la humedad residual del adhesivo, la fluidez (viscosidad) y la deformación elástica. En la etapa de separación juega un papel muy importante la capacidad de absorber energía de deformación, la cual se disipa al romperse la unión. La condición de alta capacidad de absorber deformación se asocia con alto *tack*, así como con baja viscosidad de unión, alta viscosidad de separación y alta elasticidad.

Durante el proceso de repulpado los PSA son sometidos intermitentemente a esfuerzos cortantes, de manera que adhesivos con mayor *tack* serán capaces de absorber estos esfuerzos sin ser propensos a romperse. Los PSA son normalmente hidrofóbicos y tienden a aglomerarse, con lo cual *stickies* de PSA de alto *tack* se aglomerarán más fácilmente unos con otros formando partículas mayores, lo que favorece su atrapamiento en el proceso de tamizado.

Figura 7. Resistencia adhesión *tack*-tosa (*loop tack*) vs. tamizabilidad



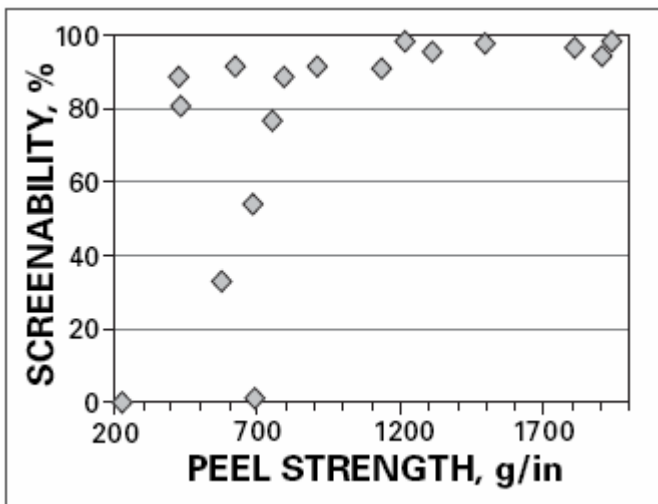
Fuente: Tappi Journal

Fuerzas de separación (*peel strength*) mayores a 1.000 g/in² tienden a ofrecer mejores posibilidades de separación en el tamizado (figura 8). El *peel strength* o simplemente "pil", como se le conoce vulgarmente, es la fuerza requerida para remover bajo condiciones estándar (ángulo y rata de halado definidos) un material recubierto de PSA adherido a una superficie específica en análisis. Esta medida nos muestra cuan adhesivo o cohesivo es un material con PSA, según este falle. Al igual que en la prueba del *tack*, en el *peel* también están las etapas de contacto y

separación (o *peeling*). Para alcanzar adhesión grado *peel* hay un tiempo de espera mínimo comprometido.

La fuerza de *peel* indica la capacidad de un PSA de mantenerse unido a otra superficie en presencia de una fuerza que trata de separarlos. Así que un PSA con alta fuerza de *peel* no se separará fácilmente de un papel de sustrato como lo hará uno de bajo *peel*, lo cual permite que durante el proceso de repulpado se obtengan partículas de mayor tamaño eliminables en el tamizado (figura 8).

Figura 8. Resistencia al despegado (*peel strength*) vs. tamizabilidad



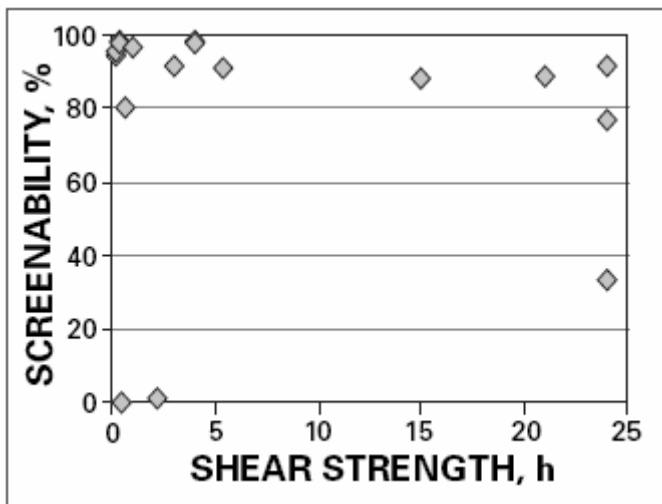
Fuente: Tappi Journal

La resistencia a esfuerzos cortantes o de cizalladura (*shear strength*) no presenta correlación con la tamizabilidad de los PSA (figura 9). Esta resistencia hace referencia a la capacidad de un PSA de mantener su posición cuando recibe una fuerza cizallante, la cual se aplica de manera paralela a la superficie a la que éste se encuentra adherido. Un PSA de alto *shear* tiene una resistencia estructural interna alta, lo cual debería traducirse en mayor dificultad para romperlo durante el proceso de

repulpado. Sin embargo, la baja capa asociada normalmente a los recubrimientos (0,0025 in) hace que sea necesaria una fuerza muy baja para romperla, particularmente en relación con las altas fuerzas cizallantes presentes en el proceso de repulpado.

Se requeriría de la evaluación de un universo mayor de adhesivos y pruebas complementarias, ya que los resultados se aprecian esparcidos sin patrón definido, con lo cual se concluye que la resistencia *shear* no tiene un rol dominante en la tamizabilidad del PSA (figura 9).

Figura 9. Resistencia al esfuerzo cortante (*shear strength*) vs. tamizabilidad

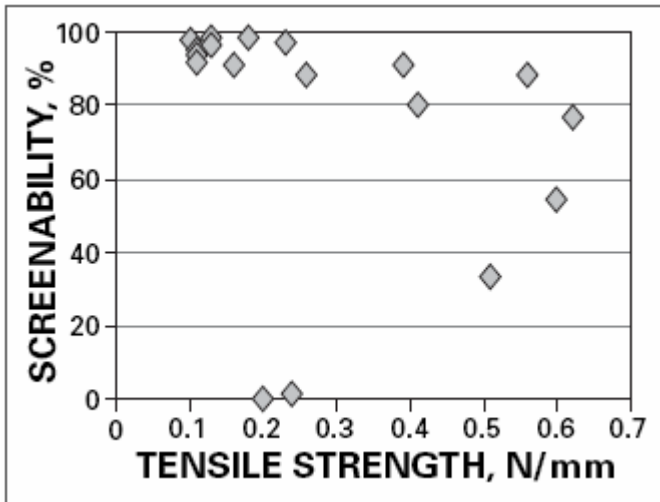


Fuente: Tappi Journal

La resistencia a la tensión (*tensile strength*) no tiene efecto alguno en el tamizado de *stickies* durante el proceso de reciclaje (figura 10). Esta es la resistencia estructural del PSA ante una fuerza externa, lo cual es similar a *shear*. Los polímeros que presentan una alta resistencia tensil no son considerados PSA dado que no tienen *tack* ni adhesión. Para la fina capa presente en los papeles recubiertos con PSA, mencionada anteriormente, la resistencia tensil es tan baja que es despreciable

(figura 10) su efecto en el rompimiento o no en pequeñas partículas y en la correspondiente tamizabilidad.

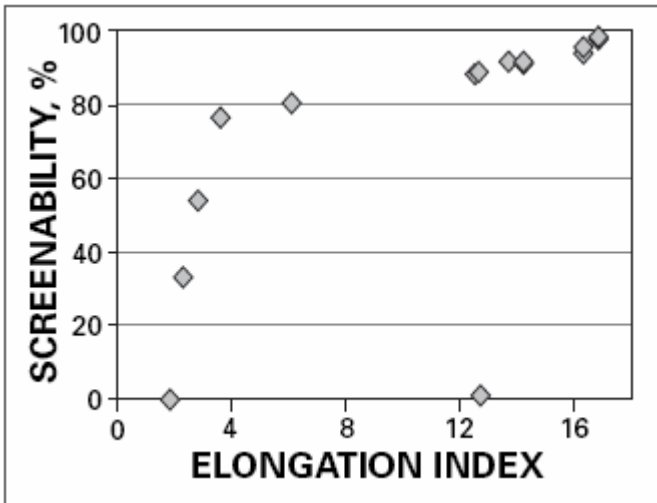
Figura 10. Resistencia al esfuerzo tensil (*tensile strength*) vs. tamizabilidad



Fuente: Tappi Journal

El experimento arrojó como resultado que un PSA con índice de elongación mayor a 13, en general se comporta bien en el proceso de tamizado (figura 11), con excepción de una muestra. La elongación es la capacidad de un material de absorber deformación hasta su punto de rotura, es decir que un alto índice de elongación representa mayor dificultad para fracturar en partes. Un PSA con alto índice de elongación es difícil de romper debido a que puede estirarse bajo la presencia súbita de fuerzas cizallantes presentes en el proceso de repulpado.

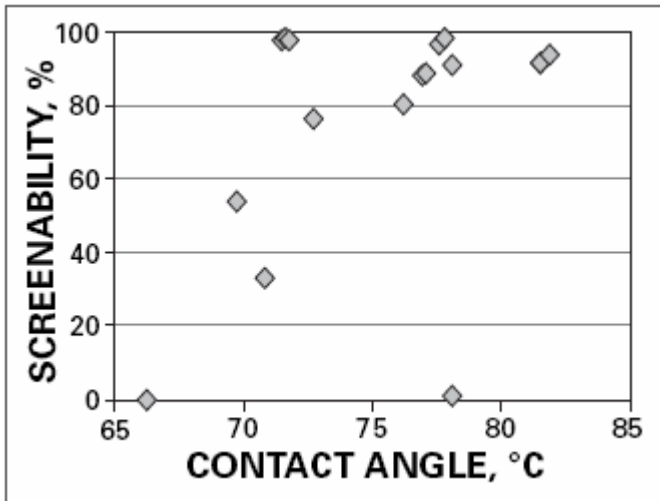
Figura 11. Índice de elongación vs. tamizabilidad



Fuente: Tappi Journal

El ángulo de contacto predice un buen índice de tamizado. Los PSA con altos ángulos de contacto son más hidrofóbicos y deben tener una tendencia mayor a agruparse durante el repulpado. Los datos para este análisis (figura 12) soportan esta premisa, pero se debe tener precaución en pretender que esta sea una conclusión determinante, ya que hubo varias muestras por fuera del patrón, además de tener una cantidad limitada de datos y un estrecho rango de resultados (de 66 a 84 grados) en las muestras.

Figura 12. Ángulo de contacto (*contact angle*) vs. tamizabilidad



Fuente: Tappi Journal

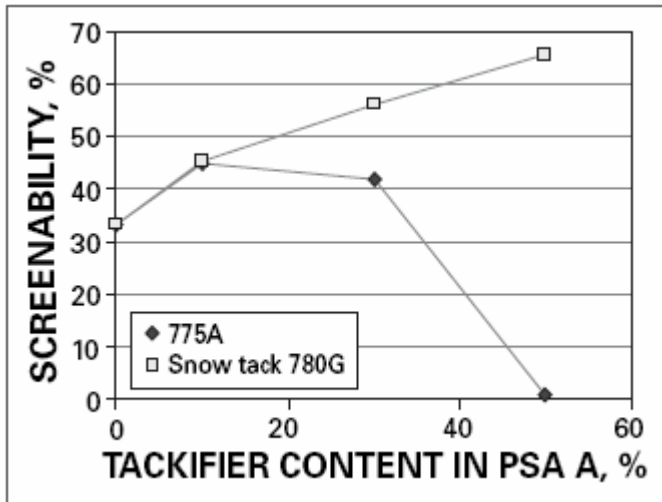
Los resultados muestran entonces que a mayor *tack*, *peel* e índice de elongación, mayor tamizabilidad del adhesivo PSA. Por lo tanto, se propone mejorar dichas propiedades vía formulación de los PSA para obtener adhesivos realmente eliminables en la etapa de tamizaje del proceso de reciclaje del papel (repulpado).

Para corroborar la anterior premisa se complementa el experimento empleando los *tackificantes snowtack* 780G y 775A del fabricante EKA para reformular dos (A y B) de los 18 adhesivos PSA del presente ejercicio.

Los resultados obtenidos (figura 13) muestran que a un valor de ph (10,5), un *tackificante* puede ser levemente soluble en agua (775A) y otro insoluble (780), lo cual puede significar que haya solución de alguno de ellos en la pasta del proceso de repulpado, resultando en rotura de la capa de PSA y una pobre tamizabilidad del mismo. La

adición del *tackificante* adecuado mejora las propiedades del PSA antes citadas y su comportamiento en el proceso de reciclaje.

Figura 13. Contenido de *tackificante* vs. tamizabilidad



Fuente: Tappi Journal

3.2 Controlando el comportamiento del adhesivo durante el reciclado

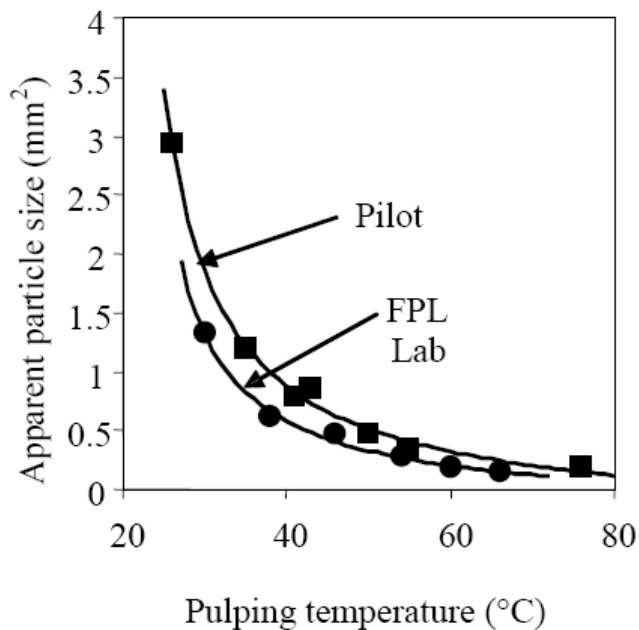
Los autores Carl Houtman y Karen Scallon (USDA Forest Service, Forest Products Laboratory), Jihui Guo, XinPing Wang y Steve Severtson (Departament of Bio-based Products, University of Minnesota), Mark Kroll y Mike Nowak (H.B. Fuller Company) (2004) presentan este estudio cuyo propósito es describir los factores que controlan el tamaño de partícula durante el proceso de repulpado, ya que este tamaño determina en última instancia la eficiencia de remoción durante toda la cadena del reciclaje. Los resultados son conducentes a formulación de adhesivos orientados a una fácil y efectiva remoción en los molinos de reciclaje.

Los materiales empleados son adhesivo *hot melt* (base caucho) suministrado por H.B. Fuller, papeles y fibra de Boise Corporation, alkenyl ketene y resina de poliamida de Hercules Corporation.

Los resultados obtenidos son:

Para el caso de adhesivos PSA *hot melt*, el módulo elástico es muy dependiente de la temperatura, y si ésta se eleva, el tamaño de partícula disminuye (figura 14).

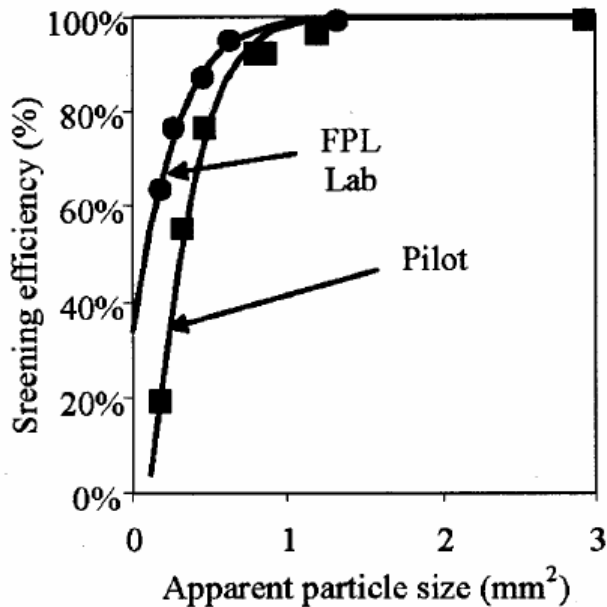
Figura 14. Tamaño de partícula vs. temperatura de pulper



Fuente: Pulp and Paper Technical Association of Canada

Como se ha dicho antes, el tamaño de partícula está directamente asociado a la efectividad del tamizado, tal como se verifica en el presente ejercicio (figura 15).

Figura 15. Eficiencia de tamizado vs. tamaño aparente de partícula



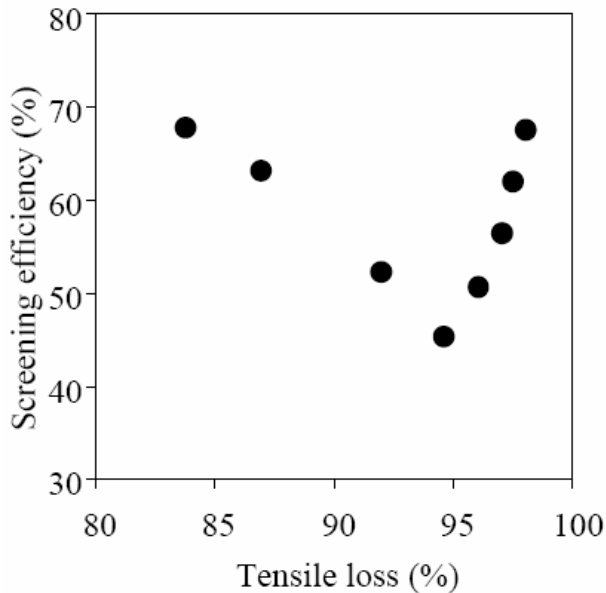
Fuente: Pulp and Paper Technical Association of Canada

El efecto de la resistencia a la humedad y los agentes dimensionales en la efectividad de remoción son otros factores determinantes corroborados durante el presente experimento. Asimismo, la eficiencia de remoción de un adhesivo *hot melt* en función del porcentaje de decrecimiento de la pérdida de resistencia tensil del *facestock* como consecuencia de su saturación en agua (a 50 °C) (figura 16).

Al aumentar la concentración de la resina humectante se disminuye la resistencia tensil del *facestock*, lo que se traduce en menor remoción del PSA. Si se lee de derecha a izquierda la curva de la gráfica presentada en la figura 5, se puede ver que al aumentar la resistencia a la humedad del *facestock* (disminuyendo resistencia tensil) disminuye la tamizabilidad, encontrando su mínimo en 95% de *tensile loss*. Por debajo de este valor el *facestock* se fibriliza en menor tamaño, lo cual

actúa como refuerzo del PSA y reduce su fragmentación. De hecho, se pueden obtener altas eficiencias de remoción a expensas de pérdida de fibra.

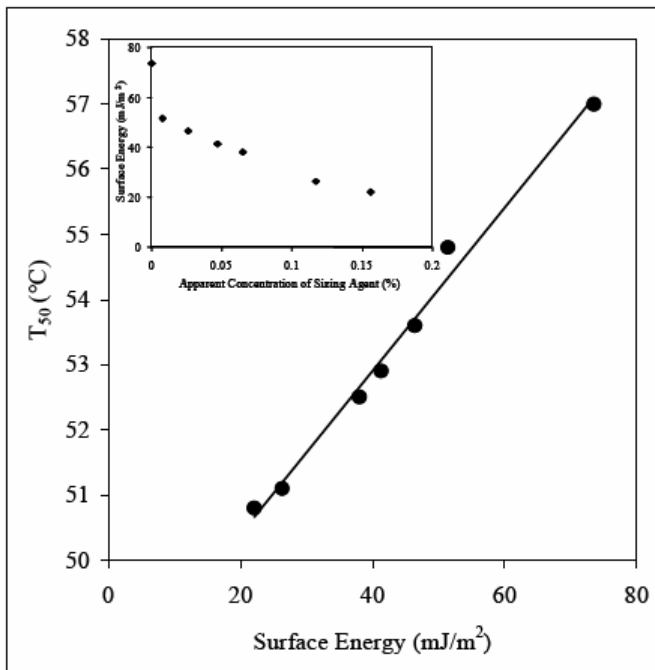
Figura 16. Eficiencia de tamizado vs. pérdida de resistencia tensil



Fuente: Pulp and Paper Technical Association of Canada

Por último se demuestra que al aumentar la tensión superficial (energía superficial) del *facestock*, se puede desplazar la curva de temperatura del *pulper* hacia arriba (figura 17). Esto se explica debido a la influencia de la energía a través de un trabajo termodinámico de remoción de la adhesión del PSA del *facestock*. Al aumentarse la energía superficial en las fibras de celulosa del *facestock* se reduce el trabajo termodinámico de remoción en un medio acuoso. Este efecto reduce la cantidad de esfuerzo requerido para remover el PSA, lo cual favorece la formación de partículas mayores durante el repulpado.

Figura 17. Cambio de energía superficial en función de concentración de agente dimensional a 50 °C



Fuente: Pulp and Paper Technical Association of Canada

3.3 Estudio en planta piloto de la reciclabilidad de los adhesivos sensibles a la presión

Bruce R. Crossley y David B. Grimes (Beloit Pulping Group R&D Center), Said Abubakr (USDA Forest Products Laboratory) y Rajendra Kumar (US Postal Service) (2000) elaboraron este estudio de planta piloto, como parte del esfuerzo del Servicio Postal de Estados Unidos de desarrollar un adhesivo PSA benigno con el medio ambiente para ser empleado en las estampillas postales.

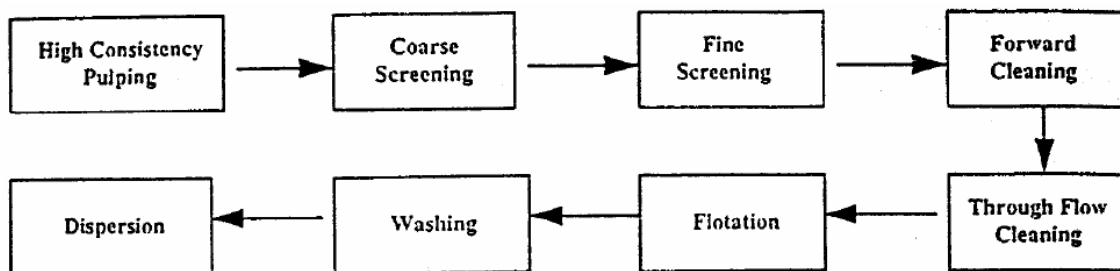
Para los presentes experimentos se emplean una mezcla de 95% sobres de correo con peso base n.º 20 y 5% de estampillas laminadas con

adhesivo comercial base acrílico adheridas a papel de copia limpio, simulando situación de postconsumo (sin *liner*). Esta mezcla tuvo como resultante aproximadamente 1% en peso de adhesivo en relación con la pulpa. Se realizaron dos grupos de pruebas, en mayo de 1999 y en septiembre del mismo año.

Las pruebas emplearon aproximadamente 400 kilogramos de pulpa, que luego de la adición de agua resultó en un 15% de consistencia, ph 10 ajustado mediante el empleo de soda cáustica y una temperatura controlada de 40 °C mediante la adición de vapor directo.

El siguiente diagrama de bloques describe el proceso típico de reciclaje de papel:

Figura 18. Proceso típico de reciclaje de papel

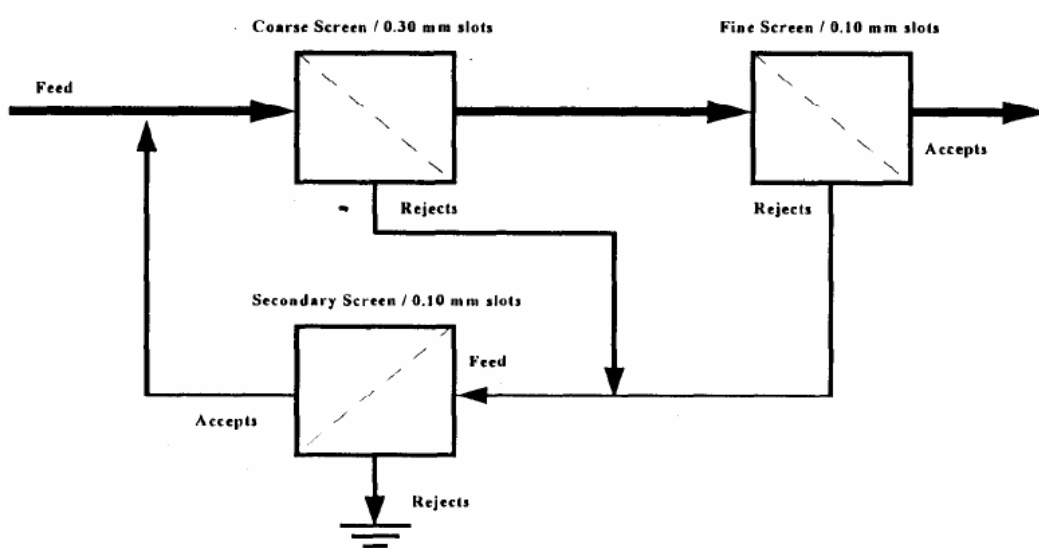


Fuente: Tappi Proceedings 2000. Recycling Symposium

El ejercicio tuvo como conclusión una propuesta de modificación de las etapas de tamizado, tanto en dimensión de los agujeros como en configuración del sistema mismo.

Ejercicio 1 (mayo de 1999)

Figura 19. Disposición de proceso de un tamiz secundario

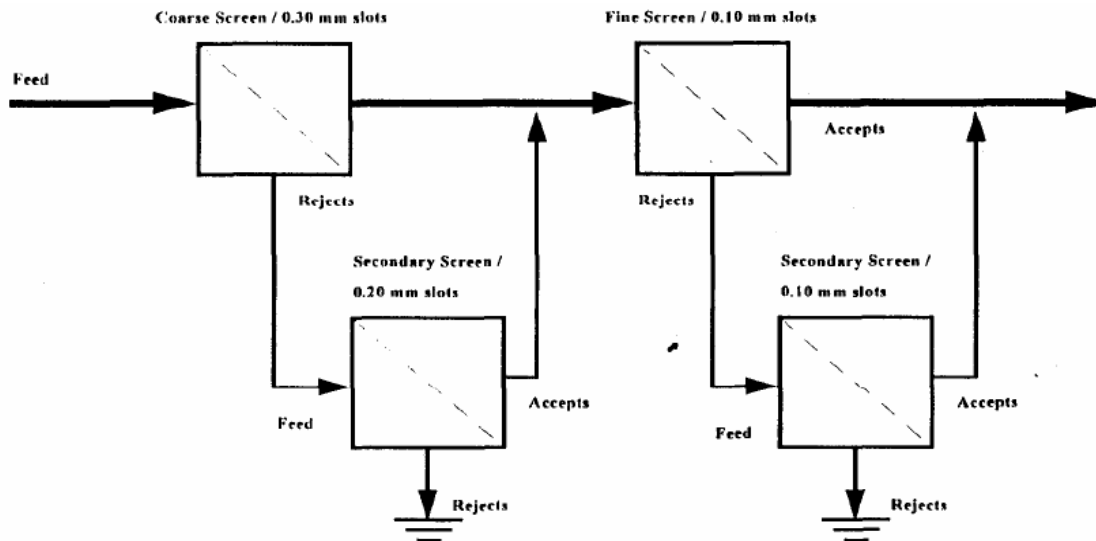


Fuente: Tappi Proceedings 2000. Recycling Symposium

El tamiz burdo primario (*coarse screen*) presenta perforaciones de 0,3 mm y el tamiz fino de 0,1 mm. Los rechazos de éstos se llevan a un tamiz secundario de 0,1 mm. Las partículas aceptadas de este flujo van nuevamente a la cadena de los tamices iniciales, logrando el efecto de cascada, como se aprecia en la figura 19.

Ejercicio 2 (septiembre de 1999)

Figura 20. Disposición de proceso de doble tamiz secundario

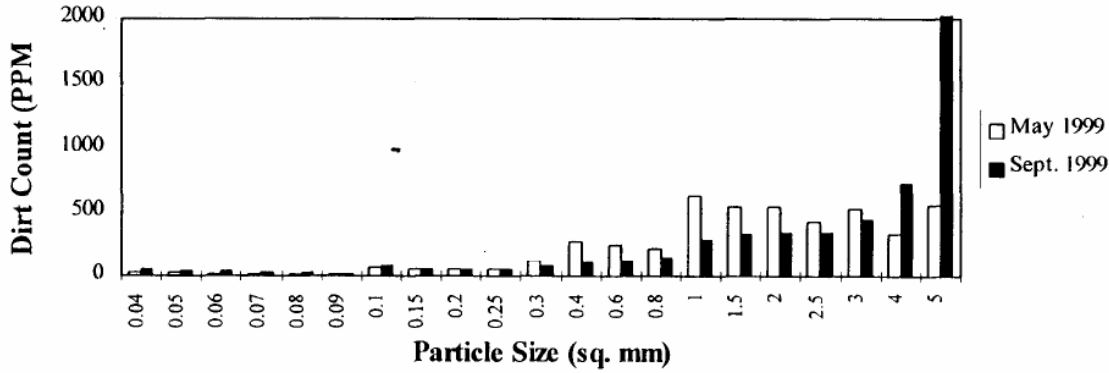


Fuente: Tappi Proceedings 2000. Recycling Symposium

En el ejercicio de septiembre se modifica la configuración, como se aprecia en la figura 20, donde la secuencia del efecto cascada se hace en dos etapas, para lo cual se adiciona un segundo tamiz secundario de 0,1 mm.

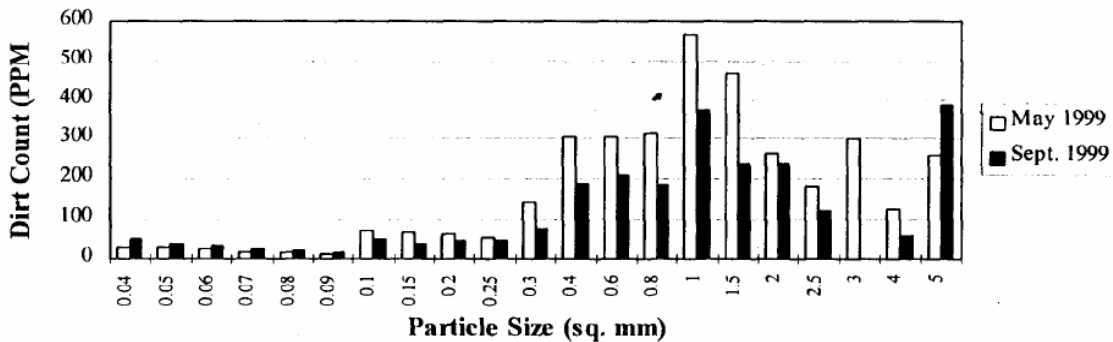
Los resultados de ambos ejercicios en lo referente a conteo de partículas en función de su tamaño se observan en las figuras incluidas a continuación:

Figura 21. Conteo de partículas vs. tamaño de partículas en el pulper
Pulper



Fuente: Tappi Proceedings 2000. Recycling Symposium

Figura 22. Conteo de partículas vs. tamaño de partículas en tamiz burdo (primario)
Coarse Slotted Screen Accepts



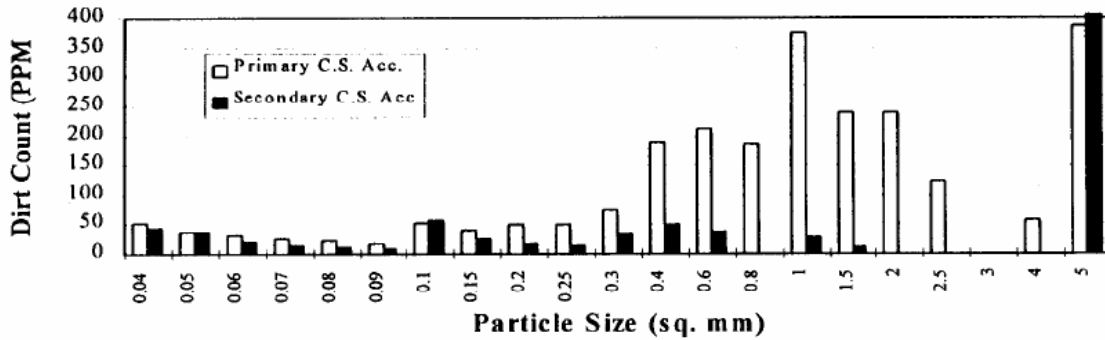
Fuente: Tappi Proceedings 2000. Recycling Symposium

Tabla 2. Resultados del conteo en tamiz burdo (primario)

Primary Coarse Screening Results				
Dirt Count (PPM Tappi Dirt)				
Trial	Pulper	Coarse Screen Inlet	Coarse Screen Act.	% Reduction
May	4253	4734	3356	29.1%
September	2874	3437	2054	40.2%

Fuente: Tappi Proceedings 2000. Recycling Symposium

Figura 23. Conteo de partículas en tamiz burdo en la prueba de septiembre
Coarse Screen Accepts
September 1999



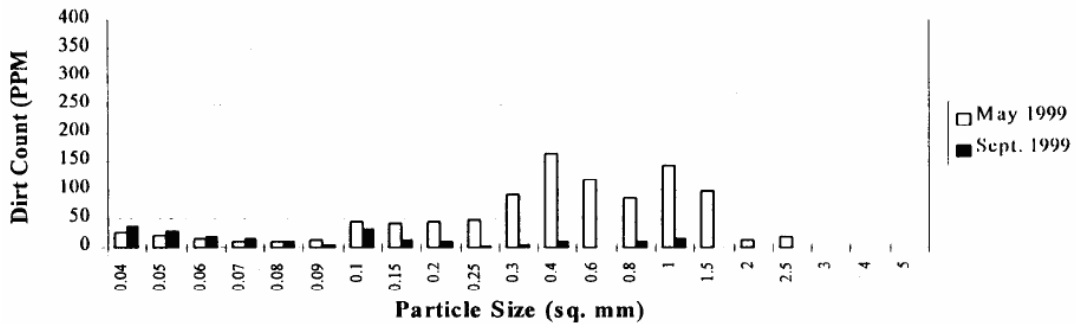
Fuente: Tappi Proceedings 2000. Recycling Symposium

Tabla 3. Resultados del conteo en tamiz fino primario

Primary Fine Screening Results			
Trial	Dirt Count (PPM)		% Reduction
	Fine Screen Inlet	Fine Screen Accepts	
May	3356	1007	70.0%
September	2054	215	89.5%

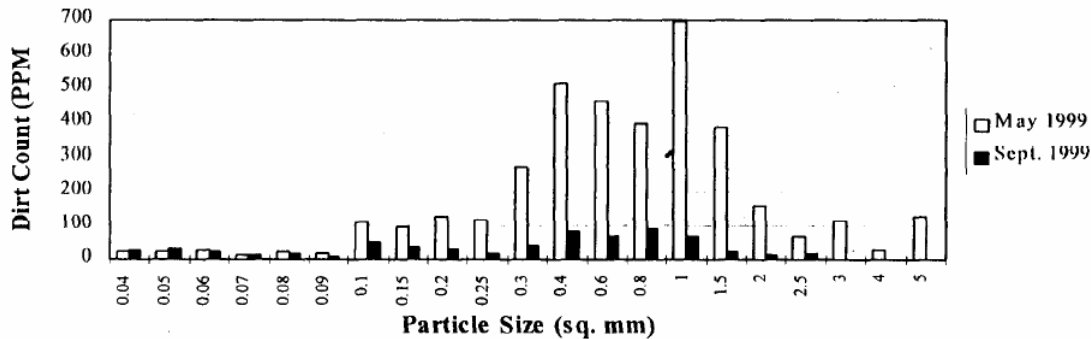
Fuente: Tappi Proceedings 2000. Recycling Symposium

Figura 24. Conteo de partículas en tamiz fino primario
Primary Fine Slotted Screen Accepts



Fuente: Tappi Proceedings 2000. Recycling Symposium

Figura 25. Conteo de partículas en tamiz fino secundario
Secondary Fine Slotted Screen Accepts



Fuente: Tappi Proceedings 2000. Recycling Symposium

Como se puede apreciar en los resultados, la configuración del segundo ejercicio tenía como foco hacer el sistema de tamizado más eficiente en colección de partículas de adhesivos PSA. En general, se observa que los adhesivos se rompen en dos tamaños principales de partículas, los cuales aparentemente permanecen durante las primeras etapas del proceso de reciclaje, tendiendo a alinearse con su dimensión más delgada paralela a la línea de flujo del tamiz. Esto aumenta la posibilidad de que no sean atrapadas en dicha etapa, asumiendo que las perforaciones sean mayores al tamaño de la partícula, lo cual podría explicar la ineficiencia de la malla de 0,3 mm.

Se puede mejorar la eficiencia del tamizado mediante la variación (aumento) de la rata de rechazo de masa (Rw). Para el caso del ejercicio, en mayo el Rw fue de 11,7% frente a un Rw de 14,8% en septiembre.

Esta propuesta requiere balancear correctamente las masas en función del efecto cascada (mayor flujo al tamiz primario) y el nivel de rechazo que se puede obtener hacia el tamiz secundario.

3.4 Efecto de aditivos del tipo *amphiphilic* en el comportamiento de los adhesivos base acrílico sensibles a la presión durante el proceso de reciclaje del papel

Esta propuesta desarrollada por Jihui Guo y Steven J. Severtson (Department of Bioproducts and Biosystems Engineering, University of Minnesota), Larry E. Gwin (Franklin International) y Carl J. Houtman (USDA Forest Products Laboratory) (2008) pretende demostrar que vía reformulación de adhesivos acrílicos se puede obtener un beneficio significativo durante la remoción de *stickies* en las etapas iniciales del proceso de reciclaje.

Los adhesivos acrílicos son complejos y luego de la emulsión/polimerización pueden ser modificados con dispersiones *tackificantes*, agentes humectantes, modificadores de reología y un sinnúmero de otros aditivos que permiten lograr una gran variedad de especificaciones de producto.

La fragmentación de los adhesivos PSA acrílicos base agua durante el proceso de repulpado es altamente dependiente de la composición monomérica del elastómero base. Este ejercicio científico pretende demostrar que la resistencia de la película de adhesivos PSA saturados de agua determina la fragmentación de éstos durante el proceso de repulpado y su separabilidad en la etapa de tamizado. Se presenta

información de cómo los aditivos *amphiphilicos* que incluyen emulsificantes empleados durante el proceso de síntesis, al igual que los agentes humectantes empleados como ayuda durante el proceso de recubrimiento y los surfactantes empleados en dispersiones *tackificantes*, cambian la estructura del *film* de PSA, sus propiedades mecánicas y morfología, una vez fragmentados.

Resultados de mayor relevancia:

Tabla 4. Efecto del agente humectante sobre la energía superficial, los componentes de la energía superficial, el trabajo de autoadhesión en agua y eficiencia de remoción (RE) a 50 °C.

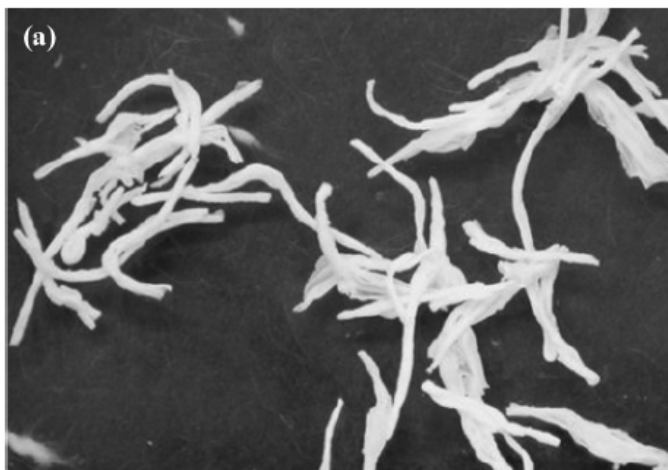
PSA	wetting agent (%)	surface energy (mJ/m ²)	polar component (mJ/m ²)	dispersive component (mJ/m ²)	work of adhesion (mJ/m ²)	RE (%)
PSA1	0	30.4	0.1	30.3	94.6	90
	0.87	30.9	0.0	30.9	103.6	89
	1.75	37.1	7.7	29.4	39.3	83
	3.50	63.3	32.1	31.2	6.0	74
	5.25	64.4	30.7	33.7	7.7	72
PSA2	0	23.2	0.2	23.0	89.7	75
	0.87	26.3	0.1	26.2	93.6	62
	1.75	34.1	7.6	26.5	38.9	47
	3.50	58.6	30.7	27.9	5.9	23
	5.25	59.8	31.7	28.1	5.4	18
PSA3	0	25.1	0.3	24.8	87.1	2
	0.87	24.6	0.1	24.5	93.3	5
	1.75	25.1	0.0	25.1	96.6	10
	3.50	34.2	7.9	26.3	37.9	2
	5.25	57.6	30.5	27.1	5.8	0

Fuente: Industrial & Engineering Chemistry Research Journal

Se aprecia cómo el surfactante retenido en la película de adhesivo seco eleva sustancialmente los componentes polares de su energía superficial cuando es colocado en agua, lo cual reduce la eficiencia de remoción en tamizado.

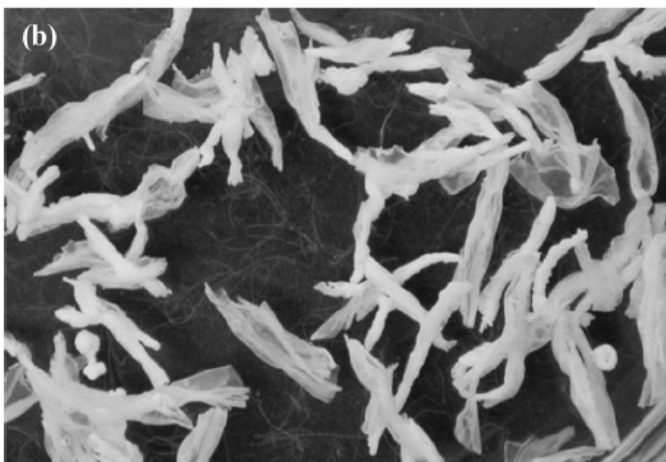
Las siguientes figuras muestran la morfología de partículas de adhesivos luego del proceso de repulpado:

Figura 26. Partículas de adhesivos luego del proceso de repulpado sin agente humectante adicional



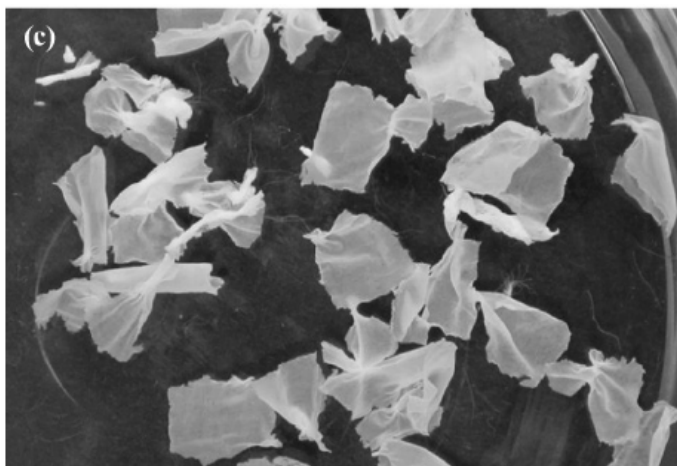
Fuente: Industrial & Engineering Chemistry Research Journal

Figura 27. Partículas de adhesivos luego del proceso de repulpado con 1,75% de agente humectante



Fuente: Industrial & Engineering Chemistry Research Journal

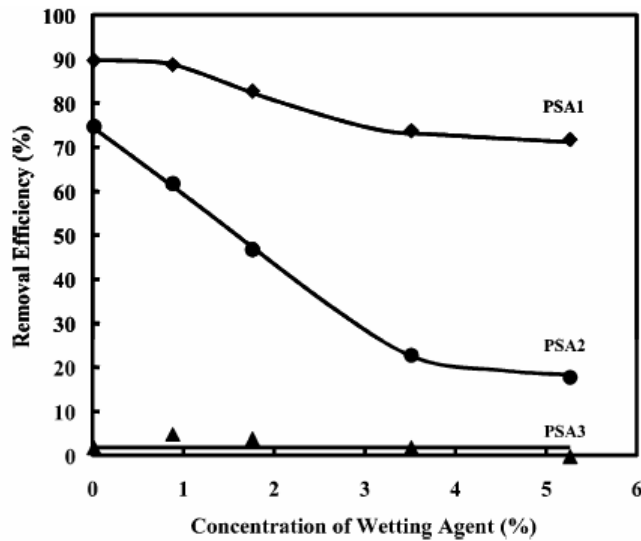
Figura 28. Partículas de adhesivos luego del proceso de repulpado con 5,75% de agente humectante



Fuente: Industrial & Engineering Chemistry Research Journal

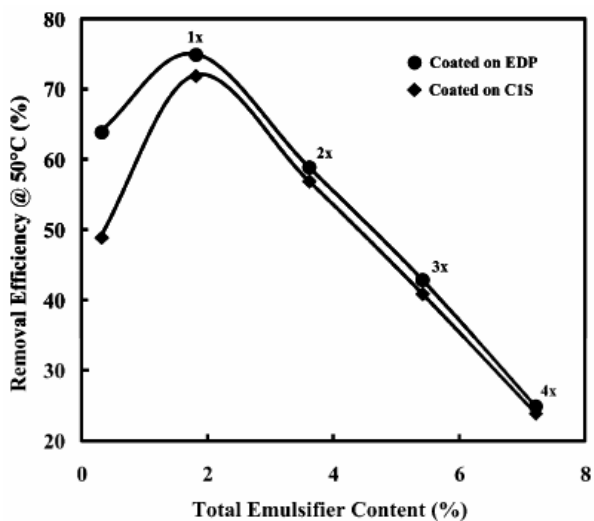
En las imágenes se aprecia cómo los adhesivos toman una estructura más abierta y, aunque menos obvio, un tamaño menor cuando se incrementa la concentración de agente humectante. Esto es consistente con la menor adhesión esperada entre superficies de PSA. Asimismo, la menor eficiencia de remoción en tamizado es consistente con la premisa según la cual a mayor área superficial de la película de adhesivo, mayor será la fragmentación de ésta durante el repulpado.

Figura 29. Eficiencia de remoción a 50 °C en función de la concentración del agente humectante



Fuente: Industrial & Engineering Chemistry Research Journal

Figura 30. Eficiencia de remoción en función de la concentración del agente emulsificante relativo a dos tipos de papel *facestock*



Fuente: Industrial & Engineering Chemistry Research Journal

Las dispersiones *tackificantes* son usadas en adhesivos PSA para incrementar el *tack*, y la variación en la concentración de éstas tiene un

efecto directo en la efectividad de remoción en la etapa de tamizado. En la tabla 5 se aprecia el efecto de esta variación en un rango de 0 a 30%. Se evidencia que el *tackificante* reduce la resistencia del *film* de PSA.

Tabla 5. Efecto de la dispersión *tackificante* en valor de *loop tack*, temperatura de transición vítrea, resistencia a la tensión de humectación, autoadhesión en agua y eficiencias de remoción en tamizado (RE) a 50 °C

PSA	tackifier dispersion (%)	tack (lbs)	T_g (°C)	wet tensile strength (N)	work of adhesion (mJ/m ²)	RE (%)
PSA1	0	2.00	-10.5	0.39	96.8	90
	5	2.46	-9.4	0.40	99.6	91
	10	2.79	-5.9	0.43	100.6	91
	15	2.85	-2.1	0.45	98.8	89
	20	3.11	-1.3	0.46	93.8	88
	30	2.96	-2.1	0.48	45.6	85
PSA2	0	1.70	-22.3	0.21	90.0	75
	5	1.96	-21.1	0.23	95.2	71
	10	2.84	-18.7	0.25	89.2	66
	15	2.75	-16.2	0.28	87.0	60
	20	3.33	-12.1	0.31	84.4	56
	30	3.62	-6.5	0.35	45.4	52

Fuente: Industrial & Engineering Chemistry Research Journal

Tabla 6. Propiedades mecánicas y superficiales de tres *facestocks* y la eficiencia de remoción de los tres adhesivos del estudio, laminados sobre éstas

facestock	basis weight (g/m ²)	tensile loss (%)		surface energy (mJ/m ²)	RE at 50 °C (%)		
		machine direction	cross direction		PSA1	PSA2	PSA3
untreated paper	60	98 ± 4		71.1	94	79	10
EDP	77	96 ± 4	96 ± 3	39.7	90	75	2
C1S	77	94 ± 4	94 ± 4	39.7	90	71	4

Fuente: Industrial & Engineering Chemistry Research Journal

Esta investigación propone dirigir la atención de los fabricantes de PSA hacia los aditivos empleados ya que éstos tienen un efecto directo en la eficiencia de remoción en la etapa de tamizado. Queda demostrado que los surfactantes (por ejemplo los emulsificantes y agentes humectantes) presentes en formulaciones acrílicas base agua tienen impacto en la morfología de la película adhesiva durante el repulpado. El aumento en concentración de estas especies *amphiphilicas* produce una sustancial reducción en la eficiencia de remoción de acuerdo con la resistencia en húmedo presente en cada adhesivo PSA.

3.5 Remoción de *stickies* empleando un medio enzimático neutro en el tamizado a presión del proceso de repulpado

Los autores Marguerite Sykes, John Klungness, Roland Gleisner y Said Abubakr (1998), pertenecientes al Departamento de Agricultura de Estados Unidos, adscritos a la división de servicios forestales del Laboratorio de Productos Forestales, desarrollaron esta propuesta, en la cual se empleó una mezcla de 50% de papel de fotocopia sin imprimir y 50% de desperdicio típico de oficina, papel impreso con impresora láser y material impreso por *offset*. Al material limpio de copia se le adicionaron *stickers* típicos de oficina, logrando un 5% del peso de la mezcla en adhesivo seco.

Se prepararon enzimas empleando Novazym 342 y Resinase A 2X, suministradas por Novo Nordisk Biochem de Norteamérica, con una concentración de 0,05% de cada una en pulpa (OD). Un total de 0,1% de surfactante no iónico BRD 2340 de Buckham Laboratorios se adicionó

durante cada prueba. Debido a la sinergia del surfactante con las enzimas se aplicó éste en dos pasos, X% en el *pulper* y Y% en la etapa de flotación. El surfactante se adicionó completo en la celda de flotación en la primera corrida y entre el *pulper* y la celda de flotación en las corridas dos y tres.

En la corrida número 1 se empleó soda cáustica para lograr mantener el ph en 10, lo que hace que la prueba se desarrolle en medio alcalino. La corrida dos se desarrolló a ph neutral con la adición de enzimas (0,05% de cada una de las arriba citadas) y 0,05% de surfactante no iónico. La corrida tres es equivalente a la dos, excluyendo las enzimas.

Resultados:

Tabla 7. Medición de contaminantes en cinco etapas del proceso de remoción de *stickies*

Point in process	Run 1 (ppm)	Run 2 (ppm)	Run 3 (ppm)
Pulper	1,781	4,026	3,115
After 0.30-mm screen	4,355	1,540	1,590
After 0.15-mm screen	3,178	660	1,245
Flotation	460	203	91
Washing	377	13	73

Fuente: Tappi Proceedings 1998. Recycling Symposium

Tabla 8. Tamaño de partícula promedio hasta 0,02 mm² y mayor a 4 mm²

Mean average particle size (mm ²)			Residual particles (ppm)					
			<0.02 mm ²			>4.0 mm ²		
Run 1	Run 2	Run 3	Run1	Run2	Run3	Run1	Run2	Run 3
0.07	0.19	0.13	1,095	650	738	0	0	32
0.08	0.14	0.11	1,811	300	391	586	0	0
0.06	0.09	0.08	1,689	208	425	439	0	580
0.12	0.10	0.11	112	55	18	460	0	0
0.08	0.05	0.08	146	14	38	377	0	0

Fuente: Tappi Proceedings 1998. Recycling Symposium

Tabla 9. Micro-stickies medidos por adsorción en polyfoam desde el agua de proceso luego de los tamices de 0,3 y 0,15 mm

Sample	Microstickies	
	In process water (mg/30 g pulp)	On handsheets ^a (ppm)
0.30-mm screen		
Run 1	3.6	1,811
Run 2	2.9	300
Run 3	5.6	391
0.15-mm screen		
Run 1	4.7	1,689
Run 2	1.7	208
Run 3	3.3	425

Fuente: Tappi Proceedings 1998. Recycling Symposium

Se aprecia claramente en la tabla 8 que la corrida 2 (ph neutro con adición enzimática) arrojó los mayores números de remoción de partículas en cuatro de las cinco etapas del proceso evaluadas, lo cual se debe principalmente al tamaño de partícula obtenido, como se aprecia en la tabla 9. La etapa de flotación fue menos efectiva en la corrida 3, presumiblemente por el tamaño de partícula, la cual es ligeramente mayor que las de las corridas 1 y 3 en dicha etapa. La fase que cabe resaltar de la corrida 2 es la de lavado, en la que la diferencia en

conteo, de 25 y 5,6 veces frente a las corridas 1 y 3 respectivamente, es atribuible también al menor tamaño de partícula en este caso.

Las diferencias tan significativas de la corrida 1 frente a las otras hacen pensar que el medio alcalino incrementa la tactosidad de los *stickies* y parcialmente solubiliza algunos de ellos, terminando éstos en el agua residual del proceso. De igual manera, los *stickies* en estado "plástico" pueden ser extruidos a través de las perforaciones del tamiz de 0,3 mm.

Se confirma que el tamizado es el proceso más importante para la remoción de *stickies*, logrando un 88% de eficiencia en la corrida 2 y 65% en la 3. El desgaste "suave" en el *pulper* a ph neutro mantuvo las partículas contaminantes de mayor tamaño y menos elásticas que en el medio alcalino, facilitando así su remoción por medio de los tamices.

Por último, la presencia de micro-*stickies* residuales en el agua de proceso fue menor en la corrida 2, como se aprecia en la tabla 9, lo cual es igualmente importante ya que éstos pueden tender a reaglomerarse en etapas posteriores del proceso de reciclado, como el destintado o la fabricación del papel, en presencia de una alteración del ph o de la temperatura.

Se recomienda entonces el proceso de repulpado en ambiente neutro como alternativa eficaz para la remoción de *stickies*.

3.6 El efecto de los materiales de *liner* en los contaminantes de adhesivo y en el reciclaje del papel

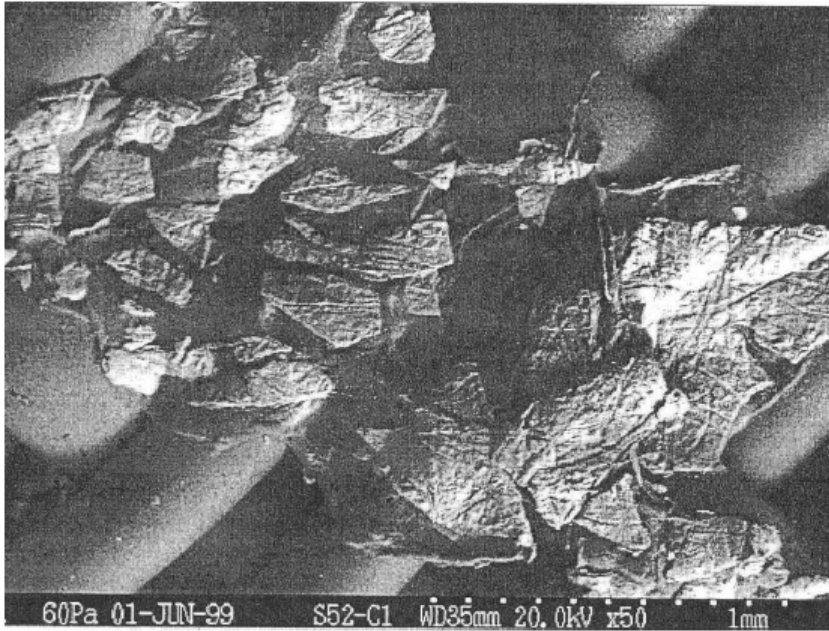
En general los papeles de respaldo (*liners*) no son reciclables con la tecnología estándar de reciclaje del papel. Éstos están presentes tanto en el desecho post como en el preconsumo (en mucha mayor proporción en este último). La propuesta científica reseñada pretende demostrar que dichos papeles tienen un efecto negativo en la remoción de *stickies* en el proceso de repulpado, y que debe analizarse el hecho de su presencia en los molinos cuya tecnología no revista el nivel adecuado para separar estos contaminantes.

Los investigadores Said Abubakr y David Bormett (1998) pertenecientes al Departamento de Agricultura de Estados Unidos, USDA, adscritos a la división de servicios forestales del Laboratorio de Productos Forestales, presentan una prueba piloto desarrollada por un equipo multidisciplinario en el que estuvieron, además de su laboratorio, el Servicio Postal de Estados Unidos, Springborn Testing and Research, además de fabricantes de papeles, empresas de reciclaje, empresas de recolección de papel, fabricantes de maquinaria y proveedores de adhesivos y suministros químicos.

Los materiales empleados fueron adhesivo PSA y *liner* (muestra n.º 34252) suministrados por Forest Product Laboratory sin revelar composiciones. Adhesivo acrílico de composición conocida fue suministrado por Avery Dennison Inc. como parte del proyecto de obtención de un adhesivo sensible a la presión benigno con el medio ambiente. Este adhesivo se suministró en medio de dos *liners*, es decir, sin presencia de cara de impresión o *facestock*.

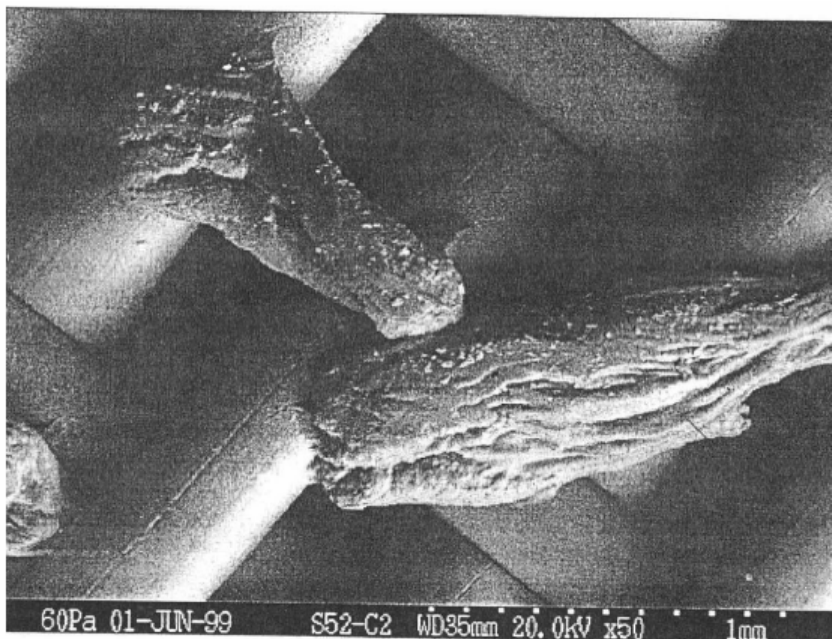
Los resultados más relevantes de ejercicio se describen a continuación:

Figura 31. Adhesivo repulpado en presencia de *liner*



Fuente: Tappi Proceedings 2000. Recycling Symposium

Figura 32. Adhesivo repulpado sin presencia de *liner*



Fuente: Tappi Proceedings 2000. Recycling Symposium

Las figuras 31 y 32 muestran el adhesivo n.º 34252. En la primera se observa cómo el *liner* se pega a la superficie del adhesivo, mostrándose más bidimensional que la del adhesivo sin presencia de *liner* (figura 32). Estas últimas se muestran más enrolladas y tridimensionales. Se sugiere que las partículas de *liner* cubren el adhesivo, haciéndolo menos "tackto" y más extendido (figura 31), estado en el cual tienden a sufrir más rompimientos hacia tamaños cada vez menores. Las partículas que se aprecian dobladas sobre sí mismas son menos susceptibles a roturas posteriores.

Tabla 10. Análisis de muestras presecadas del modelo postconsumo

Sample	Handsheets		
	# of specks	Avg. size mm ²	Median. size m ²
2.5% Adhesive #34252 97.5% Copy Paper	416 437 Avg = 425	1.28 1.36 Avg = 1.32	0.87 0.99 Avg = 0.93
2.5% Adhesive #34252 10% Release Liner #34252 87.5% Copy Paper	472 515 Avg = 494	1.05 1.00 Avg = 1.02	0.60 0.51 Avg = 0.56
2.5% Avery Denison Adhesive 97.5% Copy Paper	227	1.32	0.09
2.5% Avery Denison Adhesive 10% Release Liner #34252 87.5% Copy Paper	293	1.17	0.08
2.5% Adhesive #34252 10% Release Liner #34252 87.5% Copy Paper *Handsheets containing release liner dyed	1,557 1,662 Avg = 1,610	0.62 0.52 Avg = 0.57	0.17 0.13 Avg = 0.15

Fuente: Tappi Proceedings 2000. Recycling Symposium

Se aprecia que para ambos adhesivos el conteo de contaminantes (*stickies*) es mayor en presencia de *liner*.

Se concluye que la presencia de *liner* en el proceso de repulpado afecta negativamente la remoción de *stickies* en etapas tempranas del proceso de reclinado como el tamizado. Inclusive, es difícil su remoción en procesos posteriores como flotación y centrifugado. Se debe evaluar la cantidad máxima de *liner* presente en el *pulper* en tanto no haya un *liner* con características y comportamiento diferentes.

3.7 El rol de las propiedades del papel de cara de impresión (*facestock*) en la determinación de la eficiencia de remoción de adhesivos sensibles a la presión de las operaciones de reciclado

A partir del *abstract* de este artículo (Guo, Severtson, Kroll, 2004) se determina que hay menor eficiencia de remoción de *stickies* cuando el adhesivo *hot melt* (base caucho) se encuentra adherido a papel de *facestock* comercial que cuando lo está a papeles no tratados. Estas diferencias aparecen en las temperaturas de la región donde las formulaciones termoplásticas son maximizadas (cerca de la temperatura de falla por cizallamiento [SAFTs]). Se deduce que la destrucción de la película de PSA es inhibida por la presencia de fibras residuales del *facestock*, resultando en mayor esfuerzo sobre éstas y fragmentación en el *pulper*.

Se realizan validaciones con poliamida epíclorohidrin y alkenyl ketene dimer, arrojando comportamientos diferentes en presencia de saturación de agua. Una mayor pérdida de resistencia tensil se traduce en menor eficiencia de remoción.

Si bien no se aporta mucha información en el presente artículo, se concluye que hay una responsabilidad directa de los papeles de *facestock* en la eficiencia de remoción de *stickies* en el tamizado.

3.8 Proceso de remoción de contaminantes de la pulpa de papel usando una composición para destintado que comprende adhesivos sensibles a la presión

Esta patente adjudicada a William F. Scholz como inventor y asignada a Avery Dennison Corporation (1999), habla de la creación o preparación de una mezcla definida de adhesivos base caucho y *tackificantes* basados en estireno-isopreno-estireno y estireno-butadieno, de manera que se adicione al proceso de reciclado en las etapas de repulpado o destintado con el fin de que actúe como agente limpiador de partículas extrañas presentes en la pasta, como *stickies*, tintas, metales, entre otros. Se prefiere incluso que sean formulaciones de adhesivo PSA con los componentes antes citados, pero al menos con un *tackificante* a base de hidrocarburo, y al menos otro a base de resina.

Esta mezcla es cohesivamente fuerte y permanece en la pasta dada su baja tendencia a dispersarse en pequeñas partículas durante los esfuerzos cizallantes del repulpado, al igual que no se deforma con facilidad y no tiene tendencia a pasar por los tamices. Las partículas de contaminantes se adhieren en cantidad a las superficies externas de los glóbulos de la mezcla de caucho *tackificado*, haciendo posible su remoción en el tamizado.

Esta nueva composición puede ser empleada en cualquier presentación, bien sea como desperdicio de etiquetas y cintas, como aditivo líquido o sólido, como solución orgánica base solvente o, finalmente, como dispersión acuosa o emulsión.

3.9 Remoción de PSA vía lavado en solvente de especificación no publicada

Esta propuesta se basa en un experimento realizado por Natalia A. Alzate y Mónica A. Borda, en su momento estudiantes de Ingeniería de Procesos de la Universidad EAFIT, con material de descolille proveniente de la industria flexográfica, el cual fue procesado (repulpado) a escala de laboratorio en presencia de un solvente de características no publicadas, a una concentración del 4,2%. Los resultados son concluyentes en materia de remoción de *stickies*, con una diferencia frente a los demás citados anteriormente, en el porcentaje presente de adhesivo. Los ejercicios anteriores variaban en el contenido de adhesivo del 1 al 5%, en tanto aquí se trató material con cerca del 25%.

Para mitigar el alto costo del solvente se complementa el proceso con recuperación parcial del mismo vía destilación. Se observan variables diferentes frente a los ejercicios anteriores como son el tiempo de remojo (de 6 a 24 horas), no requerido en las demás propuestas, y el tiempo de repulpado (de 4 minutos, cuando en las demás nunca fue inferior a 20 minutos).

Si bien no se conoce la práctica de este ejercicio a escala industrial, se presenta como alternativa válida de remoción de *stickies* en el proceso de reciclado artesanal de papel.

CONCLUSIONES

En general las alternativas encontradas propenden por la eliminación de *stickies* en etapas tempranas del proceso, sin embargo hay planteamientos que desde lo macro serían un aporte sustancial a la reciclabilidad de los papeles con adhesivo PSA, como son aquellas que sientan bases para reformular los adhesivos en pos de un adhesivo benigno con el medio ambiente, o las que propenden por un cambio en los *facestocks*; pero en términos prácticos de viabilidad y aplicabilidad están lejos del área de influencia de la industria local, al menos en lo que a su masificación se refiere. Llegará el día en que solo se fabriquen adhesivos y *facestocks* altamente reciclables.

Las opciones que están asociadas a modificaciones del proceso mismo de reciclado, por ejemplo el uso de los *stickies* como medio de ayuda en procesos como el destintado, de la cual hay patente vigente, son aplicables en grandes compañías repulpadoras, las cuales por escala de inversión y dado que aún hay disponibilidad de fibra libre de adhesivo en el mercado, hasta la fecha, no emprenden tales proyectos.

Las opciones más aplicables son la remoción de *stickies* empleando un medio enzimático neutro y la del empleo de solvente para lavado del adhesivo PSA presente en el papel. Ambas presentan pros y contras, pero hasta el momento la primera presenta incertidumbres en varios aspectos, entre ellos, el impacto que pueda tener el solvente remanente en la fibra sobre el ph del proceso industrial. Por eso, se considera que la remoción enzimática es la que se presenta más afín a un proceso

convencional de repulpado, sin necesidad de sistemas de destilación para recuperación de solvente.

La propuesta, en términos prácticos, se perfila como una iniciativa de emprendimiento, ya que el medio neutro sería una variable que se sale del estándar alcalino de los procesos tradicionales de reciclaje. Un proceso a menor escala que el de una gran compañía papelera puede ofrecer alternativas de experimentación y "customización" de acuerdo al nivel de *stickies* presentes en el material que se procese en su momento. Se propone entonces explorar como opción de emprendimiento esta alternativa técnica y comercializar pulpa procesada a partir de materiales de empresas productoras de papeles adhesivos y de sus clientes.

BIBLIOGRAFÍA

ABUBAKR, Said, *Lessons learned from the process of developing and evaluating the new generation pressure sensitive adhesives*. En: TAPPI PROCEEDINGS 2000. RECYCLING SYMPOSIUM (Marzo 2000, Washington D.C.) 317 p.

_____, BORMETT, David, *Pilot testing and recycling evaluation of newly developed environmentally benign pressure sensitive adhesives*. En: TAPPI PROCEEDINGS. RECYCLING SYMPOSIUM (1998, New Orleans), Atlanta: 1998.

ACS PUBLICATIONS. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. En: <http://pubs.acs.org>.

ALZATE PEÑA, Natalia, BORDA TOVAR, Mónica, *Elaboración de un material a partir de un residuo sólido no reciclable de una empresa de artes gráficas*. Medellín, 2006, 130 p. Trabajo de grado (Ingeniero de Procesos). Universidad Eafit. Escuela de Ingeniería.

AVERY DENNISON CORPORATION, *Process for removing contaminants from paper pulp using a deinking composition comprising pressure sensitive adhesive*. Scholz, W. (inventor). 162/5162/5 United States Patent 5985095, Nov. 16, 1999.

BARR, Christopher, COSSALTER, Christian, *How Cost Competitive is Wood Pulp Production in South China?* Center for International Forestry Research (CIFOR). (Septiembre 20-21, 2006, Beijing) 30 p.

BORMETT, David, *et al.*, *Compatibility of pressure sensitive adhesives with recycling unit operations*. En: AICHE Symposium Series. New York 1999 ; Vol. 95 no. 322.

CONFEDERATION OF EUROPEAN PAPER INDUSTRIES. *Estadísticas*, Sitio web, en: <http://www.cepi.org>.

CROSSLEY, Bruce, *et al.*, *A pilot plant study of the recyclability of pressure sensitive adhesives (PSA)*. En: TAPPI PROCEEDINGS. RECYCLING SYMPOSIUM (2000, Washington D.C.) 2000.

FOEX INDEXES LTD. *Pulp, paper and recovered paper indexes*. En: <http://www.foex.fi>.

GUO, Jihui, *et al.*, *Effect of Amphiphilic Additives on the behavior of water based acrylic pressure sensitive adhesives during paper recycling*. En: Industrial & Engineering Chemistry Research Journal. Marzo, 2008; Vol. 47

_____, SEVERTSON, Steven, KROLL, Mark, *Role of Paper Face stock properties in determining removal efficiencies of pressure-sensitive adhesive film from recycling operations*. En: Industrial &

Engineering Chemistry Research Journal. Marzo, 2004; Vol. 43, no. 1

HOUTMAN, Carl, et al., *Controlling adhesive behavior during recycling*. En: 7th RESEARCH FORUM ON RECYCLING (7^o: 2004: Quebec). Quebec: Pulp and Paper Technical Association of Canada, 2004.

KATZ, Steve, *Recycling compatible adhesives: commercially available, RCAs allow converters to become greener while helping the paper recycling industry*. En: Label & Narrow, 2009, en: www.thefreelibrary.com

RISI FOREST PRODUCTS INDUSTRY INFORMATION. *Pulp and paper industry forecasting*. En: <http://www.risiinfo.com>.

SMURFITKAPPA, CARTON DE COLOMBIA. Preguntas más frecuentes. Sitio de Internet disponible en: <http://smurfitkappa.com.co>

SYKES, Marguerite, et al., *Stickie removal using neutral enzymatic repulping and pressure screening*. En: TAPPI PROCEEDINGS. RECYCLING SYMPOSIUM (1998: New Orleans), Atlanta: 1998.

TAPPI. *Progress in paper Recycling*. En: TAPPI JOURNALS. Sitio de Internet disponible en: <http://www.tappi.org>.

VENDITTI, Richard, et al., *The effect of release liner materials on adhesive contaminants and recycled paper properties*. En: TAPPI

PROCEEDINGS. RECYCLING SYMPOSIUM (2000: Washington D.C.)
2000.

ZHAO, Yulin, YAN, Zhao, DENG, Yulin, *PSA properties and screenability
in paper recycling*. En: TAPPI JOURNAL, Agosto, 2005; Vol. 4 (8).