



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

DESTINTADO DE PAPEL MEDIANTE FLOTACION EN COLUMNA

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO QUIMICO METALURGICO

P R E S E N T A :

OSCAR JAVIER QUINTANAR FIGUEROA

ASESOR: JORGE ORNELAS TABARES, MAESTRO EN CIENCIAS



MEXICO



2000

EXAMENES PROFESIONALES FACULTAD DE QUIMICA



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

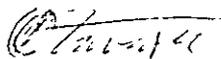
El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Jurado asignado

Presidente	Prof. Jorge Ornelas Tabares
Vocal	Prof. Antonio Huerta Cerdán
Secretaria	Prof. Rosa Elva Rivera Santillán
1er Suplente	Prof. Faustino Juárez Sánchez
2º Suplente	Prof. Juan Carlos Báez Crespo

Sitio donde se desarrolló el tema: Facultad de Ingeniería.
Ciudad Universitaria, U.N.A.M

Asesor



Maestro en Ciencias Jorge Ornelas Tabares

Sustentante



Oscar Javier Quintanar Figueroa

Este trabajo está dedicado

A mis padres... Ángel y Esperanza

A mis hermanas... Alejandra y Raquel

A mis amigos... uhhh TODOS!!!

A mis profesores...en especial a Jorge Ornelas, Bernardo

Hernández y Joan Genescá.

A mi Dios...

ÍNDICE	PÁGINA
Introducción	7
Objetivo	9
Metas	9
Metodología	9
Justificación	10
Capítulo 1. El papel y el proceso de destintado	12
A) La fabricación del papel	12
B) El papel reciclado	15
C) Las partículas de tinta	17
D) Destintado por lavado y destinado por flotación	19
D.1 El lavado	20
D.2 La flotación	21
Capítulo 2. Principios de flotación	26
A) Breve historia de la flotación	26
B) Descripción del proceso	27
B.1 Tipos de flotación	27
C) Teoría de la flotación	28
C.1 Mojabilidad	28
C.2 Tensión superficial	29
C.3 Adsorción	31
D) La flotación de minerales y de tintas	31
E) El microproceso de la flotación	32
E.1 Los cuatro pasos de la flotación	34
a) Captura de la partícula	34
b) Atrapamiento por deslizamiento	36

c) Contacto en la triple fase	38
d) Estabilidad	39
F) Las variables más importantes en la flotación	40
F.1 Consistencia	40
F.2 Flujo de aire	42
F.3 Tiempo de flotación	42
F.4 El pH	43
F.5 Los reactivos destintantes	44
G) Diferentes tipos de agentes de flotación y su caracterización	46
Capítulo 3. Equipos de flotación	48
A)Requerimiento de la celda de flotación	48
B) Tipos de celda	49
C) Celdas de agitación mecánica	49
D) Celdas de sub-aereación	50
E) Celdas de agitación neumática	50
E.1 Celda Bahr	52
E.2 La columna de flotación	53
F) Parámetros que afectan la columna de flotación	54
F.1 Longitud de la columna	55
F.2 Profundidad de la espuma	55
F.3 Adición del agua de lavado	55
Capítulo 4. Desarrollo experimental	58
Experimentación	58
A) Experimentación en celda	58
A.1 Consistencia de pulpeo	60
A.2 Tiempo de pulpeo	60
A.3 Consistencia de flotación	61
A.4 Temperatura	61
A.5 pH	62

A 6 Agitación	62
A 7 Tiempo de flotacion	63
A 8 Destintantes	63
B) Experimentación en columna	65
B 1 Descripción de la columna	66
B 2 Pulpeo	69
B 3 Flotación en columna	70
B 4 Lavado	70
B 5 Formación de hojas	71
B 6 Determinación de la blancura	71
B 7 Pérdidas	71
Capítulo 5.Resultados y análisis de resultados	72
A) El flujo de aire	73
B) Consistencia	74
C) Tiempo de flotación	75
D) La influencia del lavado posterior	76
E) Evaluación de pérdidas	77
F) La flotación en columna en comparación con otros procesos de destintado	78
G) Influencia de la consistencia en el lavado posterior	78
H) Otros factores	80
Conclusiones	81
Bibliografía	82
Anexo	84

DESTINTADO DE PAPEL MEDIANTE FLOTACIÓN EN COLUMNA

INTRODUCCIÓN

La importancia del destintado está creciendo debido a que el uso de papel reciclado está aumentando constantemente como la materia prima de la fibra de la industria de papel. Esto es consecuencia de la aplicación de una legislación ambiental más severa y a la creciente demanda de este producto. La demanda del papel destintado ha impulsado desarrollar procesos más eficaces. La tecnología química inició recientemente un programa de investigación sobre el reciclaje en la industria del papel, la cual abarca el desarrollo de las tintas de impresión y la aplicación de la tecnología de separación de partículas por arrastre de burbujas llamado flotación comúnmente utilizado en minería. En los procesos de concentración de minerales, se tiene una larga tradición en la aplicación de tecnología en la flotación mediante la separación de diversas materias primas metalúrgicas en los depósitos minerales y en la industria papelera es cada vez más común utilizar celdas de flotación para el destintado del papel de reutilización.

Las columnas de flotación han desplazado a las celdas mecánicas en ciertas aplicaciones debido a una selectividad superior, menor espacio requerido, menor inversión de capital y de costos del funcionamiento así como de mantenimiento. De este modo, la actividad principal de la investigación se dirige a la aplicación de la flotación del papel en columna probada extensivamente para varios minerales.

La eficacia de la flotación en una columna se conoce a partir de la dependencia de un número de variables físicas y químicas incluyendo: pH, flujo de entrada de la pulpa,

flujo de aire y agua, altura de la columna y los agentes de la flotación (alcalinificantes, colectores, espumantes, etc). A partir de 1996, se iniciaron en países europeos (Noruega, Finlandia y Alemania, principalmente) pruebas de laboratorio para estudiar estos efectos midiendo parámetros importantes como el brillo del papel y el contenido de ceniza. Los resultados obtenidos usando la columna de la flotación se han comparado a los resultados de los experimentos paralelos realizados en celdas convencionales de la flotación en laboratorio y se ha logrado implementar esta tecnología ya en la industria. De esta manera, la aplicación de la flotación en columna para destintar papel por flotación es una alternativa prometedora para aumentar el reciclado del mismo [1].

OBJETIVO

Aplicar la tecnología de flotación en columna para el destintado de papel.

Metas

- Caracterizar el tipo de papel susceptible a destintar por flotación
- Implementar la metodología de la columna de flotación para separar las partículas según su naturaleza
- Realizar las pruebas necesarias de calidad al papel obtenido por este método

Metodología

- Búsqueda y revisión bibliográfica exhaustiva
- Pruebas de orientación en celda
- Experimentación en columna
 - i) Preparación del papel
 - ii) Pruebas experimentales y adaptación del equipo
 - iii) Variación de los parámetros del proceso (consistencia, reactivos de flotación, pH)
 - iv) Variación de parámetros del equipo (altura de columna, flujo de aire, cantidad de H₂O en lavado)
 - v) Evaluación de pérdidas
 - vi) Pruebas de calidad final del papel (blancura)
- Comparación de la flotación en columna con otros procesos de destintado

JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

Recientemente debido a los graves problemas causados por la sobre explotación de los recursos naturales del mundo, es necesario buscar alternativas a los procesos productivos de fabricación de materiales y artículos que provengan de una fuente de materia prima no renovable o renovable a largo plazo.

Este es el caso del papel, donde la materia prima principal proviene de los árboles que contienen la celulosa necesaria para su fabricación. El uso indiscriminado y masivo de este recurso tiene como consecuencia la destrucción de bosques, selvas y zonas arboladas del planeta. Por este motivo es necesario generar procesos costeables para no fabricar papel a partir de árboles, sino de papel usado previamente, el cual, garantice su calidad en el mercado correspondiente

Como dato adicional es conocido que, una tonelada de papel nuevo requiere 5 m³ de madera, lo cual equivale a 50 árboles, mientras que una tonelada de papel de desperdicio reciclado, salva 17 árboles. Por otro lado, se utiliza una cantidad de 20 kilogramos de fibra natural (madera) por 10 kilogramos de papel producido. De esta forma el papel de desperdicio reciclado ayuda a conservar el ambiente, los bosques y ahorra energía. En nuestro país, según cifras de la Cámara Nacional de la Industria del Papel y la Celulosa (CNIPC), México es el segundo país del mundo que tiene una mayor proporción de papel reciclado con el 80% [30], sin embargo el esfuerzo realizado en esta labor, no es suficiente y día a día se pierden cientos de hectáreas de zonas arboladas para satisfacer la demanda de papel de primera calidad.

Entre los diversos procesos con los que se ha reciclado el papel se tienen ya implementados ampliamente los métodos de lavado y flotación, eliminándose ya en este proceso la utilización de cloro como blanqueador, sin embargo es necesario implementar

una mayor tecnología en este proceso, puesto que los costos ambientales siguen siendo elevados.

Se ha estudiado, principalmente en los países europeos desde hace 40 años, la posibilidad de separar estas partículas de tinta considerando los principios de flotación con que se separan a los minerales en la industria. De esta manera el parámetro común en dichos procesos es la capacidad de adhesión de las partículas de tinta a las burbujas (hidrofobicidad) y como factor fundamental el tamaño de la burbuja que las arrastre de manera ascendente. Por lo tanto una nueva posibilidad se vislumbra para obtener papel de buena calidad; con un proceso más limpio y con menor cantidad de agua, que garantiza a su vez, una recuperación mayor del papel destinado al reciclado.

CAPÍTULO 1

EL PAPEL Y EL PROCESO DE DESTINTADO

A) La fabricación de papel

Con el objetivo de entender el proceso de fabricación y reutilización del papel y debido a su gran importancia en los rubros económicos y tecnológicos en el mundo, es necesario describir esta industria.

El papel es una hoja delgada que se constituye de un material hecho con pasta de fibras vegetales obtenidas principalmente de celulosa o fibra sintética; dicha fibra proviene de fuentes naturales o artificiales. La fuente natural más importante es la forestal.

El pulpeo y la delignificación

Para fabricar papel, la madera se transporta a la fábrica de papel en forma de tablones o de astilla, previamente empaquetadas para su protección durante el transporte. La madera se aserra y pica hasta un tamaño de 2 a 3 cm de longitud y posteriormente se calienta con vapor. Se introduce a un reactor y se le agrega un líquido blanco digestor (mezcla de NaOH y Na₂S) el cual se impregna en la astilla y penetra para hacer la labor de rompimiento primario de las fibras de la madera. Este proceso se realiza en un reactor a temperatura de cocimiento donde el licor agregado colecta la lignina. La NaOH reacciona con la lignina en la madera para que ésta se convierta en fibra celulosa. El Na₂S amortigua la reacción y permite la separación de la lignina al incrementar la solubilidad de ésta. Posteriormente se filtra la pulpa para separar partículas no digeridas. Algunos procesos tienen un paso de

oxidación intermedio para eliminar una cantidad mayor de lignina. Esto se debe a que menor contenido de lignina produce una pulpa más blanca. En suma, el líquido blanco y opcionalmente oxígeno son agregados en el "browstock" donde la delignificación se lleva a cabo.

El lavado

El lavado de la pulpa se realiza después del proceso de la delignificación y también es utilizado en cada proceso principal posterior. El propósito del lavado es separar los componentes indeseables de la pulpa. El líquido negro, los finos, la lignina, y subproductos de blanqueado son los principales compuestos que se obtienen de este paso. La eficiencia de lavado puede ser medida por la limpieza de la pulpa y en la cantidad de agua usada para lograr dicho nivel de limpieza. Existe un gran número de lavadores disponibles. Entre los equipos más comunes se encuentran los lavadores al vacío, los de presión y los de difusión.

Refinación

La pulpa pasa través de ranuras en placas giratorias para separar la torta de celulosa en fibra y acondicionarla en tamaño para la fabricación del papel, esencialmente la fibra se corta a una longitud uniforme lo cual reduce su resistencia. Sin embargo, cuando el papel se forma, el tamaño de fibra al cual se cortó en la refinación, permite tener las mejores propiedades de resistencia y de unión entre las fibras que conforman el papel

Blanqueo

El blanqueo es posterior a la refinación y se realiza en varias etapas. El propósito del blanqueo es separar completamente la lignina sin dañar la celulosa y hacer la pasta de celulosa más blanca. En la primera etapa se usa cloro gaseoso, a lo que sigue una etapa de extracción caústica (para eliminar los compuestos solubles en álcalis) y uno o más pasos de hipoclorito. Para obtener pasta con blancura elevada se utiliza ClO_2 en un paso final. Al final de cada paso se realiza un lavado para separar la lignina obtenida del blanqueo.

Laminación

La pulpa es entonces transportada a un equipo laminador. El agua se separa de la hoja con una combinación de vacío, calor, y presión aplicada a través de los rodillos del equipo laminador. El papel terminado se fabrica en distintos tamaños y rolando en largos rollos para procesarlos en otras plantas. El papel algunas veces se recubre con caolín para proveerle de una superficie blanca o incrementar su resistencia en húmedo. Se agregan además adhesivos para aumentar la resistencia, algunos de estos contienen formaldehído, otros contienen amoníaco o alcohol polivinílico (PVA).

Las productoras papeleras requieren una enorme cantidad de agua para separar lignina y tinta así como para blanquear. Se requieren de 16,000 litros (5,000 galones) a 127,000 litros (40,000 galones) de agua para producir una tonelada de pulpa en las papeleras, por lo que se requiere un tratamiento para la reutilización de esta materia prima; también se han desarrollado nuevos equipos para disminuir el consumo de agua y aumentar la eficiencia de la separación de las partículas de tinta como es el caso de la columna de flotación[2-5].

El reciclado

Otro segmento de la industria repulpa el papel reciclado. Este proceso se lleva a cabo adicionando agua, algunos elementos alcalinizantes, surfactantes y calor. La pulpa es entonces refabricada con las mismas condiciones previas a las que se obtuvo, en un proceso primario de fabricación de papel. El destintado de papel es una parte del proceso de reutilización de papel previamente impreso, en donde se libera a la tinta de la pulpa a la cual se encuentra adherida. Para esto es necesario contar con un proceso que sea capaz de promover el efecto de la separación entre estas dos sustancias variando diversos parámetros con el fin de obtener una mayor eficiencia.

Debido a esto, es necesario conocer algunas características principales de los procesos de destintado de papel que en la actualidad imperan en la industria papelera, además de conocer la naturaleza de las partículas de tinta [6].

B) El papel reciclado

El papel reciclado está formado por dos elementos básicos que son: 1) la fibra, como componente principal y 2) materiales innecesarios para la fabricación del mismo. Por tal motivo, estos materiales deben ser separados y eliminados de la pulpa. Es importante considerar que las fibras inorgánicas presentes en diferentes tipos de papel pueden ser consideradas como material de uso o como contaminantes. Esto significa que si la pulpa reciclada está destinada a producir papel de alta calidad deben ser considerados como contaminantes, situación que puede ser diferente para otros tipos de papeles en donde su presencia no ocasione problemas de calidad o fabricación. Los contaminantes presentes en la pulpa tienen que ser separados, con el objetivo de obtener papel de calidad (alta blancura y pocos puntos negros) de la fibra reciclada [7].

Para llevar a cabo esto, se buscan las mayores diferencias de propiedades fisicoquímicas de la fibra y contaminantes. Por lo general cada contaminante es eliminado por una operación unitaria diseñada para esa función. Dichas operaciones unitarias se describen en las Tablas No. 1 y 2.

Tabla No. 1. Propiedades de los contaminantes que hacen posible su eliminación de la fibra de reciclado[7].

Contaminantes	Características para su eliminación
Piedras, grapas, vidrios	Tamaño o densidad
Plástico	Forma o densidad
Ceras, granos de arena, adhesivos	Densidad
Material adhesivo, tintas, cenizas	Propiedades superficiales

Tabla No. 2. Operaciones necesarias para la eliminación de contaminantes en la fibra reciclada[7].

Operaciones unitarias	Características para su eliminación	Modificación que ocurre
Desintegración	Rehidratación	Desfibrado
Depuración	Tamaño, rigidez	Fibra limpia
Limpieza	Densidad	Fibra limpia
Destintado por flotación	Características superficiales	Eliminación de tinta
Destintado por lavado	Tamaño, características superficiales	Eliminación de tintas
Refinación	Tamaño de fibra	Fibrilización
Dispersión	Molienda de suciedad	Dispersión de la pulpa

El papel de desperdicio se clasifica en función de su origen, blancura base (papel de impresión), y facilidad relativa de destintado, ya que papeles con alta blancura base pueden presentar problemas en el destintado, como es el caso de formulaciones con altos contenidos de LASER y fotocopia, ultravioleta o flexográfica. Una característica importante (en cuanto a tipos de papel desperdicio) se refiere a la presencia de papel recubierto. El recubrimiento es normalmente una formulación con base mineral u otros ligantes que se aplican a la superficie del papel para incrementar la impermeabilidad de éstos. La capa limita y en algunos casos evita el contacto directo entre la superficie de las fibras y los componentes de las tintas de impresión [8].

En suma el reciclado de papel es afectado por las sustancias químicas que se ocupan en su fabricación previa, la recolección y los métodos de clasificación del mismo, así como por los tipos de tinta de impresión y la antigüedad del papel de desperdicio.

C) Las partículas de tinta

Las tintas de impresión son suspensiones de pigmentos en un vehículo y contienen, además, otros aditivos para proporcionar características especiales a las tintas. Los aditivos y el pigmento normalmente no influyen en los resultados del destintado de papel de desperdicio. El vehículo es el elemento de control de la destintabilidad del papel, aunque la diferencia es grande para un papel recubierto y sin recubrir.

Algunos componentes de los vehículos de tinta de impresión son aceites minerales, vegetales, resinas alquídicas y acrílicas. Los aceites minerales presentan poca tendencia a la oxidación y son atacados principalmente por acción mecánica y solubilización y emulsificación por la acción de surfactantes. Los aceites vegetales pueden presentar oxidación bajo las condiciones normales del medio ambiente en cierto grado y junto con las resinas alquídicas no son atacados por soluciones alcalinas, por lo que la separación se hace por medios mecánicos. En la Figura No. 1 se muestran los tipos de estructura de tintas comunes. Además, las partículas más comunes para impresión se describen en la Tabla No. 3, donde se observa la existencia de dos tipos de tinta basados en aceite y agua (flexo-grafito) [9].

El espesor de la película de tinta sobre el papel depende de métodos de impresión y varía de 1 a 3 μm en impresiones de offset. Para impresión a color se tienen también las partículas base aceite y en material artificial. La Tabla No. 4 muestra los distintos tipos de estructura en la tinta[10].

Tabla 3. Composición general de las tintas de impresión[10]

Componente de la tinta	Proporción utilizada
Pigmento (grafito)	15-25%
Agentes ligantes (base aceite-agua)	25-40%
Aditivos (ácidos orgánicos, polímeros)	5-10%
Rellenos (recubrimientos y transparencias)	25-35%
Secadores	5-15%

Tabla 4. Tipos de tinta y sus propiedades [10].

Tinta base aceite	Tinta base agua
Hidrofóbica	Hidrofílica
Dificultad para separarse del papel	Facilidad para separarse del papel
Dificultad para separarse del agua de lavado	Facilidad para separarse del agua de lavado
El agua de lavado contamina el ambiente	El agua de lavado no contamina el ambiente
Tamaño de partícula promedio 5- 10 μm	Promedio de tamaño de partícula 1 μm
Usado para impresión en offset y rotograbado	Usado para impresión flexografica
Apropiado para flotación	Apropiado para lavado
Propiedades de superficie heterogéneas	
Baja densidad	

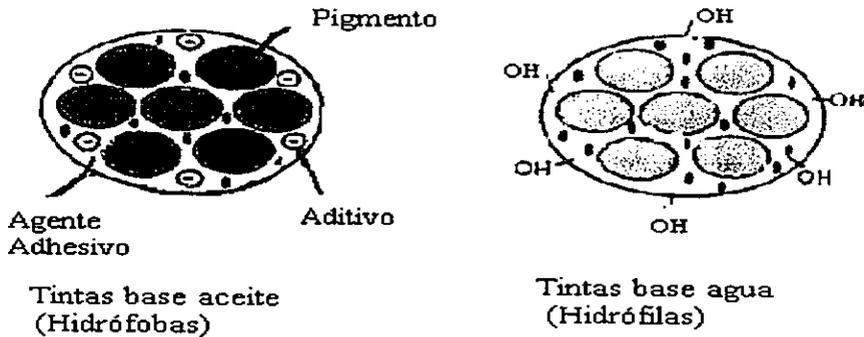


Figura 1. Comparación de las tintas base agua y aceite[10].

También si se considera el espectro de tamaño de partículas de impresión a color basadas en aceite o material artificial para diferentes tipos de impresión que se presenta en la Tabla 5, será posible identificar cuál es el comportamiento de las partículas de tinta en los procesos de limpieza a los que son sometidos cuando se reutiliza el papel.

Tabla 5. Espectro de tamaño de partícula de tinta y sus usos[10]

Base aceite		Base material artificial
5 mμ ←	Espectro de	→ 500 mμ
	partículas	
Offset		Electrostática
Rotograbado		Termográfica
Letterpress		Ultravioleta
Periódicos		Copias
Revistas		Telefax
Magazine		

En el papel periódico reciclado es común la presencia de tintas litográficas, tipográficas y en cada vez mayor volumen las flexográficas, que pudieran contener cualquier tipo de los vehículos y ligantes antes mencionados. La ausencia de una capa de recubrimiento implica el hecho de una unión directa entre vehículo y fibra, y dependiendo del método de secado el vehículo puede penetrar en la estructura de la fibra y/o polimerizarse en la superficie. La baja blancura base del papel prensa limita su uso a formulaciones para la fabricación de papel periódico u otros tipos de papel reciclado de baja calidad y el efecto de amarillamiento es una característica inherente a este tipo de papel, dado su alto contenido de pasta mecánica[14].

D) Destintado por lavado y destintado por flotación

Existen tres tipos de procesos para destintar papel, los cuales en orden de importancia y uso son: la flotación, el lavado y la dispersión, este último prácticamente ya no está en uso.

D.1 El lavado

El lavado de papel es un proceso en el que se considera la separación de partículas de tinta cuyo tamaño es menor a los 5 micrómetros (Fig. 2A), las cuales no son visibles a simple vista. El lavado separa las partículas contaminantes de papel recuperado generalmente en distintos tipos de lavadoras, la más eficiente es la llamada lavador de papel tipo tissue o "tissue machine style washers". El prototipo de este sistema se puede observar en la Fig 2B. Este proceso consiste en que una delgada capa de pulpa la cual pasa a través del espacio entre dos rodillos a gran velocidad. La pulpa es inyectada dentro de esta abertura y la superficie de estos rodillos, los cuales poseen canales donde la pulpa es atrapada y posteriormente liberada de los canales para ir a otro rodillo. Ahí es donde se logra separar la tinta.

La gran ventaja de este tipo de lavado es que permite una gran cantidad de agua de alimentación, la cual rápidamente es eliminada, arrastrando así la tinta. La consistencia de descarga es generalmente de 5 a 14% [11].

La eficiencia del lavado es medida por la blancura final del papel, la evaluación de los puntos negros y la presencia de "stikies" (aglomeraciones de resinas provenientes del papel). Este proceso combina generalmente una mezcla de papel periódico y revista (75%) y celulosa virgen (25% aproximadamente), en la cual naturalmente, algunos de los finos de la pulpa son arrastrados por el agua dentro del proceso de lavado.

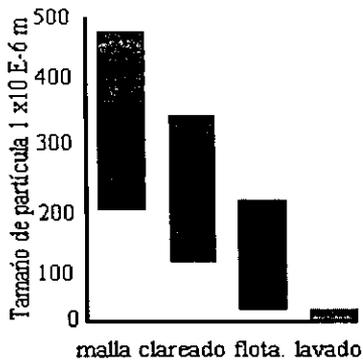


Figura 2A

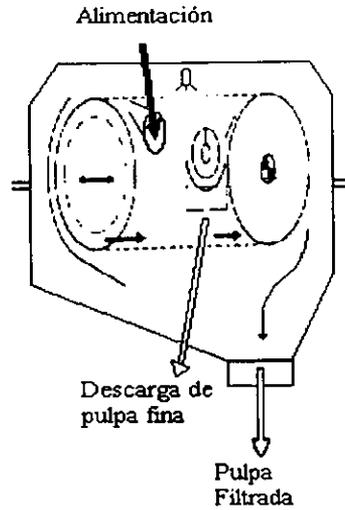


Figura 2B

Figura 2A. Eficiencia de separación de tinta por tamaño de partícula, 2B diagrama de flujo en un proceso de lavado[11].

D.2 La flotación

La eliminación de tinta por flotación comenzó en la década de los 50's. En este proceso, como para cualquier método de separación por burbujas, el objetivo es que burbujas de aire inyectadas en la lechada o mezcla de pulpa y agua, atrapen a las partículas de tinta hidrófobas (también algunos "stikies" y arcilla) y los lleve a la superficie para separarlos en forma de espuma.

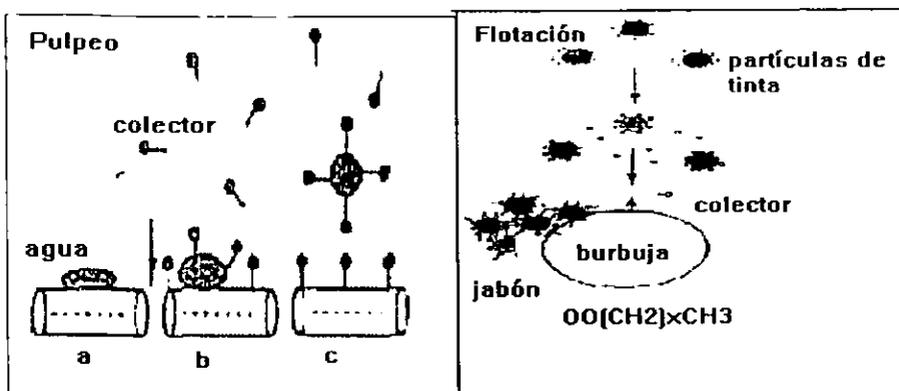


Figura 3A. Efecto del proceso de pulpeo en la separación de la tinta. Figura 3B

Representación general de la flotación [9].

Obviamente, a mayor cantidad de aire introducido mayor es la cantidad de tinta separada. Existen problemas como la turbulencia y subsecuentemente el remezclado de los contaminantes de la tinta. La solución común a este problema es utilizar una muy pequeña cantidad de aire (20% de aire volumétrico) y repetir en varios pasos el proceso.

El proceso de reciclado es básicamente un proceso de separación. Después de que el papel ha sido desfibrado, la pulpa es sujeta a una serie de operaciones unitarias, diseñadas para la separación de contaminantes específicos. A grosso modo, se consideran cuatro pasos principales [9] para eliminar la tinta del papel de desperdicio en el proceso de flotación los cuales son.

- a) Separación de las partículas de tinta de las fibras de papel haciendo un pulpeo en presencia de sustancias químicas.
- b) Producción de una dispersión estable de partículas de tinta en la solución original.
- c) Flotación de partículas de tinta.
- d) Prevención de redepositación de partículas de tinta sobre las fibras.

La mayoría de los nuevos sistemas instalados de destintado, consisten en una combinación de sistemas, el de flotación y el de lavado proporcionando una gran flexibilidad en el manejo de distintos tipos de tintas.

En la Figura 4, se describe el proceso típico a nivel industrial de un sistema de destintado de papel por flotación, donde se muestra que el equipo utilizado en una planta canadiense es precisamente la columna de flotación. Nótese además como el proceso se inicia con el pulpeo y se complementa con un sistema de lavado posterior a la flotación alternando así ambos sistemas y logrando una elevada eficiencia en la producción de papel reciclado de alta calidad [12].

En la Tabla 6 se resumen las principales características de los dos procesos imperantes en el destintado y que en la actualidad están siendo combinados dentro de una misma planta para mejorar la producción de papel reciclado.

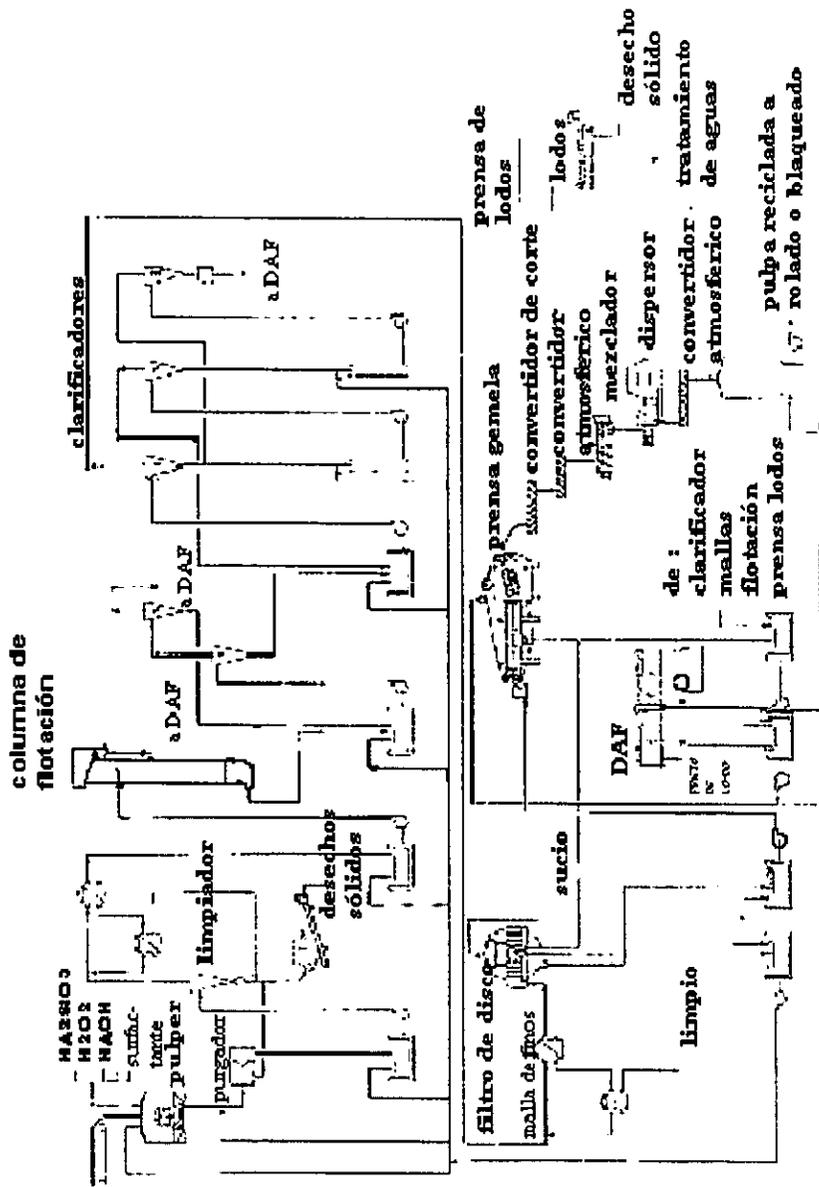


Figura 4. Diagrama de flujo de una planta productora de papel reciclado [8].

Tabla No. 6. Comparación característica del proceso de lavado y de flotación[9]

Lavado	Flotación
Proceso barato	Proceso caro
Reactivos utilizados baratos	Reactivos utilizados caros
Mala calidad de apariencia	Mejor calidad de apariencia
Alta pérdida de fibra	Baja pérdida de fibra
Baja recuperación	Alta recuperación
Alta pérdida de material fino	Baja pérdida de finos
Ciclo de purificación de agua reciclada compleja	Ciclo de purificación de agua reciclada simple
Disponible para tinta base agua	Disponible para tintas base aceite

En el siguiente capítulo se estudiará y describirá el proceso de flotación a detalle, considerando la teoría, los parámetros y equipos necesarios para que este sistema sea competitivo en el área papelera así como lo es en el beneficio de minerales.

CAPÍTULO 2

PRINCIPIOS DE FLOTACIÓN

A) BREVE HISTORIA DE LA FLOTACIÓN

La idea de usar flotación para separar partículas de tinta de impresión de pulpa de papel fue obtenida a partir de la separación por flotación de minerales.

La flotación es la técnica de procesamiento de minerales más importante y versátil debido al creciente número de toneladas tratadas. Además en la industria del papel se convierte también en el proceso más común para separar la tinta de la fibra en los procesos de reutilización.

La flotación se patentó en 1906 permitiendo el minado de yacimientos complejos y de baja ley, que de otro modo se habrían considerado no económicos. En la práctica anterior, las colas de muchas plantas de concentración por gravedad eran en un grado más alto al del mineral que se trata en muchas de las modernas plantas de flotación. El término "flotación" se refiere al proceso de concentración mediante el cual partículas sólidas de diferentes compuestos, previamente liberadas y contenidas dentro de una masa líquida, pueden ser separadas por efecto de la acción química de reactivos específicos y por el arrastre de burbujas de aire [13].

Por su parte el destintado por flotación fue usado antes de la década de los 50s, pero no fue sino hasta que el proceso se logró controlar que se implementó satisfactoriamente en la industria. Actualmente el 80% del proceso de destintado se lleva a cabo por flotación o flotación -lavado en la mayoría de las plantas papeleras del mundo.

B) DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

En el principio de la flotación, la partícula es agitada en el seno de una masa de agua a la que se agrega sustancias químicas y aceites, los cuales por efectos fisicoquímicos, provocan la adhesión de las partículas a la película superficial (interfase L-G) que forman las burbujas de aire producidas, las cuales ascienden a la superficie en forma de agregados partícula-burbuja, donde son recuperadas en forma de espuma conocida en términos metalúrgicos como "concentrado". La ganga no se adhiere a las burbujas y es descargada como desecho o jales.

B.1 Tipos de flotación

En general existen dos tipos de flotación de minerales, "flotación a granel o masiva y "flotación selectiva". La flotación masiva se utiliza cuando se desea recuperar en un sólo concentrado todas las especies flotables de una mezcla mineral o de papel. La flotación selectiva, se aplica en la recuperación de especies determinadas.

En el destintado por flotación, las burbujas de aire ascienden a través de líquidos agitados en tanques que contienen celulosa suspendida en forma de pulpa y partículas contaminantes, como resinas y tintas.

Las burbujas se adhieren a las partículas hidrofóbicas, como las resinas y tintas, cuyo diámetro de partícula es de 20- 300 μm .

Las partículas atrapadas son entonces transportadas a una capa superficial donde fácilmente son separadas en forma de espuma. Pese a que el diseño de celdas de flotación varía respecto a la geometría, las configuraciones de flujo y los parámetros de operación, todos ellos operan con principios similares y se incorporan al proceso fundamental de aireación de pulpa, mezclado para maximizar la interacción partícula tinta y la separación de burbuja partícula agregados de la mezcla del seno del líquido.

C) TEORÍA DE LA FLOTACIÓN

Los procesos de flotación aprovechan tres principios fisicoquímicos fundamentales.

C.1 Mojabilidad

C.2 Tensión superficial

C.3 Adsorción

C.1 Mojabilidad

Este principio se define en términos generales, como la habilidad o tendencia que tienen los materiales a mojarse o cubrirse de agua. Su aprovechamiento en los procesos consiste en que las burbujas de aire sólo se agregan a las partículas a separar si éstas desplazan agua de la superficie de la partícula, lo cual sucede si el material repele en cierta medida al agua o es hidrófobo. Una vez que las burbujas de aire alcanzan la superficie, únicamente pueden continuar sosteniendo la partícula si forman una espuma estable; de otro modo revientan y cae la partícula. Para alcanzar estas condiciones es necesario utilizar reactivos químicos conocidos como reactivos de flotación. Por el contrario, las partículas que componen la ganga, deberán tener superficies adsorbentes de agua, es decir, hidrófilas, en cuyo caso, éstas tenderán a caer al fondo del recipiente, o permanecer en suspensión dentro del seno del líquido.

El trabajo que debe realizarse para desalojar una partícula adherida a una burbuja, está en función de su tenacidad o habilidad para agregarse a dicha burbuja, es decir de su grado de mojabilidad o flotabilidad. Esto podría calcularse fácilmente si se conocieran las energías libres disponibles en la superficie de la partícula antes y después de su adhesión, pero hasta hoy no se ha concebido ningún método posible para efectuar este tipo de determinaciones. Sin embargo el grado de flotabilidad puede ser determinado en forma indirecta, en condiciones ideales, con base en medidas del ángulo de contacto, aunque los resultados obtenidos no necesariamente se aplican a las condiciones de flotación conseguidas en la práctica.

La ecuación de Young, expresa la relación de equilibrio entre las fuerzas involucradas en la determinación de ángulo de contacto de las burbujas, cuya expresión analítica es:

$$F_{sw} = F_{sa} + F_{wa} \cos\theta$$

Donde F_{sa} , F_{sw} y F_{wa} son las energías libres de superficie entre las fases sólido-aire, sólido agua y agua aire respectivamente y θ es el ángulo de contacto entre la superficie mineral y la burbuja.

La fuerza necesaria para romper la interfase partícula- burbuja es la llamada fuerza de adhesión, $W_{s/a}$ y es igual al trabajo necesario para separar la interfase sólido - aire y produce las interfaces separadas aire - agua y sólido - agua., es decir:

$$W_{s/a} = F_{wa} + F_{sw} - F_{sa}$$

Y combinándose las dos ecuaciones se tiene

$$W_{s/a} = F_{wa} (1 - \cos\theta)$$

Mientras mayor sea el ángulo de contacto más grande será la fuerza de adhesión entre la partícula y la burbuja; además el sistema es más elástico ante las fuerzas de rompimiento. Por consiguiente la flotabilidad aumenta con el ángulo de contacto y se dice que la especie con un alto ángulo de contacto es aerofílico, es decir tienen mayor afinidad por el aire que por el agua[13].

C.2 Tensión superficial

Es la tendencia que muestra la superficie de un líquido a concentrarse a un área mínima, esto es, a un nivel mínimo de energía, por lo que todas las moléculas colocadas en la superficie del fluido tienen el efecto de una membrana difícil de romper. La ruptura de esta membrana se logra abatiendo la tensión de la superficie de contacto mediante el uso de reactivos químicos colectores. Para impedir la fusión o unión de las burbujas en el agua, y para hacer que formen la espuma en la superficie, deberá cubrirse la membrana superficial con algún medio estabilizador, el cual resulta ser un agente espumante. El efecto espumante, es reducir ligeramente la energía superficial de la interfase aire - agua, y por tanto, estabilizar las burbujas.

Las propiedades principales que deben atribuirse a un agente espumante son: debe ser soluble en agua para que pueda formar parte de la fase líquida, pero que sus moléculas deban tener tan poca atracción por el agua, de tal modo que sean concentradas en la superficie del líquido. Los únicos compuestos que satisfacen los requisitos anteriores son aquellos con características heteropolares, es decir, aquellos que poseen propiedades tanto polares como no polares [14].

La disminución de la energía de superficie (tensión superficial), de la película envolvente de la burbuja, se debe al hecho de que las moléculas del espumante tienen menos atracción por el agua que la que tienen las mismas moléculas de agua entre sí. De esta manera, se tendrá que llevar menos trabajo para llevar una molécula del espumante, que una molécula de agua a la superficie. Así pues, una burbuja con moléculas de espumante adsorbidas en su interfase aire- agua tendrá una tensión superficial más baja que una de agua pura. Mientras más moléculas de espumante existan en la interfase, menor será su tensión superficial. Para una concentración determinada de espumante y un volumen de aire en la pulpa, las burbujas llegan a estabilizarse con un tamaño más o menos homogéneo, el cual en la práctica varía de 1 a 3 mm de diámetro.

Se ha comprobado que mientras mayor sea el abatimiento de la tensión superficial, los productos concentrados serán más limpios. El problema que se presenta si se abate

demasiado la tensión superficial, es que las burbujas que se formarán serán grandes y frágiles rompiéndose muy fácilmente al llegar a la superficie; aún más si el abatimiento de la tensión superficial se exagera hasta el límite, sólo se conseguirá crear efervescencia en la superficie, con los consecuentes resultados negativos. Por el contrario, si el abatimiento de la tensión superficial es muy limitado, el resultado será la creación de burbujas pequeñas, resistentes y con un gran poder de arrastre, lo que acarrea como consecuencia el aumento en la recuperación del producto[15,16].

C.3 Adsorción

La adsorción es el fenómeno por el cual moléculas de gas, vapor o líquido espontáneamente se concentran en una superficie de contacto por acción de fuerzas electrostáticas o por reacción química. Esta propiedad la poseen algunas sustancias, que pueden atraer partículas a su superficie e impedir su separación.

La naturaleza de las fuerzas, las cuales causan la adsorción ha provocado mucha discusión en la literatura, pero cabe destacar que no todos los mecanismos han sido descritos aún. La adsorción toma lugar como resultado de la presencia de fuerzas en una superficie, creando éstas un campo en donde el ambiente inmediato sujeta y hace permanecer por un tiempo finito las moléculas de las especies en contacto.

Esta propiedad fisicoquímica es ampliamente aprovechada en el proceso de flotación, puesto que de ésta depende el recubrimiento de las partículas por los agentes químicos que proporcionarán a las mismas las propiedades de mojabilidad o no -mojabilidad descritas con anterioridad, así como también las características de adherencia a las burbujas que se formarán durante la operación [14].

D) LA FLOTACIÓN DE MINERALES Y DE TINTAS

Mucho del trabajo experimental y teórico relativo al proceso microscópico de la flotación ha sido desarrollado explícitamente por la flotación de minerales. Sin embargo mucho de esto es también aplicable para el destintado por flotación.

La Tabla No 7 muestra algunas similitudes y diferencias entre flotación de minerales y flotación para destintado. El destintado difiere en la densidad de partículas que es relativamente baja, comparable al agua. El sistema de destintado típicamente tiene una amplia distribución de tamaño de partículas y otras características, por ejemplo: energía superficial, geometría, etc. Las suspensiones de pulpa consisten en fibras de celulosa que pueden formar una especie de red.

Además ambos, contaminantes a separarse y pulpa, pueden ser altamente heterogéneos. Estas diferencias resultan en una menor eficiencia de separación para procesos de destintado que para el de separación de minerales.

A pesar de estas diferencias se considera que, las separaciones por flotación son similares para ambos procesos. Con la excepción de los efectos de inercia los cuales son típicamente impedidos en el destintado por flotación.

Por lo tanto los cuatro microprocesos que son aplicables a la separación mineral son también usados para describir los eventos ocurridos en la celda de destintado [17].

E) MICROPROCESO DE LA FLOTACIÓN

La mayoría de los procesos de separación por flotación son modelados como un proceso de pasos consistentes en una secuencia de microprocesos con valores probabilísticos asociados. Esta secuencia incluye a) el acercamiento de una partícula a una burbuja de aire y la subsecuente intercepción de esta partícula con la burbuja; b) el deslizamiento de la partícula a lo largo de la superficie de la delgada película de líquido (interfase L-G) que separa la partícula de la burbuja y la ruptura de la película.; c) la subsecuente formación de una triple fase de contacto entre la partícula, burbuja y el fluido (interfase S-G-L); y d) la estabilización del agregado burbuja - partícula y su posterior transporte a la capa de espuma para separarla de la solución. Éste microproceso se realiza en todo el seno del fluido.

Tabla 7. Comparación de la flotación en minería y papel [17].

Parámetro	Destintado por flotación	Flotación mineral
<i>Energía superficial de la partícula</i>	Muy compleja <ul style="list-style-type: none"> • baja energía, adhesivos hidrofóbicos • media energía, tintas hidrofóbicas • alta energía rellenos hidrofílicos y fibras 	Poco uniforme <ul style="list-style-type: none"> • alta energía, materiales hidrofílicos
<i>Tamaño de partícula</i>	Distribución amplia	Distribución amplia
<i>Densidad de partícula</i>	Muy baja, en algunos casos más baja que el agua	Amplia distribución mayor que el agua
<i>Libración de partícula</i>	Por pulpeo en presencia de reactivos químicos	Por molienda sin adición de reactivos químicos
<i>Propiedades de pulpa</i>	<ul style="list-style-type: none"> • muy heterogénea • alta temperatura (40-60°) • posible redepositación de partículas • redes de fibra 	<ul style="list-style-type: none"> • homogénea • baja temperatura • la redepositación no es importante
<i>Caracterización del producto final</i>	Por medio de <ul style="list-style-type: none"> • blancura de la hoja de papel • análisis de puntos negros • análisis de manchas • análisis de stikies 	Por medio de <ul style="list-style-type: none"> • análisis químico
<i>Impacto de eficiencia en los pasos posteriores del proceso</i>	Los contaminantes que no son separados pueden <ul style="list-style-type: none"> • dañar el equipo • reducir la calidad del producto 	La pureza del producto final es afectada

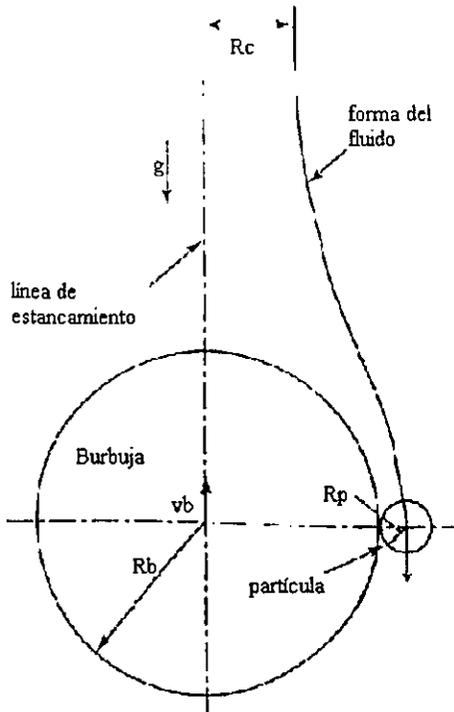
E.1 Los 4 Pasos en la flotación

Los valores probabilísticos de algunos de estos microprocesos elementales se han publicado como descripciones matemáticas [6]. La mayoría de estos modelos asumen que la burbuja y la partícula son esféricas. Además, la mayoría consideran la interacción de una partícula con una burbuja. Esto sin duda se debe a que, considerar una mayor cantidad de burbujas y partículas complica considerablemente el análisis.

En general, el proceso de colección de partículas contaminantes por burbujas en una pulpa tiene lugar en un ambiente complejo y altamente turbulento. Sin embargo, como la distancia de separación entre la partícula y la burbuja decrece, las condiciones de flujo relativas a la burbuja - partícula son típicamente idealizadas y simplificadas para simular un flujo no perturbado. Esto permite simplificaciones considerables que son universalmente empleadas en la modelación de la flotación. Ahora consideremos estos cuatro pasos importantes de este proceso.

a) Captura de la partícula

Una partícula debe viajar hacia una burbuja dada si ésta se ha de capturar, a esto se le denomina colisión o intercepción. Cuando la captura o colisión ocurre, no implica que un agregado burbuja- partícula se ha formado; es decir, sólo significa que un pequeño intervalo de fuerzas y películas delgadas dinámicamente, llegan a ser significativamente estables. Un parámetro crítico que gobierna el acercamiento de una partícula a la burbuja y su posterior captura es R_c , el radio del contorno dentro del cual la partícula debe moverse de tal modo que sea interceptada por la burbuja. La correspondiente probabilidad de una colisión (P_c) depende de la relación de R_p y R_B . (mostradas en la Figura 5).



$$P_c = (R_c/R_B)^2$$

Donde se representa la relación de número de partículas (asumiendo que $R_p \ll R_B$) dentro de la zona de contorno de sección transversal πR_c^2 que encuentran a una burbuja por unidad de tiempo con el número de partículas que se acercan a la burbuja y el contorno con la sección transversal πR_B^2 . Aplicando el número de Reynolds, es posible definir una ecuación que se asemeje a una condición real a partir de correlación empírica, la cual para este paso es[16]:

Fig 5 Todas las partículas dentro de la zona de línea de flujo de radio R_c deberán ser capturadas por la burbuja de aire.[17]

$$P_c = (3/2 + 4Re_B^{.072}/15)(R_p/R_B)^2$$

Donde $Re_B = v_B d_B \rho / \mu_l$ y

R_p = radio de la partícula

R_B = radio de la burbuja

Re_B = número de Reynolds de la burbuja

v_B = velocidad de elevación de la burbuja

d_B = diámetro de la burbuja

ρ_l = densidad del líquido

μ_l = viscosidad dinámica del líquido

b) Atrapamiento por deslizamiento

No todas las partículas que son capturadas por una burbuja llegan a ser atrapadas, en general, sólo las partículas que son suficientemente hidrofóbicas son capaces de adherirse por sí mismas a la burbuja a través de la formación de una triple fase de contacto con un ángulo finito de contacto. Antes de que esta triple fase se forme, la película del líquido entre la burbuja y la partícula - cual se forma tan pronto como la partícula es capturada por la burbuja - debe ser suficientemente delgada para romperse. Después de la formación de la película líquida, la partícula comienza a deslizarse sobre la superficie de la burbuja y permanece sobre ella por un periodo finito de tiempo, el cual es denominado tiempo de deslizamiento (T). Este proceso de deslizamiento produce una pequeña superficie de deformación, la cual tiende a adelgazar la película y ésta pueda llegar a romperse. Para que el atrapamiento por deslizamiento ocurra, el tiempo de contacto de la partícula con la película debe ser más grande que el tiempo de inducción de la película sobre el punto de ruptura.

El modelo matemático más apropiado para describir este fenómeno es referido a una condición cuasi-estacionaria que considera el movimiento de la partícula en función del espesor de la capa que cubre la burbuja y éste a su vez en función del ángulo de la partícula. En este modelo se considera el espesor de la interfase h como función de la posición del ángulo de la partícula (ϕ) y se asume que h y ϕ varían con el tiempo (T) por lo tanto $\phi(T=0) = \phi_T$, siendo ϕ_T el ángulo de contacto. También se considera que para $0 < \phi < \pi/2$, la influencia de la película de fluido es despreciable por lo que el atrapamiento de la partícula de tinta se puede realizar por la burbuja.

Se realiza una modelación considerando balancear las fuerzas de resistencia generada durante la inducción de la superficie de la burbuja con la película del líquido, el peso aparente de la partícula, la fuerza centrífuga actuando en la partícula deslizante, la fuerza de flujo actuando en la partícula deslizante cerca de la pared de la burbuja, así como la fuerza de arrastre actuante en la partícula .

El modelo resultante es un sistema de ecuaciones diferenciales descritos en términos del ángulo de la burbuja y el espesor. Las Figura 6 y 7 describen lo que ocurre en este paso [17].

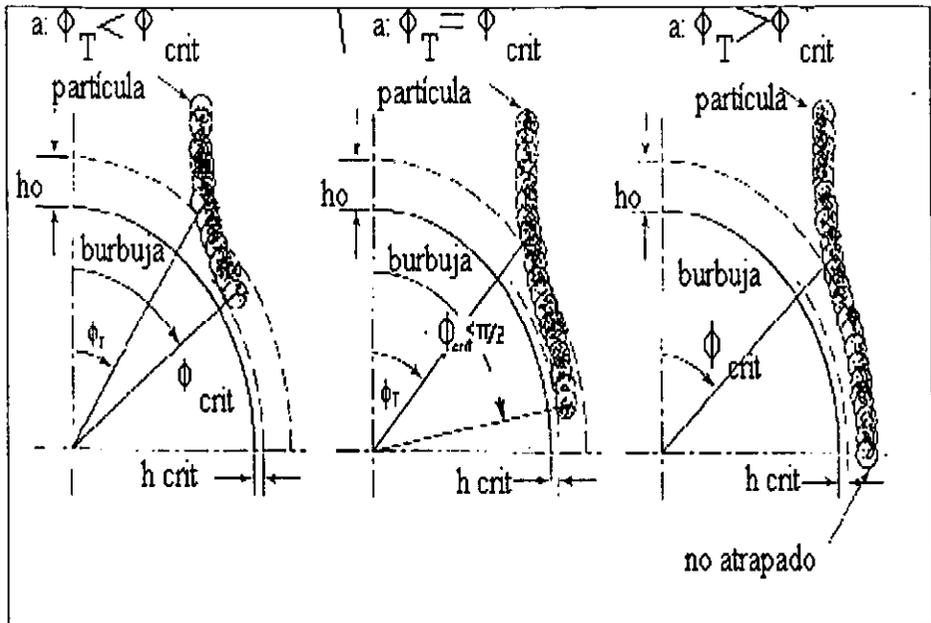


Fig 6 Descripción general del paso de atrapamiento por deslizamiento donde se modela a partir de los parámetros ϕ y h en una burbuja para conocer el tiempo óptimo de atrapamiento de tinta.[17]

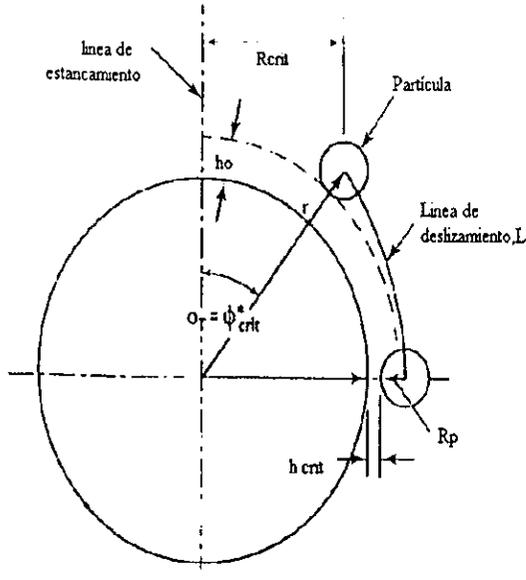


Fig 7 Todas las partículas dentro de la línea de flujo de radio R_{crit} , se adherirán a la burbuja mediante deslizamiento [17].

c) Contacto en la triple fase

Una vez que la delgada película que rodea a la burbuja se ha roto, un contacto relativamente amplio de una triple fase (CTF) entre el líquido, la partícula y la burbuja debe formarse dentro de un tiempo (t_{CTF}) suficientemente corto para proveer una fuerza bastante grande de adhesión que impida la inmediata separación de la partícula de la burbuja.

Esta formación se representa esquemáticamente en la Figura 8 donde θ representa el ángulo de contacto en el líquido. Si t_v representa el tiempo de vida promedio para un comportamiento turbulento dentro de la celda, entonces el tiempo requerido para formar un contacto de triple fase y crear un agregado de burbuja-partícula, debe satisfacer que $t_{CTF} < t_v$.

Los investigadores en esta parte del proceso [17], han concluido que la probabilidad que exista este triple contacto es prácticamente de 1. Es decir que este proceso tiende a llevarse a cabo de manera natural

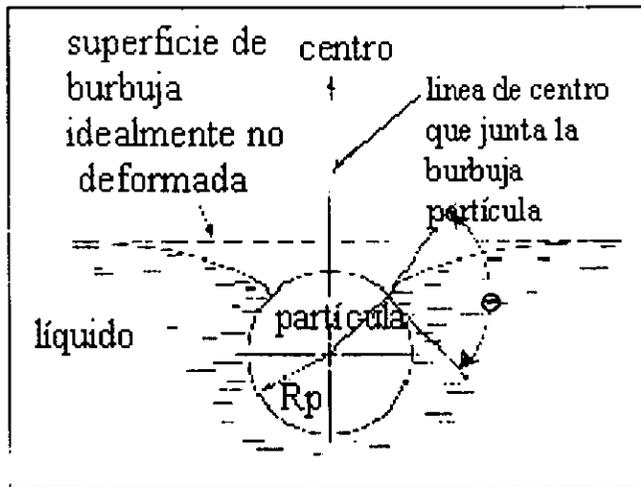


Figura 8. Contacto de triple fase entre la burbuja, partícula y la región líquida [17].

d) Estabilidad

Una vez que el agregado de burbuja-partícula se forma, éste debe permanecer estable en su trayecto hacia la superficie para su separación. Es generalmente aceptado [17] que la estabilidad de la burbuja puede ser determinada realizando un balance de fuerzas en la partícula atrapada en la burbuja. Las fuerzas actuantes en este balance se muestra en la Figura 9.

Estudios recientes han sugerido que una vez que el agregado burbuja-partícula se forma en el atrapamiento por deslizamiento, la burbuja tiene un fuerte control sobre la partícula, la cual tiende a separarse. Sin embargo este criterio no siempre corresponde a los resultados en equipos industriales debido a su turbulencia. Adicionalmente se sabe que el contacto entre burbujas-partícula con otras burbujas-partícula llega a destruir el agregado. De esta manera la influencia de la turbulencia es un factor muy importante para realizar una buena flotación [10,17].

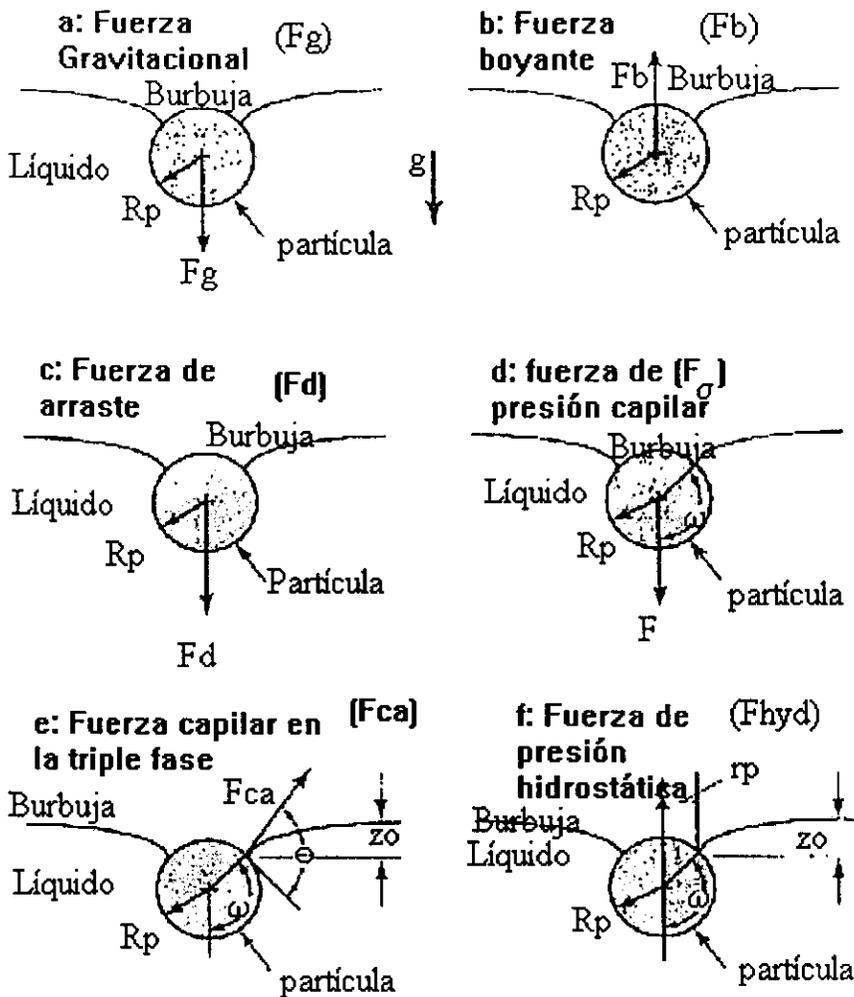


Figura 9. Fuerzas estabilizadoras y desestabilizadoras que actúan en una burbuja cargada de tinta [17].

F) LAS VARIABLES MÁS IMPORTANTES EN LA FLOTACIÓN

En la flotación de tinta las variables importantes son: consistencia, flujo de aire, tiempo de flotación, temperatura, pH y los reactivos químicos para el destintado.

F.1 Consistencia

La consistencia se define como la masa de papel dividida entre la masa del agua más la masa del papel multiplicado por 100:

$$\text{Consistencia} = \frac{\text{masa papel}}{\text{masa agua} + \text{masa de papel}} \times 100$$

Si el valor es menor a uno por ciento, entonces no se considera la masa del papel en suma con el agua [19], es decir:

$$\text{Consistencia} = \frac{\text{masa papel}}{\text{masa agua}} \times 100$$

El valor de consistencia utilizado depende del tipo de proceso y equipo al cual se someta el papel para ser destintado. Para el pulpeo la consistencia óptima oscila entre el 4 al 10% , para la flotación este valor desciende drásticamente hasta valores de 0.5 hasta 2%. En la mayoría de los casos para la flotación en celda la consistencia adecuada es de alrededor de 1.5-2.0 % y para flotación en columna su valor es de 0.7 a 1%.

Esto se debe principalmente a que el tipo de equipo propicia un efecto distinto en la generación y el comportamiento dinámico de las burbujas. Mientras que en la celda, se posee un tipo de agitación mecánica que facilita la dispersión de las burbujas por encima de la estabilidad provocada por la pulpa. En la columna es necesario disminuir dicho efecto con el objeto de lograr en el seno de fluido un mejor desplazamiento de las burbujas, por esta razón la consistencia es más baja.

F.2 Flujo de aire

El flujo de aire, el tamaño y la distribución de las burbujas, tienen gran importancia en la flotación, es entonces común pensar que entre más aire se inyecte la calidad de flotación será mejor, pero efectos como la turbulencia disminuye drásticamente este parámetro. Además, si las burbujas de aire no son relativamente proporcionales al tamaño de las partículas, las burbujas se encontrarán con muy pocas partículas en su camino hacia la superficie, por lo tanto el tamaño de burbuja y su distribución significa en mucho la mejoría en el sistema de flotación planteado.

De este modo es conveniente poseer un sistema de inyección de aire que cuente con los dispositivos mecánicos suficientes como boquillas y controladores de flujo que aseguren una eficaz distribución de las burbujas dentro del equipo.

F.3 Tiempo de flotación

El tiempo para flotar la pulpa es generalmente de 5 a 10 minutos desde que se aplica la inyección de aire hasta que se retira la pulpa [20]. En este proceso se debe recordar que el tiempo de acondicionamiento no es necesario, debido a que los reactivos utilizados en el proceso son adicionados desde el pulpeo y no es necesario agregar más durante la flotación. En la actualidad, un solo producto tiene la capacidad de realizar el efecto humectante, lavador, colector y espumante para el papel, pero esta variable se discutirá posteriormente.

Como se muestra en la figura 10, el efecto del tiempo no es lineal sobre la destintabilidad. Transcurrido un tiempo mayor de 15 minutos, el proceso no tiene una recuperación de tinta sustancial reflejada en la blancura de la pulpa, esta se mantiene y es posible incluso que comiencen a presentarse fenómenos nocivos como la redepositación de la tinta no flotada en la pulpa, es decir un nueva unión física entre la pulpa y la tinta que en nada conviene a este proceso [15].

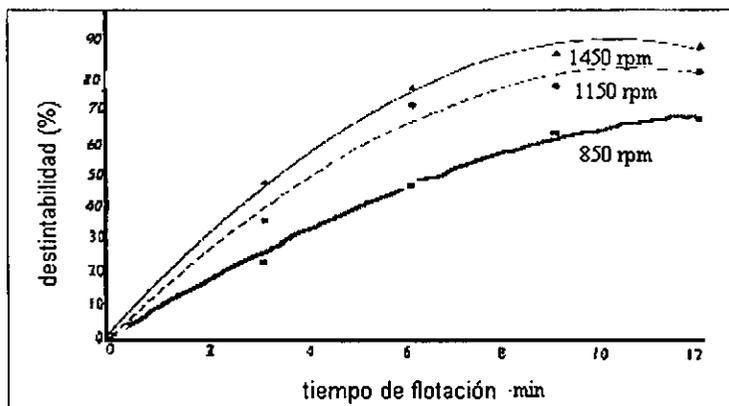


Figura 10 Variación de la destintabilidad (%) en función del tiempo de flotación a diferentes velocidades de agitación[20].

F.4 El pH

Entre los reactivos químicos más importantes dentro de la producción de papel reciclado se encuentra el agente alcalificante (álcali), cuyas funciones son: saponificación de algunos componentes de las tintas e hinchamientos de la fibra debido al entorno alcalino. El medio alcalino asegura una buena hidrofobicidad de la tinta con lo que la selectividad del proceso de separación se incrementa. La interacción de la alcalinidad con el contenido de lignina en pulpas produce un efecto de cambio de color, que va desde el amarillamiento al oscurecimiento de la fibra.

Dicho fenómeno ha sido perfectamente caracterizado en la literatura. Este efecto se controla generalmente mediante la adición de peróxido de hidrógeno que funciona bajo estas condiciones como agente de blanqueo. Para el control del pH se recomienda usar sosa en combinación con carbonato de sodio o hidróxido de amonio en dosificaciones mayores. Existen dudas en cuanto a la función que juega el pH en los resultados del destintado, o si estos son función sólo del tipo de reactivo utilizado para flotar [20].

El efecto primario causado por la alcalinidad, es el incremento del ensanchamiento de las fibras de celulosa. La adición del álcali causará una saponificación en los medios usados en las tintas para impresión convencional, conforme aumenta el álcali se observa un incremento de efectividad del destintado. La adición de iones OH^- se cree que aumenta la repulsión electrostática entre las fibras y las partículas de tinta, resultando en la separación de tinta.

F.5) Los reactivos destintantes

Los reactivos destintantes tienen una función muy importante como lo es el hinchamiento de fibra, separación de tinta, humectación, anti - redepositación, dispersión, floculación, aglomeración, oxidación y reducción de cromóforos. La Tabla 8 lista los principales reactivos químicos y su lugar de aplicación potencial.

Tabla 8. Principales reactivos destinados de papel

Compuestos	Aplicación
Hidróxido de Sodio	Pulpeo, blanqueado
Silicato de Sodio	Pulpeo, blanqueado
Agentes acomplejantes	Pulpeo, blanqueado
Peróxido de Hidrógeno	Pulpeo, blanqueado
Surfactantes	Pulpeo, flotación, lavado
Colectores	Pulpeo, flotación
Agglomeradores	Pulpeo, clarificación
Cloruro de Calcio	Flotación
Dispersantes	Lavado
Hipoclorito de Sodio	Blanqueado
Hidrosulfito de Sodio	Blanqueado
Controlador de contaminantes	Pulpeo
Clarificador de polímeros	Clarificación

Para la flotación los compuestos más importantes son los surfactantes debido a que cumplen la función de dispersantes, colectores, agentes de humectación, disectores y promotores de antideposición. Son moléculas que presentan una naturaleza anfifila, es decir que un extremo de la molécula es hidrofílico mientras que el otro es hidrófobo y por tanto insoluble en medio acuoso, esta característica obliga a las moléculas a migrar a la superficie que separa dos o tres fases, con lo que se altera la relación entre ellas: humectación y deshumectación. El surfactante se agrega en el proceso de pulpeo del papel o junto antes de iniciar la flotación, la parte hidrofílica se adsorbe con la tinta, el aceite o la suciedad, mientras que la parte hidrofóbica permanece en el agua.

Estos mecanismos son los responsables de la captura de las partículas de flotación, así como de la estabilidad de emulsiones. Las soluciones de surfactantes tienden a partir de cierta concentración a formar aglomerados llamados micelas, comportamiento que es responsable de la solubilización de materiales insolubles en cierta fase.

Al cambiar el carácter de las partículas de tinta libres por el pulpeo, el surfactante forma una dispersión estable que evita la precipitación de éstas sobre las fibras nuevamente [21, 22].

La proporción del peso molecular de la parte hidrofílica entre la hidrofóbica (HLB) en la estructura molecular es un parámetro muy útil para determinar si un compuesto tiene la capacidad para realizar el proceso de destintado con éxito. Si la parte hidrofílica tiene un peso considerable en la molécula entonces aumentará el HLB, por lo tanto la eficiencia de la separación de tinta en el fluido.

G) Diferentes tipos de agentes de flotación y su caracterización

Existen una amplia gama de agentes para flotar tinta, algunos de los cuales no está bien conocido el efecto químico que poseen. Las categorías generales incluyen ácidos grasos, (líquidos/insaturados, sólidos/saturados), jabones (sólidos saponificados), surfactantes, emulsiones y dispersores. Estas categorías se deben principalmente a la aplicación, la dosificación y tipo de proceso a los cuales son agregados los tensoactivos. La Tabla 9 muestra los diferentes tipos de destintantes existentes.

La biodegradación del surfactante es un factor muy importante a considerarse en la fabricación y posterior utilización de dichos compuestos. Los tensoactivos después de utilizarse son vertidos a efluentes de aguas negras y contaminan el ambiente. Existen compuestos que difícilmente pueden perder su efecto surfactante y más aún oxidarse y convertirse en agua y dióxido de carbono posteriormente. Ejemplo de esto es el nonilfenol etoxilado que ha sido reemplazado por alcoholes y ácidos grasos etoxilados. También los compuestos propoxilados presentan dificultad para biodegradarse.

Tabla 9. Distintos tipos de destintantes [2].

Tipo	Composición	Dosificación	Apariencia	Aplicación
Acido graso	Principalmente ácido Carboxílico C16-C18, saturado a partir de cebo de res hidrogenado	0.45 a 0.7 %	Sólido blanco con escamas o pastillas o liquido fundido	Requiere ion calcio superior a 180 PPM. Adherir al pulpeador con sosa cáustica
Jabón	Principalmente jabón de sodio C16,C18 saponificado a partir de cebo de res no hidrogenado	0.6 a 1.0 %	Sólido blanco con escamas o pastillas	Puede ser aplicado en el paso de flotación. Se utiliza comúnmente en combinación con emulsiones
Surfactante a partir de OE	Ácidos grasos o alcoholes etoxilados o propoxilados en distintas proporciones	0.1 a 0.25 %	Líquido claro o ámbar. El color ámbar puede indicar dilución con ácido graso líquido como el tall oil	Se agrega al pulper. La dosificación debe ser balanceada con recirculación. Efectivo para procesos conjuntos de lavado y flotación
Displector	Cadena hidrófoba etoxilada y propoxilada con distintas proporciones	0.05 a 0.20%	Líquido claro a ámbar	Utilizado para dispersión y colección de hojuelas de toner
Enlazantes	Típicamente 70% se surfactante más 30% de tall oil	0.15 a 0.30%	Líquido ámbar .	Agregado al pulper con sosa cáustica par obtener saponificación. Puede requerir calcio para obtener mejores resultados
Emulsiones	Acidos grasos completamente saturados con distintos surfactantes multifuncionales	0.45 a 0.75%	Líquido blanco	Agregado al pulper con sosa cáustica para obtener saponificación. La adición de calcio no es requerida.

CAPÍTULO 3

EQUIPOS DE FLOTACIÓN

Actualmente se fabrican muchas celdas diferentes y muchas más se han desarrollado y descartado con anterioridad, de todas han surgido grupos distintos: las celdas mecánicas y las celdas neumáticas. El tipo de máquina es de gran importancia en el diseño de una planta de flotación.

A) REQUERIMIENTOS DE LAS CELDAS DE FLOTACIÓN EN GENERAL

Para la implementación del proceso de flotación, las celdas deben cumplir los siguientes requerimientos.

- Mezcla turbulenta de la pulpa

Además de los sólidos suspendidos y del acondicionamiento de pulpa, ésta debe permanecer en movimiento, mediante flujos turbulentos para evitar la sedimentación indeseable, así en la práctica de flotación de tintas se recomienda utilizar un 1% en masa para impedir la sedimentación de sólidos [23].

- Aireación de la pulpa

Para la separación deben de aprovecharse las propiedades hidrofóbicas de la superficie de las partículas, es necesario insuflar aire dentro de la pulpa con los adecuados dispositivos y distribuirlo de tal modo que se forme la máxima superficie de contacto entre la fase líquido-gas. Las condiciones de la celda deben favorecer la adhesión entre los sólidos y las burbujas de aire.

- Descarga de espuma limpia

La acumulación de la espuma de flotación sobre la superficie de la pulpa debe de descargarse selectivamente.

- Aseguramiento de un flujo de pulpa continua

La alimentación y descarga es regulada para realizar una operación continua

Conforme transcurrió el tiempo, estos requerimientos fueron satisfechos por distintos medios y modificaciones constructivas [23,24].

B) Tipos de celda

Los equipos de flotación utilizados actualmente, se dividen en dos clases:

- 1) Celdas mecánicas de agitación, en las que la diseminación del aire y la agitación de la pulpa, se realiza por un impulsor revolvente o giratorio, en esta clase se encuentran los equipos de agitación mecánica, los de sub-aereación y los tipo mecánico - neumático. De las cuales éste último es el más usado actualmente.
- 2) Celdas tipo neumática, donde los equipos carecen de partes móviles por lo que los efectos de flotación son producidos por medio de la ascensión del aire - desde el fondo de la celda - a través de la pulpa.

C) Celdas de agitación mecánica

Los equipos de agitación, son aquellos en los cuales la pulpa que ha sido agitada, es elevada en forma de espuma por efecto giratorio de la propela. Como ejemplo de este tipo de celdas se encuentran las tipo Kraut, Kohlberg y Butchart. En las celdas de agitación. el

agitador representa el componente más importante. Paralelamente a la suspensión de sólidos y el transporte [13].

D) Celdas de subaeración

Son aquellas que cuentan con bombas de aspiración de aire en su interior, se caracterizan tanto en la forma en que es proporcionado el aire como en la colocación de la bomba que lo succiona para la formación de las burbujas. Las máquinas más conocidas son la Denver y la Fagergreen.

Estas máquinas están constituidas por una cuba larga, dividida transversalmente en un número de compartimentos o celdas cuadradas, en el centro de cada una se coloca una bomba de aspiración constituida por un impulsor o rotor, montado en el extremo inferior de una flecha vertical giratoria. Además cuenta con un tubo que rodea a la flecha por la cual se va a succionar el aire.

E) Celdas de agitación neumáticas

Este tipo de equipos son los más simples y consisten esencialmente de cajas alargadas tipo cuba en las cuales fluye la pulpa de extremo a extremo. En el fondo de dichas cubas, se introduce aire. Las máquinas neumáticas usan el aire que arrastra la turbulencia de la adición de la pulpa (celdas de cascada) o más comúnmente aire, ya sea soplado o inducido en cuyo caso conviene dispersarlo mediante deflectores o alguna forma de base permeable dentro de la celda.

Las máquinas neumáticas trabajan con pocos problemas de operación. Como el aire se usa no sólo para producir la espuma y crear aereación, sino también para mantener la suspensión y circularla, normalmente se introduce una celda extra y por ésta y otras razones, estos equipos se han convertido en el tipo de celda dominante [24].

Desde su inicio, las celdas de flotación de tipo neumática se han utilizado para realizar limpiezas de los concentrados de flotación, después para mejorar la recuperación y la ley de flotación, actualmente se continúa investigando acerca de avances específicos respecto al equipo.

VENTAJAS Y DESVENTAJAS

Como ventajas, se pueden considerar los siguientes puntos:

- Consumo bajo de energía en comparación con las celdas de agitación
- Separación relativamente limpia, debido a la elevada turbulencia en la celda, facilitando la elevación y la descarga de las partículas adheridas a las burbujas.

Sin embargo estas ventajas, en ocasiones no pueden ser aprovechadas, puesto que no es posible compensar la elevada susceptibilidad al descontrol que tiene el proceso.

Celdas de flotación neumática de la primera generación

En los primeros equipos, la pulpa fluye a través de unos conductos en forma de "canal " y el aire entra a través de cilindros con fondo poroso o a través de boquillas. Este aire sirve tanto para aireación como para estabilizar la pulpa.

Los tipos más importantes de la primera generación de celdas neumáticas son:

- La celda Callow, desarrollada en 1914
- La celda McIntosh, desarrollada en 1925
- La celda South-Western
- La Ekof

Estas celdas tenían una alimentación de: 2-10 kg/ litro de celda x hora; con un consumo de energía de 1.5 a 4 kWh/t de sólido, éste valor incluye la energía de compresión del aire a una presión de 0.15 a 0.27 atmósferas absolutas.

Las celdas neumáticas de flotación de la primera generación no fueron utilizadas con éxito, debido a su inestabilidad en operaciones continuas, problemas de obstrucción de los medios porosos por los finos del sólido. En la actualidad existen distintos tipos de celda neumática, las más conocidas son: la tipo Bahr, Knaus y la columna de flotación.

E.1 Celda Bahr

Esta celda neumática tiene una sección transversal cónica con un cilindro sobrepuesto, en donde se forma la capa de espuma, como se observa en la Figura No11. La pulpa acondicionada se bombea a varios aereadores, colocados en la periferia cilíndrica. El aire a presión de los aereadores llega a través de un medio poroso. De ahí se conduce a la forma cónica de la celda en donde a través de una repentina descompresión, se obtienen más burbujas de aire. Esta celda se caracteriza por su rendimiento en volumen y su flexibilidad con la alimentación.

Hoy en día, la celda Bahr es utilizada con resultados excelentes en diversas plantas. El tiempo de flotación se reduce considerablemente puesto que el proceso real de aireación en las partículas adheridas con burbujas de aire ocurre básicamente durante el paso de la pulpa a través del reactor. El tiempo de flotación es limitado al tiempo de residencia de la pulpa en el tanque de separación. Debe de existir un cierto valor mínimo de volumen que garantice el transcurrir ascendente de las burbujas de aire cargadas con la tinta.

La pulpa de flotación ya acondicionada con reactivos se conduce a través de un anillo hacia varias celdas cilíndricas de la periferia. Cajas de aireación bombean el aire a través de un medio poroso. Desde ahí se continúa hacia la parte cónica de la celda en donde a través de una repentina baja de presión se producen burbujas de gas en la pulpa. La celda es utilizada en el beneficio del carbono formando una capa de espuma espesa que da lugar a concentrados muy puros [31].

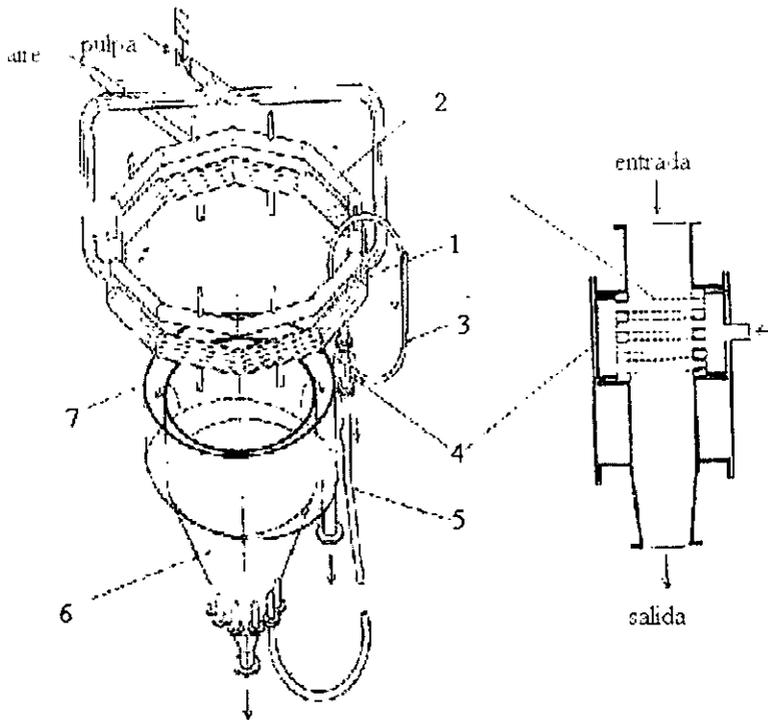


Figura 11. Celda de agitación neumática de flotación tipo Bahr

1 Canal conductor para pulpa de flotación acondicionada, 2 Anillo conductor para aire, 3 Mangueras para aire hacia la aireación, 4 Distribuidor con forma de mangueras para provocar burbujas, 5 Conductor de pulpa hacia la celda de flotación, 6 Celda de flotación, 7 Anillo de salida de espuma [30].

E.2 COLUMNAS DE FLOTACIÓN

La columna de flotación es una celda tipo neumático que se caracteriza por su gran altura, además de que pueden ser de sección circular, cuadrada y rectangular, donde las burbujas de aire se generan con dispersores desde el fondo. El agua de lavado se adiciona desde la parte superior, el diámetro de burbuja que maneja es controlable y pequeño con el

objetivo de optimizar costos y obtener grados de concentración más altos. Entre las principales ventajas de la columna de flotación se incluyen los bajos costos de instalación y operación, alto rendimiento en poco espacio, y la posibilidad de ser automatizada.

En la columna de flotación, las burbujas de gas que ascienden a través de ella interaccionan con la pulpa que desciende en la zona de colección. Estas burbujas de gas son inyectadas con aspersores internos con tamaño de poro variables, preferentemente pequeño, los cuales pueden estar fabricados con acero inoxidable, o material cerámico, es muy importante considerar que debido al tamaño de la pulpa y principalmente de los finos, los aspersores suelen taparse con material no flotado, siendo así de suma prioridad dar mantenimiento al equipo en este rubro.

Se adiciona agua de lavado para estabilizar la espuma, así como para reemplazar el agua perdida en el proceso debido a la espuma saliente. Esa zona se le conoce como zona de limpieza. También se agrega agua para deprimir la pulpa que es arrastrada junto con la espuma por efectos hidrodinámicos, la cual no se desea separar junto con la tinta, sino que salga por la parte inferior como material limpio de tinta.

El material que se recolecta en la superficie de la columna es la partícula hidrófoba, que corresponde principalmente a la tinta base aceite, el material limpio de partículas es la pulpa.

Cabe destacar que en este sistema de flotación como en la celda, el tamaño de partícula a flotar es muy importante, ya que mientras que es sumamente sencillo flotar papel magazín (OMG), el papel periódico (ONP) presenta enorme dificultades para ser flotado con eficacia debido al tamaño de partícula de sus tintas, por esta causa es necesario implementar un sistema de lavado que como se mencionó (Cap. 2), es viable para tamaños de partícula menores [26].

F) Parámetros que afectan la flotación en columna

Los parámetros de diseño que afectan la flotación en columna son:

F.1 Longitud de la columna.

Una columna de flotación está libre de agitación violenta. La velocidad de flujo de alimentación proporciona los medios por los cuales las partículas se suspenden durante la flotación. La longitud de la columna debe ser suficiente para que las partículas se asienten a un mismo tiempo, con un tiempo de retención nominal.

La zona de alimentación tiene su límite superior en la abertura de alimentación y se extiende hacia abajo hasta la base de la columna, esta zona debe tener la longitud suficiente para proveer un adecuado tiempo de retención para el asentamiento de partículas y el choque de las burbujas que van subiendo.

F.2 Profundidad de la espuma.

La flotación en columna ofrece la ventaja de controlar la profundidad de la espuma durante la operación, esto puede ser usado para controlar la separación en el proceso de flotación de una manera más sencilla además, la variación de la profundidad de la espuma afecta la blancura de la pulpa por lo que la altura típica de la cama de espuma varía de 0 a 1 metros a nivel laboratorio.

F.3 Adición del agua de lavado.

La principal razón para usar agua de lavado en los sistema de flotación en columna es liberar la pulpa arrastrada hidrodinámicamente en la fase espuma. La adición de agua ayuda Además, a la estabilización de la cama de espuma [27].

La Tabla 10 muestra la comparación característica entre la celda y la columna de flotación, considerando una capacidad en volumen similar [31].

Tabla 10. Comparación de propiedades de la celda y la columna de flotación [31].

	Unidad	Columna	Celda
Consumo de potencia	kWh/T	0.477	0.889
Área ocupada:			
Sección de flotación	M ²	216	360
Sección del compresor	M ²	54	---
Total	M ²	270	360
Área de piso			
Sección de flotación	M ²	256	672
Sección del compresor	M ²	540	---
Total	M ²	796	672
Peso del equipo			
Unidad de flotación	T	18.14	45.387
Equipo anexo auxiliar	T	10.53	2.72
Total	T	28.67	48.107
Potencia Instalada			
Unidad de flotación	kW	30.2	225.1
Equipo anexo auxiliar	kW	113.0	24.0
Total	kW	143.2	249.1

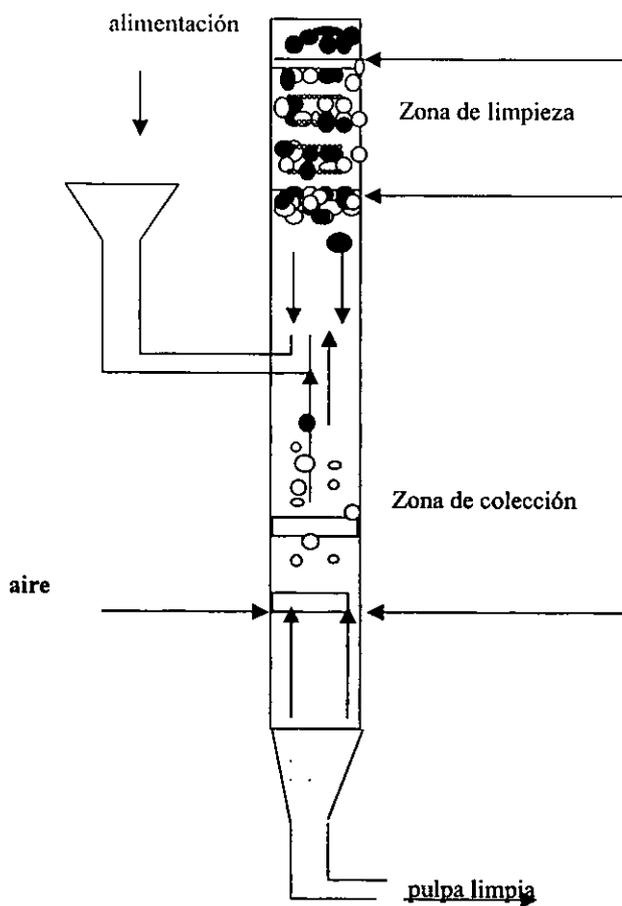


Figura 12 Esquema de la columna abierta de flotación [25].

Capítulo 4

Desarrollo Experimental

Experimentación

Para que la adaptación del proceso de destintado por flotación se aplique correctamente a la columna, es necesario forzosamente conocer el proceso de flotación en celda a plenitud, este paso previo tiene como objetivo tres principios fundamentales los cuales son:

- a) Conocer el comportamiento del proceso de flotación en celda
- b) Determinar las variables comunes en ambos procesos para enfocar la caracterización de la columna a sus variables propias.
- c) Ahorrar papel y agua en la determinación de dichas variables

A) EXPERIMENTACIÓN EN CELDA

Debido a estos motivos se escogió el equipo de flotación en celda Denver para efectuar esta previa caracterización. El volumen de la celda fue de 1 litro (Figura 14).

En este proceso se determinaron las siguientes variables: consistencia de pulpeo, consistencia de flotación, pH, temperatura, tiempo de flotación, tiempo de pulpeo y surfactante, A continuación se referirá la justificación del por qué del valor escogido para estas variables

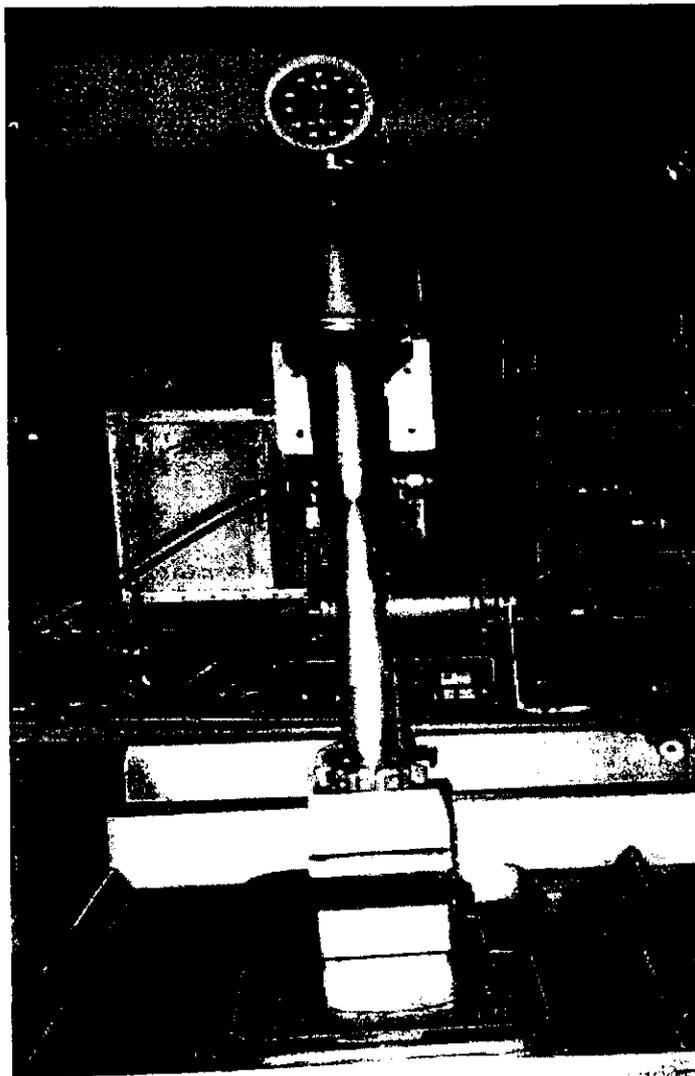


Figura 13. Celda de flotación tipo Denver utilizada en pruebas de flotación tinta

Consideraciones previas

En la caracterización de estas variables se utilizó papel periódico Reforma de menos de dos meses de última circulación con insertos de magazín (30%). Esto se debe a que dicho periódico presenta una calidad de impresión alta, es decir, la dificultad de separar la tinta del papel es mayor.

La justificación del valor escogido para cada variable se da a continuación.

A.1) Consistencia de pulpeo.

Pese a que esta variable se determinó en la celda de flotación, tiene gran importancia para obtener papel con alta calidad, debido a que la consistencia a la cual un papel o una mezcla de papel se logran humectar o posteriormente homogeneizar, no siempre es la misma. El procedimiento realizado para determinar la consistencia óptima fue alimentar la cantidad de papel proporcional a los valores propuestos en un equipo Wemco con 900 rpm., agregarlo con el 75-80 % de agua total para alcanzar la dilución y posteriormente agregar el resto de agua. Los resultados obtenidos fueron meramente cualitativos, para la consistencia de 10% y 7%, el papel no se convirtió en pulpa completamente sino que se tenían trozos de papel sin deshacer, en 5% ,el papel logró convertirse completamente en pulpa y como es necesario ahorrar agua, no se considero seguir diluyendo más la pulpa. se escogió este valor, además que el efecto del agua a menores concentraciones también afecta a un buen pulpeo.

A.2) Tiempo de pulpeo

Esta variable fue analizada considerando el tiempo en que todo el papel podía deshacerse y formar una pulpa homogénea. Se buscó obtener el menor tiempo de pulpeo en el cual la mezcla estuviese lista para flotar sin presentar trozos o pequeños grumos, Sin embargo en este caso se buscó únicamente obtener la pulpa óptima para flotar la tinta y así observar el efecto de otras variables en dicho proceso. La velocidad de agitación se fijó desde un principio con el objetivo de observar únicamente el comportamiento de la pulpa

durante este paso, además de que si la agitación es muy elevada el papel sufre deterioro. Por este motivo la selección del valor utilizado nuevamente se escogió mediante un criterio cualitativo del comportamiento de la mezcla al momento del pulpeo.

A.3) Consistencia de flotación

Cuando en la celda de flotación se carga la pulpa, se observa que es necesaria una dilución para que la pulpa obtenga un comportamiento de fluido, con una consistencia de 5%. Se diluyó la pulpa a la salida del hidrapulper con agua en una celda de flotación. La consistencia de flotación se determinó a partir del comportamiento dinámico del fluido en la celda propiciado por la agitación de la manivela en la máquina de flotación utilizada (Figura 13). Las diversas pruebas efectuadas permitieron aseverar que se alcanzaron los mejores resultados cuando se ocupó una consistencia de entre 1.5 y 1.7%. Esto es no sólo debido al comportamiento antes mencionado sino a una excelente captación de tinta durante la flotación.

Este parámetro fue comparado con los utilizados a nivel industrial y es aceptado con generalidad.

A.4) Temperatura

El efecto de la temperatura fue analizado de acuerdo a los resultados de este trabajo y a la información bibliográfica. Primero se realizó una prueba a temperatura ambiente y se elevó este valor hasta 40° C en intervalos de 10° C. Se observó que a mayor temperatura se presenta una mejor eficiencia. Éste efecto se explica en función del punto de enturbiamiento del tensoactivo (cloud point). Cuando un surfactante se agrega en la solución de pulpa, éste se dispersará de alguna manera en agua. Por debajo del punto de enturbiamiento las moléculas del surfactante estarán dispersas en el agua y conforme la temperatura aumenta, las moléculas comenzarán a asociarse. Ésta asociación de muchas moléculas de surfactantes se observa como un enturbiamiento en la solución. A esta temperatura se le llama punto de enturbiamiento. El surfactante es más efectivo a la temperatura justo por debajo del cloud point. [29] Para el caso del destintante utilizado el

cloud point se sitúa en los 52° C, valor muy cercano a la temperatura utilizada. Las condiciones de operación en el laboratorio no permitieron elevar la temperatura a más o de 40° C. Sin embargo este valor es sumamente significativo, puesto que a niveles industriales el parámetro de temperatura oscila entre los 40 y 45° C generalmente y no se eleva por razones eminentemente económicas. Este efecto se analizó observando la blancura presentada en las hojas formadas al final de cada corrida experimental cuando se destintó en la celda.

A.5) pH

El pH tiene un efecto muy importante en el destintado. Sin embargo una mala selección de la cantidad de alcalinizante puede dañar la fibra de papel de manera irreparable. Se probó a condiciones neutras de pH, sin embargo el papel mostró un descenso considerable en su blancura. Se elevó el pH a valores de ocho - nueve y se logró determinar que este valor era el correcto a utilizarse no sólo por su eficiencia en blancura sino porque no atacó al papel. Con un pH de 10 se mostró amarillamiento posterior en la hoja. El efecto alcalino favoreció al hinchamiento y la saponificación de la pulpa debido a que la NaOH agregada actúa como jabón por lo tanto promueve la separación de la tinta de la fibra. Debido a esto se escogió pH= 9.

A.6) Agitación

La agitación pese a que no es un valor meramente significativo para la columna, sí lo es para la celda y sin duda un factor muy importante para contribuir a un buen destintado, además de predecir el comportamiento neumático de la inyección del aire en la columna de flotación. Una agitación escasa significa un efecto regular en la dispersión y el contacto entre burbuja-partícula de tinta. De este modo se investigaron tres valores. A 900 rpm se observó una flotación significativa pero no tan eficiente para lograr separar las partículas de tinta específicamente impregnadas en el papel periódico (ONP). A 1000 rpm el efecto mejoró y a 1100 rpm mejoró aún más.

Era de esperarse continuar elevando este valor para generar un mayor destintado, sin embargo se cuidó del deterioro mecánico de la pulpa.

A.7) Tiempo de flotación

Este valor es sin duda uno de los más importantes en cualquier proceso de flotación. De él depende la cantidad de material que puede ingresar a un reactor y salir con las condiciones requeridas para su reuso. Para la flotación de papel se buscó estandarizar desde un principio este valor y observar a través de la presencia de las partículas de tinta en la espuma el tiempo óptimo de flotación. Se corrieron pruebas a valores de 4, 6, 8 y 10 minutos en la celda de flotación. Estos valores permitieron observar que no en todos los casos la blancura era proporcional al tiempo de estancia de la pulpa en la celda. Esto se debe a la redepositación de tinta en la fibra cuando existen condiciones fisicoquímicas para hacerlo, variación de temperatura y pH. De este modo un tiempo prolongado, no siempre garantizará una mejor blancura. El tiempo óptimo de flotación fue de 8 minutos, sin embargo es necesario reconsiderar este valor como un parámetro a analizar en la columna de flotación. Los 8 minutos únicamente fueron utilizados como punto de apoyo para realizar esta investigación.

A.8) Destintantes

Otra de las variables que se determinó en esta parte fue la selección del destintante, la cual consideró la dosificación y el momento de adición. La descripción de lo realizado se resume en la Tabla 12.

El destintante también tiene una importancia muy grande para lograr buenos resultados en la blancura del papel. Generalmente se ocupan mezclas del silicato de sodio con agentes catiónicos surfactantes capaces de colectar las partículas hidrofóbicas de tintas y llevarlas a la superficie. Para este trabajo se utilizaron formulaciones de destintantes no iónicos. Un buen destintante será capaz de arrastrar partículas de tamaño de 5 micrómetros, como las encontradas en el papel periódico y partículas más grandes como las presentes en

magazines e impresiones flexográficas. Muchas formulaciones de destintantes fueron probados para determinar cuál de ellas tendría mejores resultados en la columna. Es necesario considerar que la columna requiere una cantidad mayor de espumante debido a la altura presente en el equipo y que no presenta un comportamiento similar a la celda de flotación. Por esta causa fue necesario formular un destintante propio. Los destintantes analizados estaban compuestos de dos grandes tipos, estos son: alcoholes láuricos etoxilados y ácidos oléicos (etoxilados y no etoxilados).

Para la flotación en celda se encontró que el mejor agente destintante era una mezcla de un destintante lavador y un ácido graso. Sin embargo para la columna se encontró que el mejor destintante consistía en un ácido oléico etoxilado. Otros destintantes efectuaron muy bien su labor de colección de tinta, sin embargo el arrastre de pulpa fue excesivo y al considerar las pérdidas de ésta se decidió no considerarlos como un agente eficiente.

La dosificación se adecuó a los parámetros industriales utilizados, éstos oscilan entre los 4 y 8 kilogramos por tonelada de papel seco utilizado. Sin embargo la tendencia es a bajar estas dosificaciones con agentes más poderosos. Para este caso los valores encontrados en la dosificación del destintante encajan perfectamente en los intervalos ya previamente conocidos por lo que puede considerarse el experimento dentro de una aceptación normal.

Tabla 11. Variables analizadas en la celda de flotación para aplicarse a la columna

Variable	Valor propuesto	Valor propuesto	Valor propuesto	Valor escogido
Consistencia de pulpeo *	10%	7%	5%	5%*
Tiempo de pulpeo *	5 minutos	8 minutos	10 minutos	10 minutos*
Consistencia de flotación	5%	3.5%	1.8%	1.8%
Temperatura	25°C	45°C	55°C	45°C
pH	7	8	9	8
Agitación	900 RPM	1100 RPM	1200 RPM	1100 RPM
Tiempo de flotación	5-6 minutos	7-8 minutos	10-11 minutos	7-8 minutos

* prueba realizada fuera de la celda de flotación

Tabla 12. Dosificaciones utilizadas para la selección del destintante en la flotación por columna.

Destintante en pulpeo	Dosificación	Destintante en flotación	Dosificación	Blancura	Observaciones
SLP	4 kg/ton	-----	-----	-----	Se eliminó por exceso de espuma
SLP	4 kg/ton	Flotapol/diesel	8 kg/ton	60	
SLP	4 kg/ton	Flotapol/diesel	10 kg/ton	61	
WPS	5 Kg/ton	-----	-----	-----	Se eliminó por exceso de pulpa
	5 Kg/Ton	flotapol/diesel	8 Kg/ton	60	
	5 Kg/Ton	flotapol/diesel	5 kg/ton	59	
FPS	5 Kg/Ton	----	----	63	
Flotapol	5 Kg/ton			58	
R-46	5 Kg/ton	----	----	----	Se eliminó por exceso de espuma
OJI	5 Kg/ton	----	----	----	Se eliminó por falta de espuma

B) Experimentación en columna

Las pruebas de columna de flotación se iniciaron cuando se determinaron las variables químicas descritas anteriormente en la celda. Después de haber realizado el primer paso del procedimiento experimental se estableció la forma de trabajo para evaluar la eficiencia en la columna en el destintado.

Al inicio se observó el comportamiento de la flotación en la columna con pruebas de orientación y posteriormente se propuso un plan de trabajo mostrado en la Figura 14.

Este diagrama comprende desde desmenuzar en tiras en la mezcla de papel y posteriormente cortarlas en pequeños trozos de aproximadamente 2 cm^2 . Para la prueba de flotación en columna se escogió una mezcla de papel periódico u ONP (Old News Paper) y revista OMG (Old Magazine) en proporción de 50% y 50% para cada tipo de papel. Debido a que dicha mezcla es muy común en la práctica industrial mientras que la utilización singular de alguno de estos papeles prácticamente es nula, además esta proporción permite estudiar de manera amplia el efecto de la tinta base aceite (OMG) y la base agua (ONP).

B.1 Descripción de la columna

La columna a utilizar fue construida y diseñada para efectuar pruebas de flotación con minerales y se muestra en la Figura 14.

Este equipo se encuentra dentro de las instalaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, en el laboratorio de separación y concentración de minerales. Tiene una forma rectangular de 10 centímetros de cada lado, su altura es de 3.5 metros, cuenta con un sistema de lavado en la parte superior y una entrada de alimentación que puede ser variable en cuanto a su altura. Además la columna cuenta con distribuidores cerámicos de inyección de aire, que garantizan una eficiente entrada de burbujas pequeñas de aire. La columna está construida de material acrílico para visualizar el comportamiento de las burbujas y su interacción con las partículas de tinta.

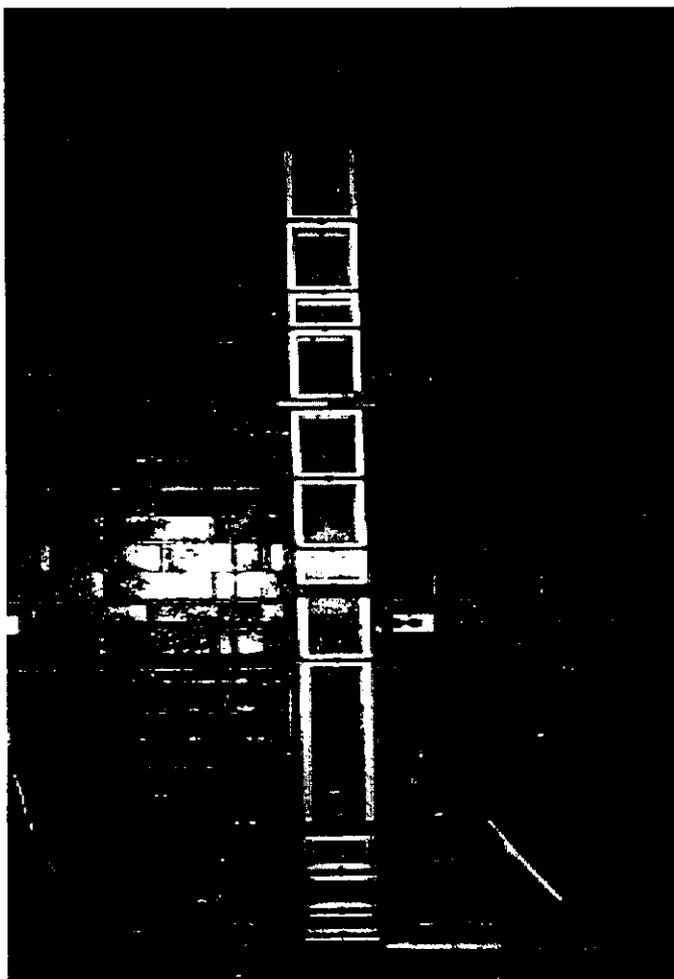


Figura 14. Columna de flotación utilizada para flotar tinta

Diagrama de flujo

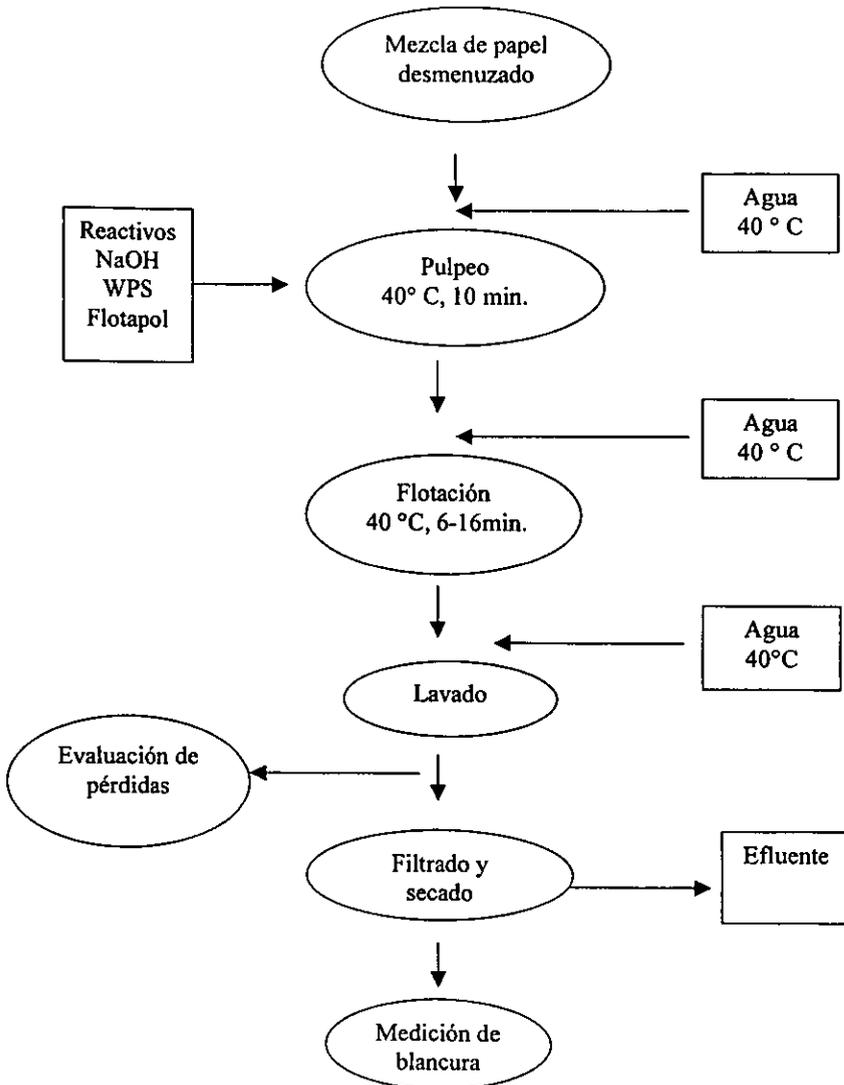


Figura No. 15 Diagrama de flujo del proceso de destintado por flotación en columna y lavado.

B.2) Pulpeo

Se colocó la mezcla de papel en un recipiente metálico y se desmenuzó con un equipo Wemco, este equipo pese a no ser el utilizado por TAPPI, (Technical Association of Pulp and Paper Industry), garantizó el mínimo daño de la pulpa. La función del pulpeo en una operación de destintado es desfibrar el papel y para separar las partículas de tinta de la fibra. Se agregó agua para obtener el 5% de consistencia de la pulpa, primero se agregaron tres cuartas partes del volumen de agua y posteriormente, después de 2 minutos de pulpeo inicial, se agregó el resto al recipiente contenedor del papel y los agentes destintantes a una dosificación de 5 kilogramos por tonelada de papel y NaOH a una concentración de 3.6 kg por tonelada de papel (cantidad requerida para estabilizar la mezcla a $\text{pH} \approx 9$). La adición en etapas de agua se debe a que el comportamiento de la mezcla es sumamente distinto cuando el papel está despulpado y cuando no lo está. Mientras que al inicio, cuando el papel no se ha humectado, el agua propicia una turbulencia excesiva que en vez de promover la homogeneidad de la mezcla, ocasiona que el agua salpique y se pierda del recipiente, al final de proceso la misma cantidad de agua promueve el mejor mezclado y la dispersión de la tinta y los agentes destintantes.

El agua se agregó a 40°C de temperatura, y se inició el pulpeo a 100 RPM por un tiempo de 10 minutos.

Este paso se realizó para cada una de las mezclas preparadas en las distintas pruebas con el objetivo de caracterizar las variables a estudiar. Dichas variables fueron:

- Tiempo de flotación
- Consistencia de flotación
- Cantidad de aire inyectado

B.3) Flotación en columna

Posteriormente se diluyó la pulpa a la consistencia elegida, se cargó la columna con agua primeramente para evitar la obstrucción de los inyectores de aire, se fijó el flujo de aire a estudiar, previamente se utilizó una bomba persitáltica con la que se determinó la velocidad del flujo de aire, y se cargó la pulpa. En todos estos procedimientos se buscó mantener la temperatura de la pulpa en los 40° C requeridos para la flotación

Posteriormente, se adicionó poco a poco en la columna la pulpa diluida a la consistencia a estudiar, la alimentación se realizó lo más rápido posible para lograr contar con todo el sistema estabilizado, se iniciaba la contabilización del tiempo en el momento en que la columna estaba completamente llena y se observaron los fenómenos ocurridos durante el proceso.

Poco a poco se retiraron muestras de papel a los primeros 6 minutos iniciales de la prueba y posteriormente cada 5 minutos, se separaron dos muestras, una muestra de pulpa para formar una hoja de papel y tomar lectura de blancura y otra muestra para ser llevada al lavado.

B.4) El lavado

El lavado se realizó a todas las muestras obtenidas durante el tiempo de flotación. Esto se realizó con el objetivo de analizar la influencia del lavado en un sistema de flotación en columna, era de esperarse un incremento de 4% en blancura entre un sistema sin lavado y uno con lavado después de la flotación. Se lavó tres veces en una criba de acero (malla 80), diluyéndose la pulpa en un recipiente a una consistencia de 1.0% y agitando en forma de zig zag para separar las últimas trazas de tinta.

B.5) Formación de hojas

La fabricación de hojas se realizó con un equipo Karl Schoröder D-6940 de Weinheim (medidor de finos), el cual tiene el mecanismo similar a la formadora de hojas de papel TAPPI. Ninguna muestra de hoja se secó en alguna mufla o estufa puesto que esto repercutiría drásticamente en la lectura de blancura, todas las hojas se secaron al aire.

B.6) Determinación de la blancura

La blancura se analizó en el Laboratorio de la Asociación técnica de la celulosa y Papel con dirección en Laffayet # 136 Col Anzures México D.F. Este valor fue determinante para realizar la discusión y conclusión del trabajo. La determinación de blancura se realizó en un lector tipo Technibrite el cual aplica el principio de reflexión de la luz, consiste en emitir un haz de luz blanca enviado a la hoja, el cual se refleja y es captado por un sensor, éste evalúa la diferencia entre la luz emitida y la recibida dependiendo de la opacidad de la muestra. La blancura es entonces una medida indirecta de cuanta luz refleja una hoja cuando se le hace incidir un haz lumínico.

B.7) Pérdidas

Para evaluar la cantidad de pulpa que fue arrastrada por las burbujas que contenían tinta en el momento de la flotación y que es considerada como pérdida se procedió a lo siguiente:

- Se recolectó la tinta separada en la columna y se almacenó en un recipiente
- Se separó la mayor cantidad de agua posible, evitando la filtración de finos
- Se tomó el material húmedo y se secó en una mufla, esperando hasta que todo se encontrara completamente seco.
- Se pesó la cantidad de material seco y se comparó con la cantidad inicial de mezcla de papel. Calculándose las pérdidas por diferencia.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este trabajo experimental, es necesario recordar que muchas de las variables analizadas y procedimientos realizados en el proceso minero metalúrgico de separación de minerales son similares para el destintado por flotación pero algunas no lo son como la blancura. Se analizaron los resultados con base en la blancura obtenida en cada hoja formada a partir de pulpa muestreada en ciertas condiciones de proceso. Dichos resultados se detallan a continuación en la Tabla No 13.

Tabla 13. Resultados experimentales en la columna de flotación

Equipo unidades	Consistencia %	Tiempo de flotación. min.	Aire Litros/ min.	Dosificación destintante kg / ton	Blancura en destintado. %	Blancura en Lavado post. %
Lavado	5%	8	-	6	50.6	54.9
C. Flotación	1.8%	5	-	4.7	56.3	57.3
Columna	1.5	10	.11	4.7	52.4	52.3
Columna	1.5	10	.22	4.7	53.7	55.8
Columna	1.5	10	.30	4.7	54.2	57.9
Columna	1.0	6	.30	4.7	55.7	55.9
Columna	1.0	11	.30	4.7	54.3	56.1
Columna	1.0	16	.30	4.7	55.5	56.5
Columna	0.5	6	.30	4.7	55.1	55.9
Columna	0.5	11	.30	4.7	55.6	56.2
Columna	0.5	16	.30	4.7	56.1	56.3
Columna	0.7	6	.30	4.7	56.4	57.2
Columna	0.7	11	.30	4.7	56.6	57.1
Columna	0.7	16	.30	4.7	56.6	57.4

A) El flujo de aire

La Figura 16, muestra la variación del porcentaje de blancura en función del flujo de aire inyectado en la columna, la gráfica tiene un comportamiento lineal, es decir, conforme la cantidad de flujo de aire aumenta, el porcentaje de blancura se incrementa. Esto se debe a que una mayor cantidad de burbujas formadas al incrementar el flujo de aire, ocasionan la formación de agregados burbuja - partículas de tinta. Arrastrándose estos a la superficie y separándose de la pulpa. La pulpa se libera de las partículas de tinta y se blanquea. El flujo de aire no se incrementó más debido a la formación de burbujas de diámetro mayor, al unirse varias microburbujas, por lo que éstas son tan grandes que no interaccionan con las partículas de tinta disminuyendo el destintado.

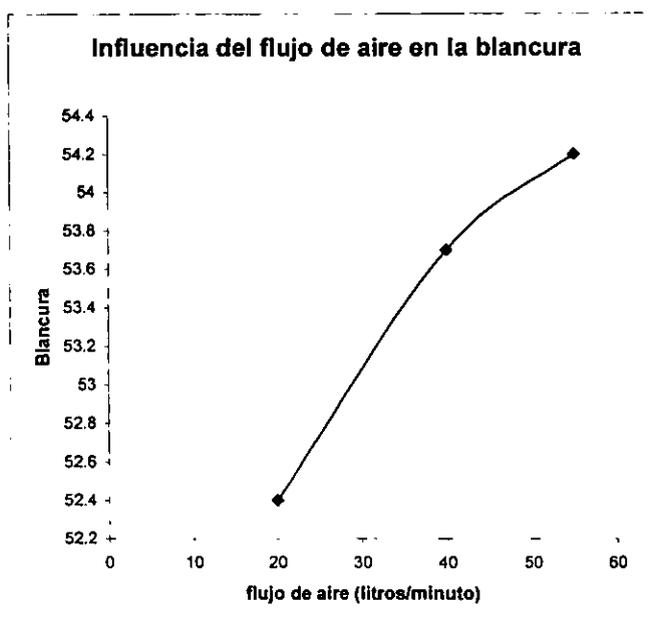


Figura 16. Efecto de la inyección de aire, manteniendo la $T=40^{\circ}\text{C}$ y consistencia de 1.5%

B) Consistencia.

En la Figura 17 se observa la variación del porcentaje de blancura en función de consistencia. El óptimo porcentaje de consistencia es de 0.7 %. Este resultado se debe al comportamiento que presenta el fluido a las condiciones de inyección de aire y agitación a las que se sometió. En las consistencias de 1.0% y 1.5% se observó mucha dificultad de las burbujas para recorrer el camino hacia la superficie donde se encontraba la espuma, este hecho afectó irremediablemente la recuperación de tinta. Para el caso de la consistencia de 0.5% el valor se vio afectado por la excesiva turbulencia a la cual se sometió el fluido, debido a que estaba demasiado diluída y la pulpa presente, no tenía la suficiente estabilidad para interactuar eficientemente con las burbujas de aire inyectadas en la columna, también este comportamiento es posible debido a una excesiva dilución del destintante.

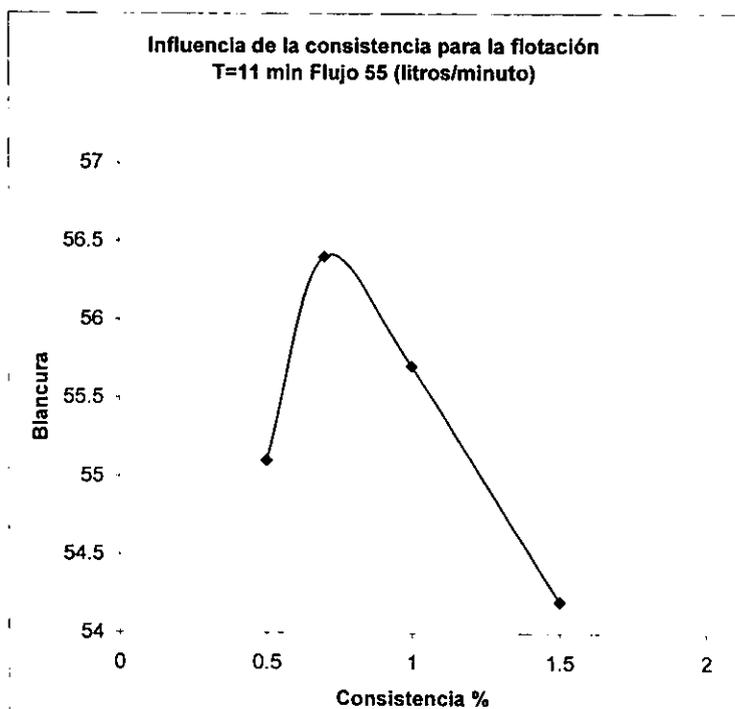


Figura 17. Influencia de la consistencia en la blancura

C) Tiempo de flotación

En la Figura 18 se observa la variación del porcentaje de blancura en función del tiempo de flotación a distintas consistencias. Se observa en ésta, que conforme se alcanza un mayor tiempo de flotación, la blancura mejora en 1% en promedio, pero para el valor de 0.7% de consistencia, la blancura no mejora sustancialmente. El tiempo de flotación se puede considerar bastante bueno, resultado de una aireación eficiente que permitió la rápida separación de tinta en la pulpa, también al observar que a la consistencia de 0.7% la blancura no presenta variación significativa, se refleja que es posible flotar en un tiempo de 6 minutos con buenos resultados. De esta manera el tiempo de flotación óptimo se obtiene como resultado del buen manejo de otras variables en el proceso tales como la consistencia y el flujo de aire.

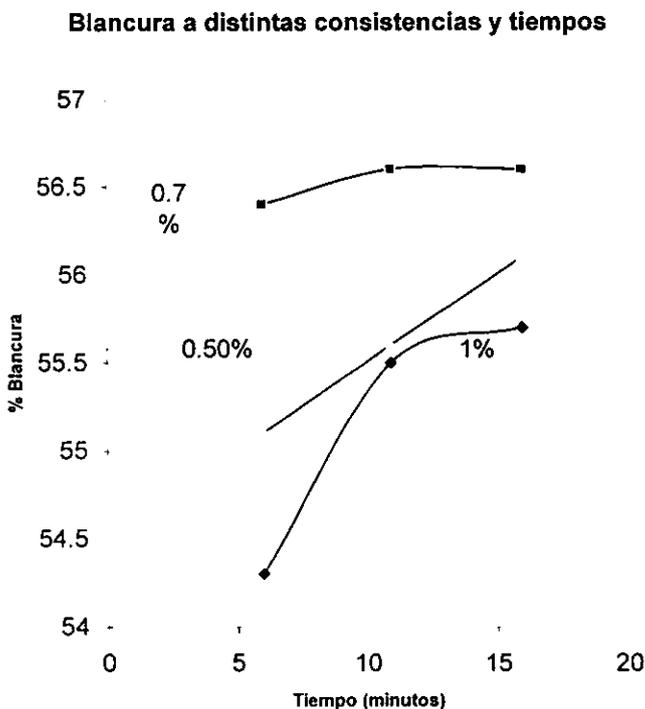


Figura 18. Blancura a distintos tiempos y consistencias.

D) La influencia del lavado posterior

En la Figura 19 se observa la variación del porcentaje de blancura en función del tiempo de flotación en la columna y con lavado posterior. El lavado posterior, utilizado en la mayoría de las industrias papeleras, es el último paso para destintado el papel. Para este estudio se observa en la Figuras 19 y 20 un efecto sustancialmente notorio cuando se mide la blancura de hojas formadas a partir el proceso de flotación y cuando se aplica flotación y posteriormente se lava la pulpa. Esto se debe a que las partículas de tinta de menor tamaño se separan con el proceso de lavado y la blancura aumenta por este motivo es recomendable que después de un proceso primario de destintado, se lave el material para eliminar completamente la tinta.

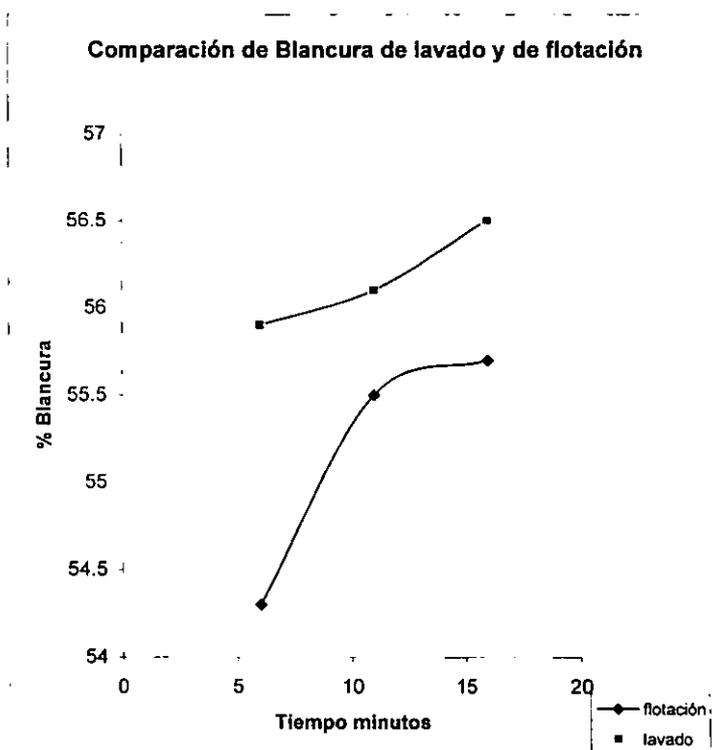


Figura 19. Comparación de Blancura para los procesos de lavado y flotación (Consistencia 0.7%)

E) Evaluación de pérdidas

Para la minería es muy importante contar con un balance metalúrgico que permita evaluar la cantidad de mineral recuperado a partir de la separación de dos productos. Para el destintado el proceso no se evalúa de esta manera debido a que, en primer lugar el proceso es denominado como flotación inversa donde la ganga corresponde a la pulpa destintada y la tinta al concentrado a separar, la tinta no tiene ningún valor económico y actualmente ningún interés de recuperación de esta se ha presentado. La tinta se tira junto con la pulpa que fue arrastrada inevitablemente debido al proceso hidrodinámico ocurrido al formarse los agregados de tinta - burbuja. Parte de la pulpa es llevada a la superficie y se separa junto con la tinta, esto sin duda es una pérdida de material.

En la Figura 20 se evaluó las pérdidas de material arrastrado con la tinta, en función de la consistencia en la flotación, señalando los valores de pérdida de material como función de las diferentes consistencias. El menor efecto de arrastre lo tiene la consistencia de 0.7%, donde la pérdida no es mayor al 10% del total. Para los valores de 1.0% y 1.5% la pérdida superó el 15%. Las pérdidas se deben a la respuesta del sistema de flotación a la manipulación del flujo de aire en combinación con el comportamiento hidrodinámico regido principalmente por la consistencia. El mejor valor de blancura obtenido también se encuentra en el intervalo de consistencia de 0.7%. Demostrando que, para este equipo de flotación. Se encuentran las mejores condiciones a una consistencia de 0.7%.

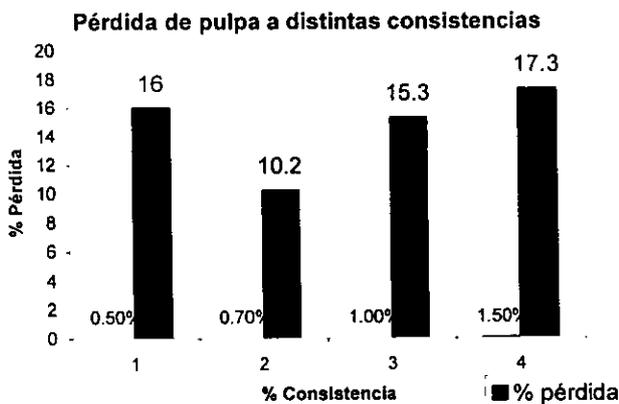


Figura 20. Pérdidas por efecto de arrastre de espuma a diferentes consistencias

F) La flotación en columna en comparación con otros procesos de destintado.

En la Figura 21 se observa el porcentaje de blancura que se obtiene a partir de un proceso de lavado, tanto por flotación en celda como en columna, en su forma primaria como con el lavado posterior. Los valores de la blancura para los procesos de flotación en columna y celda son muy similares, sin embargo mejoran aún más cuando se lava posteriormente, esto significa que el proceso de destintado de papel se complementa con un proceso de lavado posterior. La flotación tiene como principio el arrastre de partículas de tinta por burbujas ascendentes en un medio turbulento. El lavado por si solo presenta una gran desventaja contra cualquiera de los procesos de flotación estudiados en este trabajo ya que la separación de tinta es eficiente para tamaños de partícula de 5 micrómetros o menores, sin embargo para la mayoría de partículas (tamaño de partícula de 20 micrómetros en promedio) el mejor proceso de separación es la flotación. Además en el lavado es necesario agregar químicos blanqueadores para obtener los parámetros de blancura requeridos (58 -60%).

G) Influencia de la consistencia en el lavado posterior

En la Figura 22 se presenta la variación del porcentaje de blancura en función de la consistencia con lavado posterior. El lavado posterior no siempre presentó un comportamiento favorable para todos los casos, esto se demuestra al efectuar un comparativo entre las blancuras presentadas para diferentes consistencias en la flotación en columna y su lavado posterior. Para el caso de la consistencia de 0.5% la blancura en el lavado fue inferior a la blancura de flotación, esto puede atribuirse a una redepositación de tinta al momento de la flotación y que en el lavado no fue posible separar toda la tinta restante. Un proceso de flotación puede afectarse por una mala consistencia de flotación y esto tiene repercusiones posteriores como es este caso donde la blancura de flotación fue mala pero fue peor la de lavado aunque se esperaba resultados contrarios. La consistencia tiene que cumplir la función primordial de hacer comportar al fluido como se espera según el equipo.

Comparativo de Blancura para lavado, flotación y flotación con lavado posterior

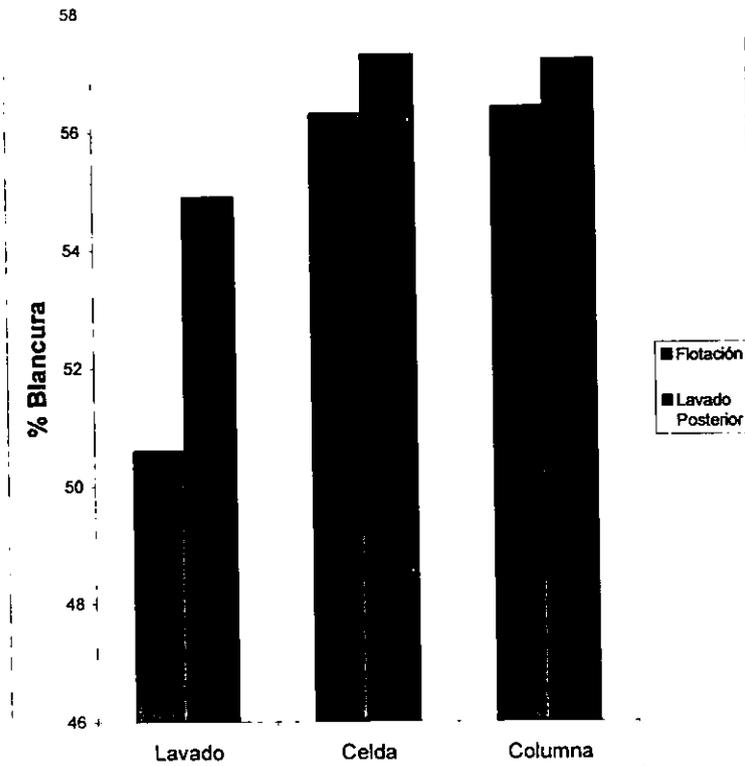


Figura 21 Blancura en los procesos de: lavado, flotación en celda y columna con lavado posterior.



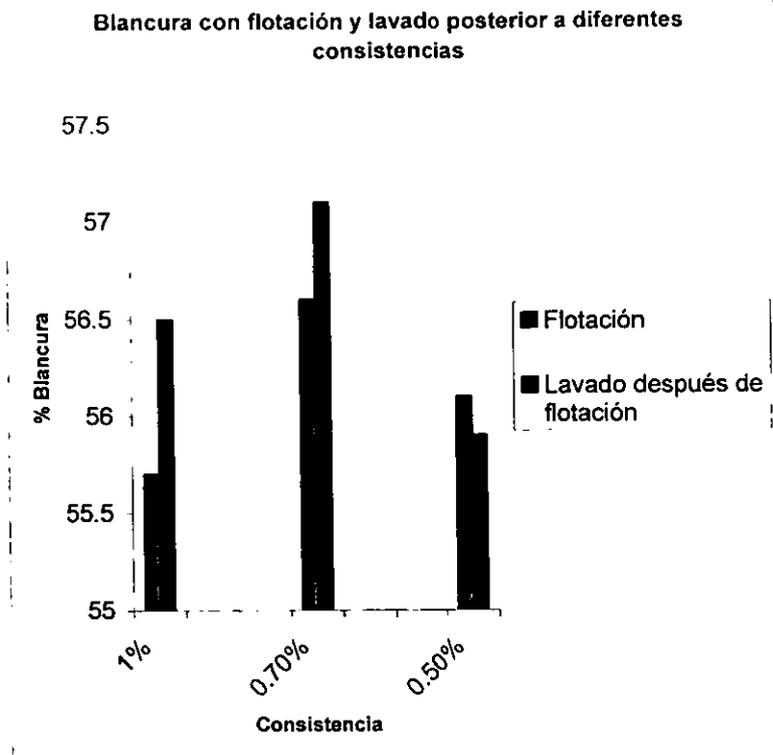


Figura 22. Blancura a diferentes consistencias en el proceso de flotación y lavado posterior

H) Otros factores

Es necesario señalar que para los equipos industriales que utilizan la flotación en sus procesos, la consistencia promedio utilizada es de 1.0%, el valor encontrado en este trabajo no se aleja en gran escala de este promedio, sin embargo es necesario considerar otros factores como los son la utilización de mayor volumen de agua y un volumen mayor del equipo industrial de flotación.

Por otro lado condiciones de proceso que también podrían ser estudiados y que influyen en la obtención de una mejor blancura son la altura de la alimentación y de la

columna, donde para valores elevados de podrían esperar resultados mejores. Sin embargo los efectos principales investigados en este trabajo son: la consistencia, el flujo de aire y el tiempo de flotación.

CONCLUSIONES

El trabajo efectuado permitió evaluar el proceso de destintado de papel mediante flotación en columna determinando los parámetros principales para este proceso.

Un estudio preliminar en celda de flotación contribuyó a obtener dichos parámetros de los que sobresalen: el tiempo de pulpeo (indispensable para homogeneizar la mezcla), la temperatura (donde se afirma que a mayor temperatura mayor destintado) y la dosificación de los reactivos químicos destintantes tales como el agente alcalinizante (NaOH) y el tensoactivo. De este último se concluye que los ácidos grasos etoxilados presentan una muy buena capacidad para colectar tinta, al mismo tiempo que generan el tipo de burbuja necesaria para separar las impurezas en la capa de espuma formada.

En la columna de flotación se determinó que la consistencia tiene una gran importancia para obtener una mayor blancura de papel y en este caso el valor óptimo fue de 0.7% y al realizar el lavado posterior la blancura correspondiente a ésta consistencia también fue alta. Del mismo modo, este resultado se confirmó al momento de evaluar las pérdidas de pulpa por arrastre de tinta, donde nuevamente a la consistencia de 0.7% se logró la mínima pérdida de pulpa.

Los porcentajes de blancura, para los procesos de flotación en celda y en columna fueron muy similares, pero las ventajas económicas y de espacio ocupado de la columna superan a las de la celda, debido a que el costo de operación de la columna se limita al costo de mantenimiento y de inyección de aire. Parámetros como la altura de la columna o la velocidad de alimentación serán investigados en futuros trabajos.

columna, donde para valores elevados de podrían esperar resultados mejores. Sin embargo los efectos principales investigados en este trabajo son: la consistencia, el flujo de aire y el tiempo de flotación.

CONCLUSIONES

El trabajo efectuado permitió evaluar el proceso de destintado de papel mediante flotación en columna determinando los parámetros principales para este proceso.

Un estudio preliminar en celda de flotación contribuyó a obtener dichos parámetros de los que sobresalen: el tiempo de pulpeo (indispensable para homogeneizar la mezcla), la temperatura (donde se afirma que a mayor temperatura mayor destintado) y la dosificación de los reactivos químicos destintantes tales como el agente alcalinizante (NaOH) y el tensoactivo. De este último se concluye que los ácidos grasos etoxilados presentan una muy buena capacidad para colectar tinta, al mismo tiempo que generan el tipo de burbuja necesaria para separar las impurezas en la capa de espuma formada.

En la columna de flotación se determinó que la consistencia tiene una gran importancia para obtener una mayor blancura de papel y en este caso el valor óptimo fue de 0.7% y al realizar el lavado posterior la blancura correspondiente a ésta consistencia también fue alta. Del mismo modo, este resultado se confirmó al momento de evaluar las pérdidas de pulpa por arrastre de tinta, donde nuevamente a la consistencia de 0.7% se logró la mínima pérdida de pulpa.

Los porcentajes de blancura, para los procesos de flotación en celda y en columna fueron muy similares, pero las ventajas económicas y de espacio ocupado de la columna superan a las de la celda, debido a que el costo de operación de la columna se limita al costo de mantenimiento y de inyección de aire. Parámetros como la altura de la columna o la velocidad de alimentación serán investigados en futuros trabajos.

BIBLIOGRAFÍA

1. Lepinnen Jakko, [new.htmnew.htm](#) [rese.htmrese.htm](#) [gandb2.htmgandb2.htm](#)
2. [www.paperonweb.com/dic/1/.html#d](#)
3. [www.treecycle.com/paper/option.html](#)
4. [www.pashop.org/dnr/p2ad/publicatios/pulp/page2.html](#)
5. [www.conservatree.com/Gppapercontents.html](#)
6. [www.ekanobel.com](#)
7. Luigi Silveri, 1996. "Reciclado de papel, propiedades de la pulpa y características de la fibra reciclada". ATPC (Asociación Mexicana de Técnicos de la industria de la Celulosa y el Papel) mayo/junio, pp. 6-20
8. Ramírez, P. R, 1997. "Aplicación de agentes alcalificantes en el destintado del papel periódico" ATPC, Mayo/junio pp. 6-24
9. Muammer Kaya et al, 1995. "Waste paper deinking by froth flotation", Proceedings of the XIX IMPC (International Mineral Processing Congress). Vol 4 Precious metals processing & mineral waste and environment. San Francisco, CA. E.U. pp. 167-170
10. Jules J. Magda. et al, 1999. A critical examination of the role of ink surface hydrophobicity in flotation deinking Vol 82 No.3 TAPPI (Technical Association for Pulp and Paper Industry) Journal. pp.139-145
11. D Tse et al, 1998. "Part II: Optimun washing sub-system selection for a single- loo ONP/OMG deinking plant", Pulp & Paper Journal, Vol III pp.40-47
12. Seifert Peter, 1994. "Recent innovations in paper recycling", TAPPI Journal Vol 77 No 2, pp. 149-152
13. López Aburto Víctor, 1987. "Apuntes de procesos de concentración de minerales". Facultad de Ingeniería, UNAM. México.
14. Mcketta 1990.. "Enciclopedia of chemical processing and design, Adsorption" Prentice Hall Vol 1. EUA pp 175-176

15. Quarterly Newsletter, 1999. Published by Doshi & Associates Inc, Paper Recycling Technology, electronic journal, Vol. 5, No. 2, abril.
16. Quarterly Newsletter, 2000. Published by Doshi & Associates, Inc. Paper Recycling Technology, electronic journal, Vol. 6, No. 1, enero.
17. Heindel Theodore, 1999. "Fundamentals of flotation deinking", TAPPI Journal, Vol 82. No 3, pp.115-124
18. www.tappi.org
19. TAPPI, 1994. "Test Methods" Consistency (concentration) of pulp suspensión, norma T240 OMN-96 L4,TAPPI, EUA
20. Carrasco et al, 1999. "Deinking of high-quality offset paper: Influence of consistency, agitation, speed, and air flow rate in the flotation stage". TAPPI journal Vol 82 No 3 pp. 125-129
21. www.ekachemicals.com/products/flotation
22. www.eldoradochem.com/products/dic/00pb.html
23. M.H. Jones , 1984. "Principles of mineral flotation", the work symposium,
24. H. Cordes, 1998." Development of pneumatic flotation cells to their present day status". Aufbereitungs Technik Vol 3 .pp.69-79
25. Mex.Pat. No. 176599 (1994) Columna de Flotación U.N.A.M.
26. Britz Herbert, 1995. "Flotationsdeink-Grundlagen und Systemeinbindung" Erzmeall Ed GDMB pp.413-420
27. Celaya Torres Jaime, 1992. "Efecto del aire retenido en una columna de flotación", Tesis ESIQIE ,IPN, México
28. Cámara Nacional de la industria de la celulosa y el papel, Memorias estadísticas, México, 1999.
29. Ferguson, Loreen, 1992. "Deinking chemistry", Course of paper technology, TAPPI, Atlanta Ga., EUA.
30. Winnacker Kùchler, Chemische technologie, Vol. 4, Metalle, Ed Hanser, Deutschland,1986, pp 83.
31. Sastry K.V.S. 1988. Column flotation 88' Proceedings of an International Symposium on Column Flotation. SME. Annual Meeting, Phoenix Arizona. Enero 25-28, pp. 38- 41

ANEXO

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA	PÁGINA
1.Comparación de las tintas base agua y aceite	18
2A. Eficiencia de separación de tinta por tamaño de partícula ,2B Diagrama de flujo en un proceso de lavado	21
3A. Efecto del proceso de pulpeo en la separación de tinta 3B representación general de la flotación	22
4. Diagrama de flujo de una planta recicladora de papel	24
5. Todas las partículas dentro de la zona de línea de flujo de radio R_c , deberán ser capturadas por la burbuja de aire	35
6. Descripción general del paso de atrapamiento por deslizamiento	37
7. Todas las partículas dentro de la línea de flujo de radio R_{crit} , se adherirán a la burbuja mediante deslizamiento.	38
8. Contacto de triple fase entre la burbuja, partícula y la región líquida.	38
9. Fuerzas estabilizadoras y desestabilizadoras que actúan en una burbuja cargada de tinta	40
10. Variación de la destintabilidad (%) en función del tiempo de flotación a diferentes velocidades de agitación	43
11. Celda neumática tipo Bahr	53
12. Esquema de la columna abierta de flotación	57
13. Celda de flotación tipo Denver utilizada en pruebas de flotación de tinta	59
14. Columna de flotación utilizada para flotar tinta	67
15. Diagrama de flujo del proceso de destintado por flotación en columna y lavado	68
16. Efecto de la inyección de aire, $T= 40^\circ C$ y $C= 1.5\%$	73
17. Influencia de la consistencia en blancura	74
18. Blancura a distintos tiempo y consistencias	75

19. Comparación de blancura de lavado y flotación	76
20. Pérdidas por efecto de arrastre de espuma a diferentes consistencias	77
21. Blancura en los procesos de: lavado, flotación en celda y columna con lavado posterior	79
22.- Blancura a diferentes consistencias en el proceso de flotación y lavado posterior	80

ÍNDICE DE TABLAS	PÁGINA
1.- Propiedades de los contaminantes que hacen posible su eliminación de la fibra de reciclado	14
2. Operaciones necesarias para la eliminación de contaminantes en la fibra reciclada	16
3. Composición general de las tintas de impresión	17
4. Tipos de tinta y sus propiedades	18
5. Espectro de tamaño de partículas de tinta y sus usos	19
6. Comparación característica del proceso de lavado y flotación	25
7. Comparación de flotación en minería y papel	33
8. Principales reactivos destintantes de papel	45
9. Distintos tipos de destintantes	46
10. Comparación de propiedades en la celda y columna de flotación	56
11. Variables analizadas en la celda de flotación para aplicarse a la columna	64
12. Dosificación utilizadas para la selección del destintante en la flotación en columna	65
13. Resultados experimentales de la columna de flotación	72