



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTONOMA DE MEXICO



Facultad de Estudios Superiores  
"Cuautitlán"

"RECUPERACION DEL AGUA UTILIZADA EN LA LIMPIEZA DE  
VIRUTAS DE ALUMINIO CONTAMINADAS CON ACEITES PARA  
CORTE"

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE,  
INGENIERO QUIMICO  
P R E S E N T A,  
JOSE LUIS RUBIO MILLAN

ASESOR: I. Q. MARGARITA ALONSO ESPINOZA

CUAUTITLÁN, IZCALLI, EDO. DE MEX.  
**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**

1993



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **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 está 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.

# INDICE

	Pag.
1. RESUMEN	1
2. INTRODUCCION	2
3. LISTA DE TABLAS Y FIGURAS	4
4. OBJETIVOS	6
5. CONCEPTOS GENERALES	7
IMPORTANCIA DE RECICLAR ALUMINIO	7
ACEITES INVOLUCRADOS	8
EMULSIONES	9
6. ALTERNATIVAS PARA LA LIMPIEZA DE VIRUTAS CONTAMINADAS CON ACEITES PARA CORTE	12
6.1 SECADO	13
6.2 CENTRIFUGACION	14
6.3 REMOCION POR SOLVENTES	16
7. ALTERNATIVAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACEITE	17
7.1 COAGULACION Y FLOCULACION	18
7.2 ADSORCION	29
7.2.1 UTILIZACION DEL SPHAGNUM PEAT	29
7.2.2 RESINAS DE ADSORCION POLIMERICAS	32
7.2.3 CARBON ACTIVADO	33
7.3 FLOTACION	34
7.3.1 FLOTACION NATURAL	34
7.3.2 FLOTACION CON GAS	34
7.4 MEMBRANAS	44
7.4.1 OSMOSIS INVERSA	44
7.4.2 ULTRAFILTRACION	46
7.5 SEPARACION ACEITE-AGUA, MEDIANTE LA ACCION DE CORRIENTE ELECTRICA	50
7.5.1 CELDAS ELECTROLITICAS	50
7.5.2 COALESCENCIA ELECTROSTATICA	52
7.5.3 ELECTROFLOTACION	54

	Pag.
8. DESCRIPCION DEL PROCESO	56
8.1 LIMPIEZA DE VIRUTAS	56
8.2 TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL	61
9. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS	66
9.1 LIMPIEZA DE VIRUTAS	66
9.2 TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL	77
9.3 COSTOS DE OPERACION	87
10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	89
11. REFERENCIA BIBLIOGRAFICA	91

# 1 RESUMEN

## **1. RESUMEN**

*Las virutas de aluminio contaminadas con aceites para corte, son producto del fresado y torneado del aluminio mismo. Dichas virutas se someten a un proceso de limpieza con agua, detergente y aire como medio de agitación. El agua residual se trata por coagulación y floculación para su reciclamiento.*

# 2 INTRODUCCION

## 2. INTRODUCCION

El torneado y fresado de metales produce gran cantidad de virutas. Dentro de esos metales encontramos al aluminio, que tiene diversas aplicaciones, debido a sus propiedades físicas. El reciclado de aluminio chatarra, en donde se incluye a las virutas de aluminio, ha crecido en gran medida, a causa de dos grandes beneficios: ahorro de energía y no generación de mas basura. Se ahorra energía, debido a que el reciclamiento de desperdicio de aluminio requiere solo un 5% de la energía requerida para obtener aluminio puro a partir del mineral.

El reciclar virutas de aluminio contaminadas con aceites de corte directo o aceite soluble en agua causa un gran problema de contaminación ambiental. La contaminación involucra la producción de humos negros (bióxido de carbono principalmente); cenizas; e irradiación de calor, al formarse flama de gran altura durante la fusión de las virutas. La flama producida causa problemas de salud y de operación al personal que opera el proceso.

El reciclado de virutas es rentable, pero esto no abate en ninguna forma el problema de contaminación. Por lo tanto, es necesario someter a las virutas de aluminio a un proceso de limpieza, con el objeto de eliminar el aceite de las mismas y así, al momento de fusionarlas no se presente contaminación al medio ambiente en gran medida. En el proceso de limpieza se inyecta aire a un recipiente que contiene a las virutas, agua y detergente industrial. La agitación y el detergente contribuyen grandemente a la emulsificación casi total de aceite y agua. La emulsión de aceite favorece para que éste no se adhiera a las virutas; el aceite no emulsionado queda finamente disperso en el agua después de la agitación, esto se aprovecha para retirar las virutas del recipiente, llevando consigo poco aceite adherido.

La solución al problema de contaminación por concepto de la fusión de las virutas nos conduce a la obtención de agua residual contaminada con aceite.

La SEDESOL normatiza la calidad del agua residual hacia el alcantarillado. Uno de los parámetros que determinan dicha calidad es el contenido de aceites y grasas. El agua residual producto de la limpieza ya referida contiene aceites y sobre todo emulsionados.



Las grasas y aceites son constituyentes nocivos de las aguas negras, pues se precipitan en ellas y obstruyen los intersticios del material filtrante, formando una espuma objetable en los depósitos y corrientes, y aunque las grasas son compuestos de carbono, no se oxidan con facilidad. En otras palabras, las grasas y aceites forman una capa en la superficie del agua residual, impidiendo el acceso del aire y por lo tanto del oxígeno hacia el interior del agua. El oxígeno es esencial para el proceso aeróbico llevado a cabo por los microorganismos existentes en las aguas negras. La ausencia del oxígeno provoca la muerte de esos microorganismos, con su subsecuente putrefacción. Lo anterior causa olores desagradables y por supuesto contaminación ambiental.

La solución al problema de contaminación de aguas negras con aceites se logra mediante un tratamiento vía coagulación, así el tratamiento al agua residual con aceite nos conduce a dos beneficios importantes: se reduce la contaminación de aguas negras con aceites y se reutiliza el agua tratada.

El tratamiento del agua residual se lleva a cabo por coagulación utilizando sulfato de aluminio e hidróxido de sodio, seguida de la floculación con poliacrilamida de nombre comercial AP-30, con lo cual se alcanza una separación efectiva del agua y lodos que contienen precipitados de aluminio y aceite.

El agua tratada se utiliza nuevamente en la limpieza de virutas. Claro está que el tratamiento del agua residual impuesto debe proveer agua tratada con la calidad suficiente para poder reciclarla. A la larga, el agua alcanzará cierta concentración de compuestos, que harán ineficaz su reutilización. En este caso, si el agua cumple con las normas impuestas por la SEDESOL, entonces se dirigirá hacia el alcantarillado, de lo contrario tendrá que ser sometida a otro u otros procesos de tratamiento para su reutilización o dirección al alcantarillado.

Ambos procesos, limpieza de virutas de aluminio y tratamiento del agua residual, están soportados por el estudio teórico y experimental. Dichos procesos se optimizan con el fin de reducir el consumo de materias primas y por lo tanto los costos. Lo anterior ocasiona que el proceso de reciclamiento sea económicamente factible.

# 3 LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

### 3. LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

FIGURA	NOMBRE
6.1	Secado De Virutas
6.2	Esquema Del Movimiento De Sólidos Y Líquido En Una Centrifuga
7.1	Sistema De Flotación De Tres Fases
7.2	Flotación Con Gas Disuelto
7.3	Flotación Con Gas Disperso, Tipo Eductor
7.4	Principio De Osmosis Inversa Y Ultrafiltración
7.5	Principio De Funcionamiento De Los Módulos de Membrana
7.6	Esquema De La Celda Electrolítica
7.7	Esquema De La Celda Para Electroflotación
8.1	Diagrama De Bloques, Limpieza De Virutas Y Tratamiento Del Agua Residual
8.2	Esquemas Del Equipo Utilizado
	<b>Lavados De Viruta Con Aceite De Corte Directo</b>
9.1	No. De Lavados vs. Aceite Removido (g)
9.2	No. De Lavados vs. % Remoción De Aceite
9.3	No. De Lavados vs. Conc. De Detergente (g/l)
	<b>Lavados De Viruta Con Aceite Soluble</b>
9.4	No. De Lavados vs. Aceite Removido (g)
9.5	No. De Lavados vs. % Remoción De Aceite
9.6	No. De Lavados vs. Conc. De Detergente (g/l)

TABLA	NOMBRE
I	Métodos Más Importantes De Separación Por Membrana
9.1	Virutas Con Aceite De Corte Directo (Resultados Promedio)
9.2	Virutas Con Aceite Soluble (Resultados Promedio)
9.3	Tratamiento Del Agua Residual Producto De La Limpieza A Virutas Con Aceite De Corte Directo (Optimización)

- 9.4 Tratamiento Del Agua Residual Producto De La Limpieza A Virutas Con Aceite Soluble (Optimización)
- 9.5 Tratamiento Del Agua Residual Producto De La Limpieza A Virutas Con Aceite De Corte Directo (Ajuste)
- 9.6 Tratamiento Del Agua Residual Producto De La Limpieza A Virutas Con Aceite Soluble (Ajuste)
- 9.7 Caracterización Del Agua Residual Tratada.

# 4 OBJETIVOS

#### 4. OBJETIVOS

El trabajo experimental y el estudio teórico son las bases con las cuales se persiguen los objetivos siguientes:

- Remoción mínima o máxima del 90% de aceite de las virutas de aluminio.
- Tratamiento del agua residual más adecuado que nos conduzca a la recuperación de agua con la calidad aceptable para su reciclamiento.
- Minimizar el uso de materias primas para la limpieza del metal y tratamiento del agua residual con el fin de reducir costos.

El cumplimiento de los anteriores objetivos nos conduce a alcanzar la meta de los siguientes:

- Disminuir considerablemente la contaminación al medio ambiente y flama intensa durante la fusión de las virutas de aluminio contaminadas con aceite de corte directo o aceite soluble.
- Aumentar el rendimiento del proceso de fusión de las virutas de aluminio.
- Hacer económicamente factible el proceso de reciclamiento de desperdicio de aluminio, incluyendo la limpieza del metal y tratamiento del agua residual.

# 5

## CONCEPTOS GENERALES

## 5. CONCEPTOS GENERALES

### Importancia De Reciclar Aluminio

México es un consumidor neto de materiales base de la producción de artículos de aluminio, ya sean bauxita o metal, porque no cuenta con depósitos de mineral. En 1989 alrededor del 35% del consumo de aluminio se producía a partir del mineral importado, 30% se introducía al país en forma de lingote y productos terminados y el resto se importaba como chatarra principalmente de los Estados Unidos de América. Estas proporciones deben de haber cambiado, incrementándose la fracción de chatarra y lingote importado.

Por otra parte la producción de aluminio primario está siempre fuertemente relacionada con el aspecto energético, debido a que los requerimientos termodinámicos de energía para la reducción de alúmina son altos. Esto a su vez determina la importancia de la recirculación de metal ya fundido, pues es un hecho conocido que la producción de nuevas aleaciones y piezas de aluminio a partir de chatarra requiere solo un 5% de la energía que se necesita cuando se parte del mineral. Así, importar aluminio en lingote o en chatarra equivale a una importación neta de energía.

De aquí que la mayor parte de los trabajos en la industria y de los nuevos desarrollos esten enfocados a la minimización de consumo de energía.

Un aspecto que no se ha estudiado con la debida profundidad, en nuestro país al menos, es el efecto de los patrones de consumo de aluminio sobre la cantidad y el tipo de chatarra producida, así como su interrelación con los comerciantes de chatarra y las reglamentaciones del gobierno. Es bien conocido por compañías dedicadas al reciclaje de desperdicio metálico, siderúrgicas, de embalaje, etc., el impacto positivo que tuvo sobre la recirculación de latas de aluminio en E.U.A. la reglamentación del gobierno en conjunto con los centros comerciales. La cantidad de aluminio recirculado alcanza alrededor del 50%. Además, el medio ambiente resulta beneficiado en forma doble: se evita generar mas basura y se ahorra en consumo de energía.

[1]

Las virutas de aluminio se consideran aluminio chatarra, provenientes de cortes hechos al aluminio en máquinas de corte como tornos, fresadoras, ó taladros, en donde se



utiliza aceite de corte directo o aceite soluble en agua; los cuales tienen la función de lubricar y refrigerar dicho corte, de aquí que se obtengan esos desperdicios metálicos sucios de aceite.

Las virutas se reciclan, es decir, se funden para obtener lingotes de aluminio de pureza aceptable. Si la fundición se lleva a cabo con el porcentaje en peso de aceite que contienen las virutas, se causaría entonces, contaminación al medio ambiente y flama intensa.

#### **Aceites Involucrados**

Los aceites más comunmente utilizados en las máquinas de corte, son los aceites solubles en agua y los aceites de corte directo (insolubles en agua).

Ambos aceites son derivados del petróleo, es decir, aceites minerales que generalmente vienen acompañados de aditivos, los cuales modifican las propiedades de los primeros haciendo que adquieran aplicaciones específicas.

Existe una gran variedad de aditivos, pero para nuestro interés solo mencionamos los que contienen los aceites utilizados para el corte.

Los aceites solubles son emulsiones aceite en agua. Se preparan mezclando el aceite mineral que contiene en 3 y 20% de emulsivo, como lo son jabones solubles en agua, alquilsulfonatos, arilsulfonatos, etc., mezclados con agentes de copulación adecuados (como glicoles o éteres de glicoles) y con la cantidad deseada de agua.

Los aceites de corte directo son hidrocarburos como el etileno, propileno y butileno polimerizados (y en ocasiones miembros mas grandes de las serie) de peso molecular comprendido entre 250 y 50000. Dentro de los aditivos más comunmente empleados se encuentran los siguientes:

(a) Lubricantes de película límite: ácidos grasos y sus derivados, especialmente jabones metálicos multivalentes, y alcoholes de cadena larga.

(b) Depresores de espuma: derivados de xiloxano, glicoles o glicerol.

(c) Agentes para presiones extremas: ésteres, cetonas, compuestos orgánicos que contienen azufre, cloro, plomo o combinaciones de ellos.

(d) Emulsivos: sales de metales alcalinos, de ácidos carboxílicos y sulfónicos, monoésteres de alcoholes polivalentes, alcoholes-éteres, sales de aminas de cadena larga.

[2]

### **Emulsiones**

Las aguas residuales producidas con la técnica utilizada para la limpieza de las virutas se obtiene emulsionada. Por lo tanto es de gran interés comprender los conceptos básicos referentes a emulsiones para facilitar el tratamiento al agua residual.

Una emulsión es un sistema disperso en el que las fases son líquidas no miscibles o parcialmente miscibles. Los glóbulos del líquido dispersado son generalmente entre 0.1 y 10  $\mu$  de diámetro y por tanto, mayores que las partículas que constituyen los soles.

En casi todas las emulsiones, una de las fases es acuosa y la otra es un aceite, en el sentido mas amplio de la palabra. Si el aceite es la fase dispersa, la emulsión se denomina emulsión aceite en agua (O/W = OIL/WATER), si el medio acuoso es la fase dispersa, la emulsión será de agua en aceite (W/O). Hay varios métodos para identificar el tipo de emulsión:

- 1). Generalmente, una emulsión O/W tiene una textura cremosa y las emulsiones W/O tienen un tacto graso.
- 2). La emulsión se mezcla fácilmente con líquidos que son miscibles en el medio de dispersión.
- 3). Las emulsiones se colorean con facilidad con tintes que son solubles en el medio de dispersión.
- 4). La conductividad eléctrica generalmente es mucho mayor en emulsiones O/W que en W/O.

Probablemente la propiedad física más importante de una emulsión es su estabilidad. El término estabilidad de la emulsión se utiliza con frecuencia en relación con dos fenómenos esencialmente diferentes, que son: (a) formación de nata o sedimento, y (b) la destrucción de la emulsión debida a la coalescencia de las gotículas.

Si se prepara una emulsión homogenizando dos líquidos puros, la separación de fases de los componentes será generalmente rápida, especialmente si la concentración de la fase dispersa es un poco alta. Para obtener emulsiones razonablemente estables hay que tener un tercer componente,

un agente emulsionante (ó emulsivo). Las sustancias que son más efectivas como agentes emulsionantes se pueden clasificar como: (1) sustancias con actividad superficial, (2) materiales de origen natural y (3) polvos finos de sólidos.

Las funciones de un agente emulsionante son facilitar la formación de la emulsión y promover la estabilidad de la misma. Estos agentes forman una película adsorbida alrededor de las gotitas dispersadas que contribuyen a evitar la floculación y la coalescencia. El mecanismo de estabilización es generalmente complejo y puede variar de un sistema a otro.

Los factores que favorecen la estabilidad de una emulsión dependen de la naturaleza del agente emulsionante y de la elección apropiada de las condiciones de formulación y manufactura. A continuación se mencionan algunos de ellos:

1. Tensión interfacial baja. La adsorción de un surfactante en una interfase aceite-agua produce una disminución de la energía interfacial, con lo cual se facilita el desarrollo y favorece la estabilidad de las grandes áreas interfaciales asociadas con las emulsiones.

2. Una película interfacial mecánicamente fuerte. Los sólidos pulverizados para los que el ángulo de contacto es entre 0 y 180° tienden a acumularse en la interfase aceite-agua donde le dan estabilidad a la emulsión.

3. Viscosidad alta. Una viscosidad alta retrasa sencillamente las velocidades de formación de nata, coalescencia, etc.

4. Repulsiones de doble capa eléctrica, volumen relativamente pequeño de la fase dispersa y tamaños de partícula pequeños.

El tipo de emulsión que se forma cuando se homogeniza un par dado de líquidos inmiscibles, depende de:

(1) Relación de volúmenes de las dos fases: cuanto mayor sea el volumen de la fase, mayor es la probabilidad de que sea el medio de dispersión.

(2) Naturaleza del agente emulsionante: los jabones de metales alcalinos favorecen la formación de emulsiones O/W, mientras que los metales pesados contribuyen a la formación de emulsiones W/O. Las primeras, estabilizadas por jabones de metales alcalinos, pueden romperse fácilmente e incluso

invertir a emulsiones W/O si se les añaden iones de metales pesados.

La teoría de la cuña orientada dice que para alcanzar una densidad interfacial máxima, el extremo de moléculas de emulsionante con actividad superficial que tiene la sección transversal mayor, debe estar orientado hacia el medio de dispersión. Así los jabones monovalentes tienden a dar emulsiones O/W y los polivalentes W/O. Sin embargo, la teoría no es del todo consistente con los resultados experimentales, puesto que algunos jabones monovalentes (por ejemplo jabones de plata) tienden a dar emulsiones W/O.

El tipo de emulsión que tenderá a formar un emulsionante depende del equilibrio entre sus propiedades hidrofílicas y lipofílicas; los jabones de metales alcalinos favorecen la formación de emulsiones O/W porque son más hidrofílicos que lipofílicos, mientras que con los jabones de metales pesados ocurre lo contrario.

La naturaleza anfifílica de muchos agentes emulsificantes, especialmente surfactantes no iónicos, puede expresarse en términos de una escala empírica de números llamados BHL (iniciales de las palabras balance hidrofílico-lipofílico). Los surfactantes menos hidrofílicos tienen los números BHL más bajos.

[3]

En los aceites para corte se presenta un equilibrio hidrofílico-lipofílico N-H; es decir, equilibrio neutro-ligeramente hidrofílico. Este tipo de emulsión es sensible a ácidos, sales, álcalis ó a agentes catiónicos. Esta es una base muy importante con la cual se parte para el tratamiento del agua residual contaminada con aceites para corte.

[2]

En muchos casos, lo que es importante desde un punto de vista práctico es la destrucción de una emulsión (ó desemulsificación).

Para acelerar la destrucción de emulsiones se utilizan comercialmente varias técnicas. Los métodos mecánicos incluyen la separación por centrifugación, destilación y filtración. Otro método se basa en el principio de acción antagonista; es decir, la adición de emulsivos que producen emulsiones O/W tienden a destruir las emulsiones W/O, y al contrario.

Las emulsiones también pueden romperse aplicándose campos eléctricos intensos, en cuyo caso los factores principales que intervienen son la electroforesis en el caso de emulsiones O/W y la deformación de gotículas en el caso de emulsiones W/O. Además se tienen los tratamientos químicos como la coagulación entre otros.

[3].

# 6 ALTERNATIVAS LIMPIEZA DE VIRUTAS DE ALUMINIO

## 6. ALTERNATIVAS PARA LA LIMPIEZA DE VIRUTAS CONTAMINADAS CON ACEITES PARA CORTE

En gran cantidad de industrias de materias primas se observa una recuperación de estas materias a partir de objetos de uso. Se conocen los ejemplos de las industrias del cobre, acero, estaño, papel, etc. El aluminio sigue esta regla general y, así, en algunos países con escases de minerales, la industria de la recuperación ha sido floreciente siempre.

Aunque el término chatarra es peyorativo, es preciso señalar que engloba, en la metalurgia del afino, materias muy apropiadas, tales como virutas del torneado y fresado, recortes de todos los productos, etc.

Dentro de toda la chatarra a procesar hay siempre un tratamiento previo a ésta para obtener un producto de buena calidad. El tratamiento que se les da a las virutas es fundamentalmente para la separación de aceites y hierro.

Se sabe que las formas de las virutas de las aleaciones es función de su composición. Las aleaciones de resistencia proporcionan virutas cortas y rotas, el aluminio poco aleado virutas largas y rizadas. Las virutas de una aleación de fundición están mas fragmentadas que las de una aleación de forja. La forma de la viruta es un factor importante al momento de aplicar cierta técnica de limpieza de éstas.

Los elementos que han de buscarse primeramente en un lote de virutas son: el hierro libre y el aceite de corte o el aceite soluble, puesto que estos elementos sin valor determinan el precio de compra de la viruta.

La preparación de las virutas comprende después del control a la llegada, una operación de preselección, para retirar eventualmente los sifones, pedazos de recortes o de piezas, etc.

La extracción del hierro libre se hace por selección magnética con un tambor electromagnético o imanes permanentes que trabajan por extracción o desviación. Esta selección magnética no es eficaz, mas que cuando las virutas están bien secas y fragmentadas. Efectivamente, si la viruta está aceitada, la partícula de hierro permanece en su interior.

[4]

## 6.1 Secado

El agua y el aceite se eliminan por secado en un horno que está constituido por un tambor rotatorio ligeramente inclinado. Un quemador axial, colocado en el lado de salida de las virutas alcanza temperaturas de 150 a 200 °C, y se regula por admisiones de aire en el cilindro según el caudal y las cantidades de aceite contenidas en las virutas, teniendo en cuenta los riesgos de inflamación y algunas veces de explosión. Este horno debe completarse con dispositivos de lavado y quemado de los vapores de aceite y decantación de las partículas de aluminio arrastradas. El siguiente esquema (fig. 6.1) representa el equipo utilizado.

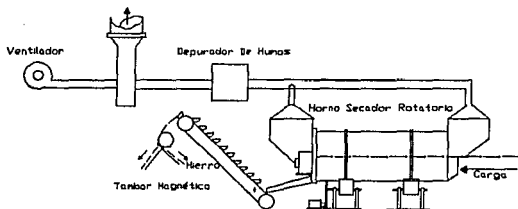


Fig. 6.1 Secado De Virutas

Algunas fábricas evitan vaporizar todos los aceites de corte y aceites solubles contenidos en las virutas, insertando entre la trituration y el secado una batería de centrifugadoras. A título informativo la humedad de las virutas que se entregan a los talleres de afino puede alcanzar de 26 a 28% y la centrifugación rebaja este porcentaje sin anularlo totalmente.

Las virutas secas son tamizadas a continuación, para retirar los polvos de alúmina y los finos metálicos que algunas veces tiene distinta composición (aleaciones de cinc) y pasan a continuación por un tambor magnético que extrae las finas virutas de acero.

[4]

## 6.2 Centrifugación

La centrifugación ofrece otra alternativa más para la separación de aceite y agua de las virutas de aluminio.

Los separadores centrifugos se basan en el principio conocido de que un objeto que gira con gran velocidad en torno a un punto central, a una distancia radial del mismo, está sujeto a la acción de una fuerza. El objeto cambia constantemente de dirección y, por consiguiente se acelera. Esta "aceleración centripeta" se debe a la fuerza centripeta que actúa en la dirección hacia el centro de rotación. Si el objeto es un recipiente cilíndrico su contenido ejerce una fuerza igual y opuesta hacia afuera de las paredes del recipiente, la cual se conoce como "fuerza centrifuga". Esta fuerza es la que provoca la separación de las partículas sólidas pesadas a través de una capa de líquido o por un lecho de sólidos porosos sostenidos en un recipiente perforado en rotación.

Cuando el recipiente gira en torno a su eje vertical, hay dos fuerzas que se ejercen sobre el líquido y los sólidos; la de la gravedad, que actúa hacia abajo y la fuerza centrifuga que actúa horizontalmente. Sin embargo, en los equipos centrifugos comerciales, la fuerza centrifuga casi siempre es tan grande que se puede despreciar la de la gravedad. Bajo la acción de la fuerza centrifuga, la capa de líquido toma la posición de equilibrio que se muestra en la figura 6.2a con una superficie casi vertical, las partículas sólidas se asientan horizontalmente hacia el exterior y se comprimen con firmeza contra las paredes verticales del recipiente.

En la figura 6.2b, la pared del recipiente está perforada y revestida con un medio de filtración que puede ser una malla fina de alambre. El líquido (aceite) tiene libertad para fluir hacia el exterior, y no así los sólidos (virutas) que quedan retenidos por la malla de alambre.

[5]

En general, una centrifuga consta de : (1) un rotor o recipiente en el cual se aplica la fuerza centrifuga al contenido, (2) un eje propulsor, (3) cojinetes del eje propulsor, (4) sellos (cuando se desea que el contenido este a presión), (5) un mecanismo impulsor (por lo común un motor eléctrico o a veces turbina), (6) un marco para alinear y sostener estos elementos, y (7) una caja ó cubierta para segregar los productos separados.



Un parámetro importante que influye en la separación del aceite, es la viscosidad de los mismos. Los aceites de corte directo al ser mas viscosos que los aceites solubles, tienen que estar sometidos a una fuerza centrífuga mucho mayor, debido a que se tiene que vencer la adhesión del aceite hacia la viruta. El aceite soluble está menos adherido a las virutas.

El tamaño del poro de la malla debe ser el adecuado para que las virutas sean retenidas casi en su totalidad y el aceite fluya rápidamente a través de ella.

La centrifugación, es una operación como en casi todas, no totalmente efectiva para la separación. Se considera que la remoción de aceite de las virutas es de aproximadamente 60%, el cual varía de acuerdo a la cantidad y tipo de aceite.

Actualmente se emplea esta operación para recuperar el aceite de las virutas y reutilizarlo en los cortes, pero gran cantidad de aceite sigue contaminando las virutas.

Las virutas a reciclar se obtienen en forma directa del torneado, es decir, no se han centrifugado para disminuir la contaminación de aceite.

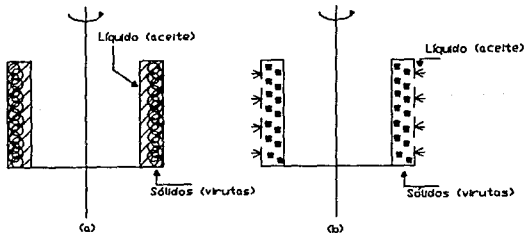


Fig. 6.2 Esquema Del Movimiento De Sólidos Y Líquido En Una Centrifuga

### 6.3 Remoción Por Solventes

La remoción como su nombre lo indica, es eliminar o separar un elemento de otro o de otros. En nuestro caso se trata de remover aceite de las virutas.

La aplicación directa implica utilizar solventes orgánicos como el hexano para remover el aceite de las virutas.

El uso de solventes orgánicos implica siempre un peligro latente por riesgo de inflamabilidad. Estos son muy volátiles y con cualquier fuente de ignición estos se pueden inflamar. La fuente de ignición puede ser hasta una chispa de corriente estática.

En una fundidora es imposible utilizar esta ruta por el riesgo inmenso de inflamabilidad y explosión, ya que en los hornos de fundición se hace uso del fuego (en algunos casos corriente eléctrica) el cual en combinación con el solvente ó volátiles de éste provocarían accidentes fatales. Además que los solventes orgánicos causan serios daños a la salud.

La aplicación de esta operación conduce a costos de operación bajos, debido a que se puede recuperar fácilmente el solvente orgánico de los aceites. Esto abate los costos de adquisición e instalación.

Es imposible evitar pérdidas por volatilidad del solvente y la magnitud de ésta va a depender de la técnica y equipo utilizado. Durante la operación de deben evitar en lo posible dichas fugas.

Una posible forma de llevar a cabo la remoción es introducir un lote de virutas sucias en un recipiente con cierre hermético y a través de una línea unida a él inyectar el solvente, de manera que éste cubra en su totalidad las virutas, implementar un mecanismo que provoque el movimiento de las virutas para que el aceite se disuelva más fácilmente en el solvente. Después de cierto tiempo, drenar el solvente sucio. Al cabo de ciertas remociones, se recupera el solvente por destilación.

Es importante remarcar que el uso de solventes orgánicos y sobre todo en gran cantidad, es peligroso utilizando cualquier equipo o técnica, esto es, por la presencia misma del solvente, aunque sea una operación de bajo costo y de alta eficacia, ya que la remoción de aceite tiende a ser arriba del 99%.

# 7 ALTERNATIVAS TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL CON ACEITE

## 7. ALTERNATIVAS PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON ACEITE

El término aceite cuando se aplica a la separación aceite-agua, es usado para referirnos a un amplio rango de materiales, pero generalmente se utiliza a fluidos de baja densidad relativa y muy ligera solubilidad en agua. Pueden ser de origen animal, vegetal o mineral, pero están compuestos principalmente de mezclas complejas de hidrocarburos, aunque muchos otros compuestos están presentes en pequeñas proporciones.

Se tienen dos grados de dispersión: primaria y secundaria. Las dispersiones primarias son inestables y se separan fácilmente por gravedad. El tamaño promedio de las gotículas generalmente se toman como mayores a 50  $\mu\text{m}$ . El tamaño de las gotículas en dispersiones secundarias están en un rango de 10 a 1  $\mu\text{m}$ .

Las dispersiones secundarias presentan serios problemas de separación puesto que ellas no se separan por gravedad. La velocidad a la cual las gotículas de aceite ascienden a la superficie son extremadamente bajas, esto es debido a que la dispersión es estable químicamente, es decir, se forma una emulsión la cual se puede romper aplicando calor, agregando componentes químicos o en algunos casos añadiendo en exceso la fase dispersa.

[6]

Para el tratamiento de aguas residuales que contienen aceite, se emplean varias técnicas, de acuerdo a la situación en que se encuentre el aceite; es decir, si el aceite está emulsionado o no lo está.

Las técnicas utilizadas para el tratamiento de agua emulsionada con aceite se emplea en combinación con las técnicas utilizadas para cuando el agua no lo está y así obtener agua de gran calidad.

La selección de un tratamiento efectivo para la remoción de aceite de aguas residuales, depende de la calidad necesaria del agua residual tratada y el costo del proceso. Frecuentemente, los procesos de tratamiento del agua residual están enfocados para que el agua residual tratada pueda ser reciclada evitando así contaminación al medio ambiente con el aceite.

Se presentan a continuación los métodos más comunes de separación aceite-agua de dispersiones primarias y secundarias.

## 7.1 COAGULACION Y FLOCULACION

Las grasas y aceites libres (no emulsionados) no presentan serios problemas de remoción, simplemente empiezan a flotar hacia la superficie del agua y aglomerarse. Mecánicamente pueden desnatarse y levantarse de la superficie.

Sin embargo, si los aceites están emulsionados en el agua residual, la separación empieza a complicarse. En estos casos los coagulantes químicos son añadidos al agua residual para formar grumos suficientemente grandes y ser removidos.

Coagulación es un proceso de agregación de pequeñas partículas en agregados de mayor tamaño y mas fácilmente decantables con el fin de obtener una separación satisfactoria por sedimentación.

El tamaño de esas partículas coloidales es variado y se pueden encontrar en forma soluble o en suspensión.

Según LaMer, la coagulación se refiere a la desestabilización producida por compresión de las dobles capas eléctricas que rodean a todas las partículas coloidales, mientras que la floculación se refiere a la desestabilización por la adsorción de polímeros orgánicos y formación posterior de puentes partícula-polímero-partícula.

Debe tenerse en cuenta que las definiciones de LaMer sobre los términos de coagulación y floculación no son aceptados universalmente. En este capítulo, el término coagulación se aplica al proceso global de agregación de partículas incluyendo la desestabilización y el transporte de partículas. El término floculación usado en este capítulo se emplea solo para describir la etapa de transporte.

Un coloide estable es un coloide irreversible, el cual se agrega con una velocidad muy baja. Un coloide inestable es todo lo contrario. El grado de irreversibilidad nos indica la dificultad que se tiene para llevar a cabo la agregación de coloides en un proceso de coagulación.

En el tratamiento del agua y agua residual, la coagulación corresponde principalmente a la agregación de coloides estables. Los procesos de coagulación se emplean para aumentar la velocidad con que se agregan los sistemas coloidales; es decir, estos procesos transforman un sistema coloidal diuturno (velocidad de agregación baja) en un sistema caduco (velocidad de agregación alta).

## Estabilidad de coloides

La estabilidad de los coloides la podemos analizar a través de sus potenciales de atracción y repulsión.

Las partículas coloidales sólidas de una dispersión acuosa se mueven al aplicar un campo eléctrico, lo cual implica que estas partículas son portadoras de una carga eléctrica.

La dispersión coloidal (fase sólida y acuosa juntas) no tiene una carga eléctrica neta, por tanto, la carga primaria de las partículas debe equilibrarse en la solución acuosa. Como resultado existe una doble capa eléctrica en cada interfase entre un sólido y el agua. Esta doble capa consiste en la partícula cargada y un exceso equivalente de iones de carga opuesta (contraiones) que se acumulan en el agua cerca de la partícula.

Estos contraiones son atraídos electrostáticamente hacia una región interfase. Durante ese trayecto se producen dos procesos competitivos: difusión y atracción electrostática que extienden la carga en el agua sobre una capa difusiva, dentro de la cual la concentración en exceso de los iones es mayor en la zona adyacente a la superficie de la partícula y disminuye gradualmente al alejarnos de la interfase sólido-agua.

Debido a la existencia de la carga primaria, existe un potencial electrostático (voltaje) entre la superficie de la partícula y la masa principal de la solución. El potencial tiene un valor máximo en la superficie de la partícula y disminuye a medida que nos alejamos de la misma.

Cuando se acercan mutuamente dos partículas coloidales similares, sus capas difusivas empiezan a interactuarse. Esta interacción electrostática produce siempre una fuerza repulsiva (energía potencial repulsiva VR).

Para sistemas coloidales que contengan concentraciones iónicas altas en la masa principal de la solución, la interacción repulsiva es más pequeña que para los sistemas de fuerza iónica mas baja.

Ciertas fuerzas atractivas existen entre todos los tipos de partículas coloidales, por muy distintas que puedan ser sus naturalezas químicas. Estas fuerzas atractivas, llamadas fuerzas de van der Waals, son responsables de la agregación de muchos sistemas coloidales. Estas fuerzas atractivas (energía potencial atractiva VA) entre dos partículas disminuyen al aumentar la distancia de separación entre las mismas.

Los efectos de la carga sobre la estabilidad aparente de los coloides irreversibles puede ser determinada por la suma de las energías repulsivas y atractivas de interacción, (VR - VA). Para concentraciones iónicas bajas puede predominar una repulsión neta la cual puede considerarse como una energía de activación que debe vencerse para que ocurra la agregación. Su magnitud depende de la carga de las partículas y de la composición iónica de la solución. A fuerzas iónicas mas elevadas esta barrera energética puede desaparecer.

Las partículas sólidas de una dispersión coloidal están en movimiento constante y por tanto tienen energía cinética. En cualquier momento existe una distribución de energía cinética, con algunas partículas que tienen una energía cinética suficientemente grande como para vencer la barrera energética de activación. La velocidad de coagulación depende entonces de la barrera energética y de la energía cinética de las partículas coloidales. Los sistemas coloidales irreversibles que tienen una energía de activación alta y/o energía cinética baja coagularán muy lentamente. Con los coloides reversibles sucede lo contrario.

#### **Desestabilización de los coloides**

Diferentes coagulantes químicos pueden llevar a cabo la desestabilización de los coloides por diferentes caminos. Para una aplicación particular, la selección del tipo de coagulante y su dosificación requiere de un entendimiento de como funcionan estos materiales.

Se presentan cuatro métodos distintos: (1) Compresión de la doble capa difusiva, (2) Adsorción para producir neutralización de la carga, (3) inmersión dentro de un precipitado y (4) adsorción que permita un enlace tipo puente entre partículas.

#### **Compresión de la doble capa.**

Las interacciones de algunas especies de coagulante con una partícula son puramente electrostáticas. La regla de Schulze-Hardy recopila las observaciones realizadas a varios coagulantes en relación a sus interacciones con esas partículas coloidales. La regla establece que la desestabilización de un coloide por un electrolito se lleva a cabo por iones de carga opuesta a la del coloide y que la

eficacia de la coagulación debida a estos iones aumenta mucho con la carga. Por ej., las concentraciones requeridas de  $\text{Na}(+)$ ,  $\text{Ca}(++)$  y  $\text{Al}(+++)$  para desestabilizar un coloide cargado negativamente se observa que varían aproximadamente de 1:0.01:0.001.

La desestabilización por los contraiones se lleva a cabo por compresión de la capa difusiva que rodea a las partículas coloidales. Concentraciones elevadas de coagulante en la solución dan elevadas concentraciones de contraiones en la capa difusiva. El volumen de la capa difusiva necesario para mantener la electroneutralidad disminuye y por lo tanto el espesor de la capa difusiva se reduce. El alcance de la interacción repulsiva entre partículas coloidales similares decrece, y la barrera energética de activación puede desaparecer.

En la coagulación del agua y agua residual, la eficacia de un coagulante se determina generalmente por medio de un ensayo discontinuo o "jar test" (pruebas de jarra) en el cual se varía la dosificación de coagulante y se mide la turbidez residual después de unos periodos apropiados de agitación suave y sedimentación.

Los fenómenos descritos en los parrafos anteriores (regla de Schulze-Hardy) son de poco interés, debido a que en la coagulación de sistemas naturales existen otras interacciones además de la atracción y repulsión. Por esta razón se hace mención de los siguientes puntos.

#### Adsorción y neutralización de la carga.

La capacidad de un coagulante para desestabilizar una dispersión coloidal es realmente una mezcla de interacciones coagulante-coloide, coagulante-solvente y coloide-solvente. Según el tipo y magnitud de estas interacciones, la capacidad de un coagulante para ocasionar la desestabilización de una dispersión coloidal puede ser muy diferente de la sugerida por el modelo de Verwey-Overbeck (compresión de la doble capa). Para explicar este mecanismo, es necesario ejemplificar de la siguiente forma: los iones dodecilamonio tienen una carga (+) y según las bases del modelo de Verwey-Overbeck, deberían exhibir una capacidad de inducir la coagulación similar a la producida por el  $\text{Na}(+)$ . Sin embargo, experimentalmente se comprueba que la amina orgánica produce desestabilización a una concentración mucho menor a la del sodio (1600 veces menos concentrada). Además puede existir reestabilización si hay exceso de amina orgánica lo cual no ocurre con el sodio. Esa reestabilización viene acompañada por una inversión de carga



de negativa a positiva, esto es debido por un exceso de contraiones. Si las interacciones Culombianas fueran la única fuerza impulsora para la desestabilización, la adsorción de un exceso de contraiones para producir una inversión de carga no sería posible. En este caso la falta de interacción coagulante-solvente (amina org.-agua) es en cierta medida responsable de la adsorción del coagulante en la interfase partícula-solución.

#### Inmersión en un precipitado.

Cuando se utiliza una sal metálica, sulfato de aluminio, férrico o ferroso, etc. como coagulante a concentraciones suficientemente altas y a pH controlado, entonces se puede ocasionar la precipitación de un hidróxido metálico, de tal forma que las partículas coloidales van quedando inmersas dentro de esos precipitados a medida que se van formando.

Las partículas coloidales mismas pueden servir como núcleos para la formación del precipitado, de tal forma que la velocidad de precipitación crece al aumentar la concentración de partículas coloidales que deba eliminarse. Esto puede dar lugar a una relación inversa entre la dosificación óptima de coagulante y la concentración de material que deba eliminarse (Packham, 1965). En otras palabras, cuanto mayor sea la cantidad de materia coloidal del agua, menor será la cantidad de coagulante metálico que se requiere para llevar a cabo esta eliminación.

#### Adsorción y enlace de puente interpartícula.

LaMer y colaboradores han desarrollado una teoría de enlace de puente que nos da un modelo cualitativo aceptable que explica la capacidad de los polímeros de elevado peso molecular para desestabilizar las dispersiones coloidales.

Para una desestabilización eficaz, la molécula polimérica debe contener grupos químicos que puedan interaccionar con los lugares de la superficie de la partícula coloidal.

(1) Cuando una molécula polimérica se pone en contacto con una partícula coloidal, algunos de esos grupos se adsorben en la superficie de la partícula dejando el resto de la molécula prolongada hacia la solución.

(2) Si una segunda partícula con algunos lugares de adsorción vacantes se pone en contacto con estos segmentos prolongados, puede ocurrir una fijación.

(3) Después de un periodo de tiempo los segmentos prolongados hacia la solución pueden adsorberse eventualmente en la partícula de tal forma que el polímero ya no es capaz de servir como puente.

(4) En parrafos anteriores se discutió la reestabilización de los coloides por exceso de dodecilamonio. Ahora si se utiliza en exceso un polímero aniónico como lo es la poliacrilamida, entonces, la reestabilización no podrá ser atribuida a una inversión de carga, ya que el coloide y polímero tienen carga similar. Con el exceso de polímero se llega al punto de saturación de las superficies coloidales y producen un coloide reestabilizado, ya que no se dispone de lugares para la formación de puentes entre partículas.

(5) Bajo ciertas condiciones, un sistema que ha sido desestabilizado y agregado puede ser reestabilizado por agitación prolongada o vigorosa, esto es por la ruptura de los enlaces polímero-partícula. (LaMer y Healy, 1963).

La desestabilización de los coloides en los procesos de tratamiento de agua y agua residual se lleva a cabo probablemente, bien por adsorción de especies coagulantes o por inmersión dentro de los precipitados de hidróxido metálico.

Cuando la desestabilización se lleva a cabo por adsorción, las especies que se adsorben son generalmente polímeros, los cuales se añaden o se pueden producir dentro del sistema. En el caso de la cal, la coagulación se lleva a cabo por simple precipitación de carbonato de calcio o de magnesio según el pH. Las coagulaciones con aluminio y fierro son más complejas. Por lo tanto es necesario describir con más detalle estos mecanismos.

#### **Desestabilización por Al(III) y Fe(III).**

Especies simples como  $Fe(3+)$ ,  $Ca(2+)$ ,  $Al(3+)$  y  $H(+)$  no existen como tales en un medio acuoso natural, aunque esta nomenclatura es aceptable en química. Estos iones están presentes como complejos acuosos  $-Fe(H_2O)_6(3+)$ ,  $Al(H_2O)_6(3+)$ , etc., en este caso el agua es el ligando. Estas especies son portadoras de protones y por lo tanto especies ácidas.

Al agregar una sal de Fe(III) o Al(III) al agua en concentraciones inferiores al límite de solubilidad provoca la formación de monómeros, dímeros o complejos poliméricos hidroxometálicos, además del ión libre acuometálico. Un ejemplo de estas reacciones es:



Si se añade la sal metálica en exceso del límite de solubilidad, se llega hasta la formación del hidróxido metálico, pasando por todos los complejos hidroxometálicos. Estos complejos son los que se adsorben sobre las partículas coloidales.

En los procesos convencionales se utiliza un exceso de las sales metálicas. La cantidad de coagulante va a depender de la cantidad de coloide que esté presente.

Un entendimiento de las propiedades de las sales metálicas que se hidrolizan puede ser útil en la práctica de la coagulación. Consideremos primero que las sales de aluminio pueden ser coagulantes eficaces en el momento presente de dos maneras: por adsorción para producir una neutralización de la carga, y por inmersión en un precipitado. La dosificación química depende de como se alcance la desestabilización.

La desestabilización producida por los polímeros obtenidos de las sales de Al(III) y Fe(III) esta influenciada por tres factores: dosificación de coagulante, pH y concentración coloidal.

Estas sales metálicas son ácidos. La adición de estos compuestos químicos al agua es similar a una titulación ácida del agua. Como resultado, el pH del sistema después de la adición de estos coagulantes dependerá de la dosificación de coagulante y la alcalinidad del agua o agua residual. Para incrementar la alcalinidad es necesario agregar sosa.

El conocimiento de las correlaciones entre dosificación óptima de coagulante, pH y concentración coloidal, combinado con una comprensión de los dos modos de desestabilización que pueden producirse con las sales metálicas, puede ser útil y aún necesario en la operación de un proceso de coagulación. Podemos describir 4 tipos de suspensiones:

#### 1. Concentración Coloidal Alta, Alcalinidad Baja.

Este es el sistema mas fácil de tratar, ya que solo debemos determinar un parámetro químico: la dosificación óptima de coagulante. La desestabilización se lleva a cabo por adsorción de los polímeros hidroxometálicos positivamente cargados; estos se producen en niveles ácidos de pH (pH's de 4 a 6, según el coagulante).

## 2. Concentración Coloidal Alta, Alcalinidad Alta.

En este caso la desestabilización se alcanza de nuevo por adsorción y neutralización de carga para niveles de pH neutros y ácidos. Aquí el ingeniero puede elegir el uso de una dosificación alta de coagulante debido a la alta alcalinidad, el pH permanecerá generalmente en la región neutra en donde los polímeros hidroxometálicos no están altamente cargados con lo cual la neutralización de la carga es más difícil.

## 3. Concentración Coloidal Baja, Alcalinidad Alta.

En este caso la coagulación se lleva a cabo fácilmente por inmersión de las partículas coloidales en un precipitado con dosificaciones relativamente altas de coagulante. Alternativamente podemos añadir una ayuda de coagulante (coadyuvante) para aumentar la concentración coloidal e incrementar la velocidad de contacto interpartícula.

## 4. Concentración Coloidal Baja, Alcalinidad Baja.

La coagulación en estos sistemas es la más difícil. La coagulación será ineficaz si solamente usamos la sal metálica, ya que el pH será muy disminuido. Para una coagulación eficaz, debemos añadir sosa, partículas coloidales o ambos.

### **Polímeros orgánicos sintéticos.**

Además de las sales inorgánicas como los coagulantes, se tienen a los polímeros.

Un polímero es una cadena de pequeñas subunidades o monómeros. Muchos polímeros sintéticos contienen solamente un tipo de monómero, algunos contienen dos o tres tipos de subunidades diferentes. Las cadenas pueden ser lineales o pueden tener varias ramificaciones.

Si una unidad monomérica de un polímero contiene grupos ionizables (ej. carboxilo, amino, grupo sulfónico, etc.) el polímero se llama polielectrolito. Según el tipo de grupos ionizables de la unidad monomérica, un polielectrolito puede ser catiónico, aniónico o anfótero. Los polímeros que no contienen grupos ionizables se llaman no iónicos. Los ejemplos posteriores ilustran lo dicho.

La capacidad de un polímero para actuar como floculante depende de su afinidad para enlazarse a la superficie de las partículas coloidales.

Algunos otros parámetros importantes que afectan al rendimiento de un determinado polímero son su peso molecular

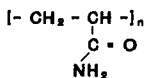
## POLIMEROS ORGANICOS SINTETICOS

### 1. Polímeros no iónicos

(a) óxido de polietileno

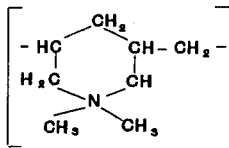


(b) poliacrilamida



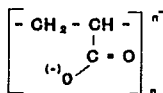
### 2. Polielectrólitos catiónicos

(a) polidialildimetilamonio

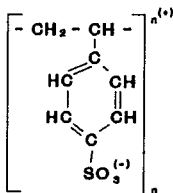


### 3. Polielectrólitos aniónicos

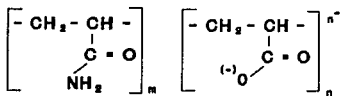
(a) ácido poliacrílico



(b) poliestireno sulfonado (PSS)



(c) poliacrilamida hidrolizada



y el grado de ramificación. Las características de la solución pueden ser importantes; en particular, el pH del sistema puede afectar a la carga del polielectrolito. Por ej., el ácido poliacrílico y las poliacrilamidas hidrolizadas no tienen carga a valores inferiores de 4. Ya que el grupo carboxilo acepta un protón ( $\text{-COO}^- + \text{H}_3\text{O}^+$ )  $\leftarrow$   $\text{-COOH} + \text{H}_2\text{O}$ ).

La concentración de cationes divalentes como el calcio, magnesio, etc., en el agua, pueden ejercer un gran efecto sobre la capacidad de los polielectrolitos aniónicos para agregar coloides negativos.

Cuando se utilizan polielectrolitos catiónicos como coagulantes primarios, una dosificación excesiva provocará una inversión de carga y reestabilización del coloide negativo.

Cuando se utilizan polímeros aniónicos o no iónicos, es necesario un tamaño mínimo (peso molecular) para que estas moléculas puedan abatir la barrera energética potencial entre 2 partículas coloidales negativas. Este tamaño mínimo depende de factores tales como el número de grupos cargados y grado de ramificaciones del polímero, carga de las partículas coloidales y la fuerza iónica de la solución.

#### **Mezclado**

Cuando se utilizan sales de aluminio o fierro es recomendable aplicar un mezclado instantáneo debido a que: (1) las velocidades de formación de polímeros son muy rápidas, (2) la producción de especies coagulantes uniformes requiere un pH uniforme y dosificación uniforme de coagulante al sistema y (3) la velocidad de adsorción de estos pequeños polímeros también es rápida. Son innecesarios tiempos de permanencia largos, ya que estas reacciones se llevan a cabo en un segundo o menos.

Es importante mencionar que si el coagulante se agrega en forma sólida, el tiempo será mayor considerando el tiempo que tarde en disolverse.

La agitación vigorosa, además de proveer una producción uniforme y adsorción de las especies de coagulante metálicas, puede también generar una considerable cantidad de área superficial adicional, lo cual a su vez requiere de coagulante adicional.

La agitación vigorosa y prolongada no es esencial cuando se utilizan polímeros, debido a que podría causar la ruptura de enlace polímero-partícula.

Los contactos entre partícula al igual que su desestabilización puede llevarse a cabo por varios caminos. Tres mecanismos distintos se han discutido: (1) contactos por movimiento térmico, llamado movimiento browniano o difusión browniana (floculación pericinetica), (2) contactos que resultan del movimiento de la masa principal del fluido, por ej., transporte inducido por agitación (floculación ortocinética, y (3) contactos que resultan de la sedimentación de partículas (sedimentación diferencial, en la cual una partícula que sedimenta rápidamente, alcanza y colisiona con otra partícula que sedimenta con mas lentitud).

" La selección del tipo óptimo de coagulante, así como su dosificación, deben determinarse experimentalmente para cualquier tipo de agua o agua residual. Las teorías de la desestabilización coloidal todavía no estan suficientemente desarrolladas como para permitir una selección sin determinación experimental. Únicamente nos aminoran el tiempo de búsqueda. "

[7]

## 7.2 ADSORCION

La adsorción que es una propiedad que poseen ciertos cuerpos de atraer otras sustancias líquidas, sólidas o gaseosas hacia su superficie por acción física o química, es utilizada para el tratamiento de aguas residuales con aceite.

### 7.2.1 Utilización del Sphagnum Peat

El objetivo básico de esta técnica es conocer el potencial de absorción y adsorción del musgo llamado Sphagnum Peat para remover aceite de emulsiones aceite en agua.

#### Propiedades

El sphagnum peat es una turba, producto de la carbonización y descomposición de los vegetales que normalmente se encuentran en los pantanos. Esta formada por la degradación de capas sucesivas de plantas acuáticas y semiacuáticas como juncos, cañas y musgos.

Una buena turba es totalmente orgánica en contenido y es liviana. Su color es amarillo-marrón. No tiene coloides y tiene baja densidad. Es fibrosa, esponjosa y suave en apariencia, no tiene olor.

Este material orgánico es algo complejo, contiene lignina en el cual lleva grupos funcionales polares tales como alcoholes, aldehídos, cetonas, ácidos, hidróxidos fenólicos y otros que pueden involucrar enlaces químicos.

#### Aplicación

El Sphagnum peat es un efectivo medio para el tratamiento de emulsiones aceite en agua debido a que tiene una gran capacidad de absorción de aceite, además de su abundante disponibilidad. El % de remoción de aceite de la emulsión está en un rango de 21 a 98%, dependiendo del tipo de emulsión.



D'Hennezel y Coupal, encontraron que el *Sphagnum peat* absorbe de 1:8 a 1:12 veces su peso de aceite, dependiendo de la turba.

Mark y Smith compararon la capacidad promedio de remoción de aceite con absorbentes sintéticos como plásticos, madera mineral, vidrio volcánico y residuos de madera hidrolizada, contra un *Sphagnum peat* seco (en base a tratamiento térmico) y se encontró que los porcentajes son de 89 a 97% para los primeros y 83 a 97% para el último.

Asplaud observó que un *Sphagnum peat* tratado adecuadamente con calor (seco) es apropiado como un medio filtrante para el tratamiento de aguas residuales aceitosas, pero solo para emulsiones de baja estabilidad. Las eficiencias % de remoción de aceite se reportan en un 98% usando una cama de *Sphagnum peat* de 0.2 a 0.05 m de espesor; la capacidad de fijación fue de 1 a 2 kg de aceite por kg de *Sphagnum peat* seco (turba comercial) y de 3 a 4 kg de aceite por kg de *Sphagnum peat* seco (turba tratada con calor).

#### Técnica

Se deben considerar los siguientes parámetros para el análisis de la turba hortícola utilizada en las pruebas experimentales: rango del tamaño de partícula, pH, contenido de humedad, contenido de materia orgánica, análisis y tamaño de grano y capacidad de retención de aceite.

Los autores de donde se obtuvo esta información analizaron 4 tipos de emulsiones: efluentes de refinería (ER), aceites de corte (CO), petróleo crudo de baja viscosidad, 50 cp (MCO) y aceite mineral de viscosidad media, 130 cp (SMO).

Tomaron 6 muestras de *Sphagnum peat* con varios pesos en el rango de pesos que va de 50 a 500 mg. Esas 6 muestras se mezclaron c/u con 200 ml de emulsión para cada prueba de adsorción y para periodos de 2 a 3 horas basado en los tiempos de equilibrio. El tiempo de equilibrio lo definen como el tiempo de contacto requerido para que la concentración de aceite llegue a un valor constante. El rango de tiempo de equilibrio es de 1 a 3 horas dependiendo de la emulsión.

Cuando el *Sphagnum peat* se mezcla con una emulsión, se agita para dar un contacto adecuado para que ocurra la adsorción de aceite sobre el *Sphagnum peat*. La concentración de aceite puede decrecer de una concentración inicial a un valor de equilibrio si el tiempo es suficiente. Los tiempos

de equilibrio son de 2 horas para SMO, MCO, y CO, y de 3 horas para RE.

Los resultados se presentan por modelos de isotermas de adsorción: Langmuir, Freundlich y BET. De acuerdo a los resultados obtenidos, estos no se ajustan al modelo de Langmuir y Freundlich. Los datos estuvieron mas acordes con la isoterma de BET.

$$(x/m) = (A \cdot C \cdot X_m) / ( (C_s - C) * (1 + (A-1) * (C/C_s)) ) \quad \text{BET}$$

donde: C = Concentración de aceite en la solución al equilibrio (mg/l)

x = Cantidad de aceite adsorbido (mg)

m = Peso del Sphagnum peat (mg)

X<sub>m</sub> = Cantidad de aceite adsorbido en una monocapa completa (mg/g)

C<sub>s</sub> = Concentración de saturación de aceite (mg/l)

A = Constante que describe la energía de interacción entre el aceite y la superficie del Sphagnum peat.

Este análisis condujo a lo siguiente: Los % de remoción de aceite para CO y RE son bajos, debido a la alta estabilidad de la emulsión. CO es tratado con reactivos químicos (aditivos), provocando que la estabilidad de la emulsión aumente.

Este sistema de adsorción opera por lotes, limitando el tratamiento a volúmenes de agua residual pequeños. Se puede utilizar un solo recipiente para la reacción si toda el agua es regenerada en un periodo de 8 a 12 horas.

Una vez que el recipiente de reacción se ha llenado con el agua aceitosa, el Sphagnum peat puede ser añadido y la mezcla puede ser agitada por un tiempo suficiente para aproximarse lo mas posible al equilibrio. El recipiente puede entonces ser drenado y preparado para recibir otro lote hasta que el Sphagnum peat llegue a su punto de saturación de aceite; es decir, hasta el momento en que la turba ya no pueda adsorber mas aceite.

Al aplicar el modelo de isotermas de adsorción de BET para un caso particular de emulsiones aceite en agua, es posible entonces calcular la cantidad de Sphagnum peat requerido para llevar a cabo una remoción de aceite del 86 a 87% para un flujo de agua residual aceitosa dada. El diseño es práctico, excepto en el caso de RE donde los requerimientos del Sphagnum peat son excesivos.

El Sphagnum peat utilizado puede ser drenado, secado y usado como combustible o depositado bajo tierra como relleno. La capacidad de diseño del reactor está en función

del tiempo mínimo requerido (tiempo de equilibrio) y el volumen de agua residual a tratar.

[8]

### 7.2.2 Resinas de Adsorción Poliméricas

Una serie de adsorbentes poliméricos desarrollados últimamente han sido utilizados como adsorbentes de hidrocarburos de sistemas acuosos. Sus propiedades adsorbtivas se derivan de la combinación de porosidad macroreticular, distribución del tamaño de poro, gran área superficial y la naturaleza alifática de su estructura. Resinas adsorbentes pueden producir agua con un contenido de aceite menor a 1 ppm

Actualmente han surgido variaciones de esas resinas poliméricas y se han desarrollado adsorbentes carbonaceos, cuya composición química se encuentra entre la del carbón activado y las resinas poliméricas adsorbentes. Los adsorbentes carbonaceos son esferas rígidas, negras y libres de polvo. Estos adsorbentes están diseñados para remover y recuperar compuestos orgánicos de otros líquidos y pueden ser usados a temperaturas mayores a 100 °C. Su capacidad es muchas veces mayor que la del carbón activado para remover compuestos orgánicos halogenados o no polares y que se encuentran en bajas concentraciones. Pueden ser regenerados por solventes, vapor o ambos.

[9]

Los poros de las resinas poliméricas van de 2.5 a 23  $\mu\text{m}$  en diámetro. Los coloides entran a la cavidad del poro y son adsorbidos sobre la resina. Durante la regeneración (con NaCl, HCl y NaOH), el gran tamaño de poro facilita la extracción de los coloides adsorbidos en la resina.

Antes de diseñar un sistema basado en estas resinas, pruebas a nivel piloto se deben realizar para establecer capacidad de operación, eficacia de regeneración y economía. El equipo utilizado es muy similar a las columnas de intercambio iónico.

[10]

El empleo de éstas resinas poliméricas se ejecuta cuando el contenido de materia orgánica se encuentra en los niveles de ppm. Por lo tanto esta técnica es un método de refinación para aumentar la calidad del agua lo cual no se logra con un único tratamiento como el de coagulación u otro; es decir, es necesaria la combinación de 2 diferentes tipos de tratamiento de agua residual.

### 7.2.3 Carbón Activado

A menudo para eliminar del agua el color, el sabor y los olores, se utiliza el proceso de adsorción de materias orgánicas y coloidales. Como adsorbente se utiliza el carbón activado. Este proceso se emplea generalmente para aumentar la calidad del agua. El material puede agregarse en forma de polvo a la corriente de alimentación o formar una cama que se utiliza como filtro.

Además de la remoción de materia orgánica, también puede ser usado para reducir la contaminación por cloro.

La capacidad de remoción de materia orgánica depende del área superficial, tamaño de poro y origen y manufactura del carbón adsorbente. Las características de los compuestos orgánicos (peso molecular, polaridad y tipo de sales) también juegan un papel importante en el proceso de adsorción. Por ej., si los compuestos orgánicos tienen peso molecular alto, entonces la adsorción no es muy buena debido al gran tamaño. Alto peso molecular y alta polaridad también causan problemas de adsorción, debido a factores de repulsión iónica.

El carbón activado puede regenerarse parcialmente por medio de vapor u otros gases (por ejemplo nitrógeno).

[10]

### 7.3 FLOTACION

En la práctica común la flotación es esencialmente una operación unitaria de tratamiento de aguas residuales y se aplica, por lo general, en una de las dos formas siguientes: flotación natural y flotación por medio de gas. En ambas formas es conveniente mencionar que el agua y el aceite no están emulsionados. En caso contrario se añaden coagulantes para desestabilizar la emulsión y liberar el aceite atrapado químicamente.

#### 7.3.1 Flotación Natural

En la flotación natural, los aceites, grasas y otras sustancias más ligeras que el agua tienden a elevarse naturalmente hacia la superficie de los tanques a los que se acarrean las aguas residuales para que reposen. A continuación, las natas superficiales que se forman se separan en forma análoga a la remoción de los lodos de los tanques de sedimentación.

La elevación gravitacional de las partículas discretas es un fenómeno opuesto a la sedimentación gravitacional natural y se caracteriza por respuestas análogas de las partículas y fluidos. Se aplica la ley de Stokes sin cambio en la formulación. Únicamente la velocidad de Stokes adquiere un signo negativo.

#### 7.3.2 Flotación Con Gas

La remoción de aceite por flotación, involucra la inyección de gas en forma de diminutas burbujas a la corriente de proceso agua-aceite. Como las burbujas suben a través del agua, éstas hacen contacto y se adhieren a sólidos pequeños y gotas de aceite. Se forma una mezcla espumosa aceite-agua que asciende a la superficie donde es retirada.

[11]

La flotabilidad mediante gas puede ocurrir mediante dos formas: (1) al ser atrapado el gas físicamente en los agregados floculentos o floculados de las partículas y (2) al ser atraído hacia las partículas por las fuerzas interfaciales y adherirse a ellas. Se crea un sistema de tres fases (gas-líquido-sólido) en el que tres tensiones

interfaciales ejercen efectos determinantes: (a) la tensión gas-sólido, (b) tensión sólido-líquido, y (c) la tensión gas-líquido. En conjunto, éllas determinan la magnitud del ángulo de contacto en el punto de conjunción de las tres fases (figura 7.1). Mientras mayor es este ángulo, mayor es la tendencia de las burbujas a adherirse a las partículas. En algunas aguas residuales se puede formar un sistema gas-líquido-líquido que se comportará en la misma forma que el primer sistema. Por ejemplo, una burbuja de aire atraída a una gota de aceite en agua.

[12]

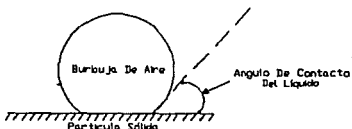


Fig. 7.1 Sistema De Flotación De Tres Fases

Los gases mas comunmente utilizados para la flotación son el aire, bióxido de carbono, nitrógeno y gas natural; de los cuales se prefieren los dos últimos por cuestiones de prevención de corrosión en el tanque de flotación y equipo adjunto, aunque por cuestiones económicas es preferible utilizar aire.

Los sistemas de flotación con gas son : gas disuelto, gas disperso con rotor , gas disperso inducido con bomba, flotación por vacío, aireación a presión atmosférica y electroflotación.

#### Flotación con gas disuelto

Comprende 4 etapas de proceso.

(1) El agua aceitosa entra en contacto con el gas a una presión de 45 a 50 psig (figura 7.2). Mientras esta mezcla (agua-aceite-gas) pasa a través de la bomba, el gas es dividido formando burbujas que favorecen su solubilidad en el agua así como su permanencia en el recipiente.

(2) Muchas burbujas pequeñas ( $1 \mu$  o menores en diámetro) son formadas después de que el agua es depresurizada al pasar a través de una válvula de control que está después del recipiente de retención.

(3) Esas burbujas sujetan las gotitas de aceite y sólidos suspendidos y ascienden en el tanque de flotación.

(4) Separación de la mezcla espumosa aceite-gas-sedimento (algunos de los sólidos pequeños se adhieren a las burbujas) del agua.

La separación aceite-agua aumenta porque la diferencia en tamaño de partícula y densidad aumentan. El resultado total es una mayor velocidad de ascensión para la mezcla espumosa la cual es continuamente removida de la superficie del agua por un canal despuante. La presencia del gas hace que la densidad del aceite tienda a disminuir y por lo tanto asciende mas fácil.

El agua es deshalojada por el fondo de la celda, de donde empieza a ascender a través de un colector localizado en la periferia del tanque. El colector tiene canales ubicados en la parte superior del recipiente.

El tiempo de residencia en el tanque es de 1 a 3 min. El gas no disuelto es removido a través de una línea de extracción de gases.

Los sólidos que no alcancen a flotar, se unden hasta el fondo del tanque donde se van concentrando hasta que eventualmente son retirados.

Los tanques de flotación pueden ser diseñados circular y rectangulares, aunque el primero es el mas común.

El diseño mostrado en la figura 7.2 requiere de una bomba para alimentar el flujo de agua hacia el recipiente de retención presurizado. Si existe un sistema con recirculación, entonces, el tamaño de la bomba y recipiente de retención serian mas pequeños, contribuyendo a una disminución de costos.

La presurización del flujo total provoca mayor utilización de gas por unidad de volumen de alimentación de agua.

Un diseño de flujo dividido puede proveer una relación gas/agua de solo 0.25 pies<sup>3</sup>/barril si el 50% de la alimentación fuese presurizada. Y para un diseño de recirculación parcial se tiene una relación de solo 0.17 pies<sup>3</sup>/barril si el flujo recirculado fuese el 50% de la

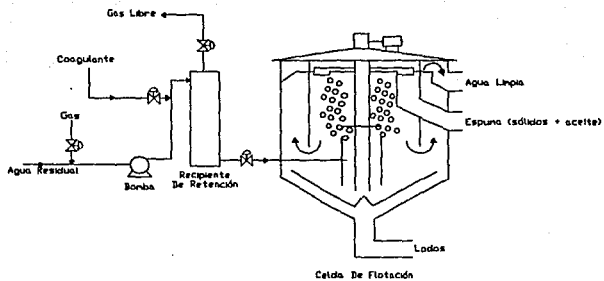


Fig. 7.2 Flotación Con Gas Disuelto

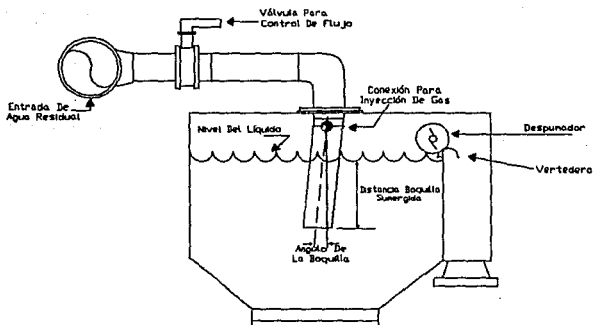


Fig. 7.3 Flotación Con Gas Disperso, Tipo Eductor



recirculación de agua (33% del flujo total de agua de entrada puede ser saturado con gas).

Una desventaja de la presurización del flujo total, es el costo de la bomba y del recipiente de retención, mas el costo de operación de la bomba. Además que al bombear el flujo total aumentan los problemas de emulsión en ciertas aguas debido al corte y turbulencia en las bombas. Esto reduce las eficiencias de remoción de aceite. La recirculación del agua clarificada puede reducir este problema.

Los sistemas de recirculación deben operar a bajas relaciones gas/agua, debido a que el flujo recirculado arrastra gas. Las pruebas de campo indican que la relación gas/agua de 0.25 a 0.35 pies<sup>3</sup>/barril (basados en el flujo total de agua) es requerido para una efectiva remoción de aceite. Se requieren altas relaciones gas/agua conforme aumenta la concentración de aceite a la entrada.

El tamaño de las unidades de flotación con gas disuelto está basado en las cargas hidráulicas en gpm/pie<sup>2</sup> de sección transversal del tanque. Sport reporta un valor de 2 gpm/pie<sup>2</sup> para los sistemas de presurización total y 4 gpm/pie<sup>2</sup> para sistemas con recirculación.

#### **Flotación con gas disperso**

Este método para separar aceite-agua fue introducido desde 1961. Sin embargo, el proceso ha sido utilizado desde 1900 para otras aplicaciones en la industria.

La diferencia básica entre la flotación con gas disperso y disuelto es la dirección del gas al introducirse en el agua y la relación gas/agua que es mas alta para este método.

El método no requiere que el gas se disuelva en el agua. La dispersión de burbujas de gas se lleva a cabo mecánicamente mezclando el gas en el agua por medio de un impulsor. La mezcla espumosa resultante se separa del agua en una zona estable (en reposo).

Un diseño común consiste de 4 tanques, cada uno de ellos equipado con un impulsor de rotación. El tiempo de residencia en cada tanque es de 1 min.

### Tipo rotor

Aunque la flotación con gas disperso se realiza con gas comprimido, una unidad común para aguas aceitosas de campo hace que el agua ingiera al gas impulsados por un rotor.

Un rotor de alabes rectos es colocado en una flecha que provee la energía para impulsar la mezcla agua-gas. El rotor se mueve por medio de un motor eléctrico. El rotor imparte la velocidad tangencial al agua.

El diseño del rotor para el tanque de flotación de gas disperso esta basado en un tiempo de residencia de 1 min. por tanque para un total de 4 min. En general es una máquina de alta velocidad que requiere de un mínimo de espacio por unidad de capacidad.

### Tipo inductor

Es un método donde el gas es inducido hacia el agua por medio de una bomba inductora. El agua que ingirió el gas es clarificada con agua bombeada del compartimiento de descarga.

En cierto diseño (Fig. 7.3), la mezcla gas/agua entra al tanque con un ligero ángulo desviado de la vertical para dar un movimiento a la espuma hacia un lado de la máquina donde el despumador esta localizado.

El suministro de gas es inducido a través de una tubería externa y por arriba de cada compartimiento. El gas es aspirado a través de una válvula de aguja de acero inoxidable hacia el inductor. La válvula puede ser usada para ajustar el flujo de gas y generar burbujas en cada tanque.

Las paletas despumantes estan colocadas a lo largo y a ambos lados de la unidad. Una compuerta hermética para el gas está localizada arriba de las paletas despumantes en cada tanque para inspección y mantenimiento.

Estas unidades estan diseñadas para un tiempo de residencia de 5 min., basado en su capacidad nominal y son operadas con y sin ayuda de la flotación.

[11]

## **Flotación por vacío**

Consiste este proceso en saturar el agua con gas (aire), y aplicar posteriormente el vacío parcial en la superficie de la masa líquida. De esta forma el aire disuelto abandona la solución en forma de microburbujas, arrastrando con él las partículas sólidas adheridas.

El rendimiento de este procedimiento es, generalmente, mayor que en el de presurización, tanto por lograrse un menor tamaño de burbujas como obtenerse una gran homogenización en la zona de formación de microburbujas.

## **Aereación a presión atmosférica**

En este sistema se introduce directamente el aire en la masa del líquido en tratamiento. El tamaño de las burbujas es de algunos milímetros y su bajo rendimiento sólo hace recomendable este procedimiento para la separación de sólidos de muy baja densidad (detergentes, etc.) o para la mejora de procesos de flotación natural de la separación de aceites, grasas, etc.

[13]

La electroflotación se cita en la sección 7.5

## **Variables en la flotación con gas**

Es importante comprender la influencia de las variables en el proceso de flotación para que sea operado efectivamente. Strickland ha reportado los resultados de muchos laboratorios sobre el estudio de estas variables que a continuación se mencionan:

Concentración del gas. Concentraciones altas de gas es adecuada porque aumenta la recuperación de aceite y puede ser creada por formación de pequeñas burbujas de gas disuelto, o utilizando un tanque para gas disperso. Concentraciones altas de gas no pueden ser mantenidas en presencia de pequeñas gotas de aceite porque causaría la fusión de la burbujas.

Salinidad vs. recuperación de aceite. La recuperación de aceite en un sistema de gas disperso mejora con el aumento

de la salinidad, la recuperación de aceite incrementa con un aumento de NaCl de 0 a 10% (0 a 10,000 ppm).

Salinidad vs. tamaño de burbuja. En pruebas de gas disperso, el tamaño de las burbujas decrece al aumentar la salinidad hasta un 3%. No hay cambio adicional en el tamaño de la burbuja con una salinidad de 3 a 20%. La mayor parte de las aguas aceitosas contienen suficientes sólidos disueltos para crear una favorable flotación de las burbujas.

Ayuda de productos químicos. Los experimentos de gas disperso demostraron que 10 ppm de aditivo, significativamente mejora la recuperación de aceite en ambas aguas: salina y pura.

[11]

En sistemas de tres fases líquido-gas-sólido, se agregan aditivos para modificar las propiedades del sistema y mejorar el proceso de flotación. Los colectores (ácidos grasos o jabones) son aditivos que aumentan la tensión interfacial entre el gas y el sólido y disminuyen la tensión interfacial entre el sólido y el líquido. La actividad de los reactivos colectores se acentúa por otros aditivos llamados activadores, los cuales en los sólidos producen una superficie capaz de adsorber al colector.

Otros aditivos llamados depresores efectúan la tarea puesta a los activadores. En combinación adecuada, los activadores y los depresores promoverán la flotación de las fases deseadas.

[12]

Concentración de aceite en el influente. Las pruebas de recuperación de aceite con un 10% de soluciones de NaCl y tanques para gas disperso, nos indican que la recuperación de aceite crece de 60 a 90% conforme la concentración de aceite en el influente aumenta de 100 a 200 mg/l. No hay cambio en el % de remoción de aceite entre una concentración de aceite en el influente de 200 a 400 mg/l.

La recuperación de aceite empleando el tanque para gas disperso sube de 50 a 65% cuando la concentración de aceite en el influente se aumenta de 100 a 200 mg/l. Cuando dicha concentración aumenta de 200 a 400 mg/l, no hay cambio en el % de remoción de aceite.

Pruebas adicionales demostraron que utilizando el tanque para gas disperso aumenta el número de pequeñas gotas de aceite provenientes de gotas grandes. Con esto se concluyó que las pequeñas gotas de aceite se fusionan con las burbujas de gas lo cual reduce la concentración de gas, lo que a su vez provoca baja recuperación de aceite.

Tipo de aceite o petróleo crudo. Strickland examinó el efecto de 3 tipos de petróleo sobre la remoción de aceite con gas disperso y encontró una diferencia significativa. La concentración de aceite, distribución del tamaño de la gota y composición del agua (10% de NaCl) fueron las mismas para todas las pruebas.

Efecto de pH y temperatura. En un minuto de pruebas de flotación con gas disperso y pH's bajo y alto (2 y 11), hubo alta recuperación de aceite que a un pH normal (aprox. 6.8).

Sin embargo si el tratamiento dura 10 min. la recuperación de aceite decrece arriba de un pH de 8. Un estudio revela que a tensiones superficiales bajas, el agua desarrolla un pH alto a un tiempo suficiente. Esto indica que el minuto de pruebas no fue suficiente.

El cambio de temperatura ambiente a 140 °F aumenta ligeramente la recuperación de aceite a valores de pH normal.

En esas pruebas también se observó que en la flotación con gas disperso se presenta una mayor recuperación de aceite, demostrando otra vez que las burbujas pequeñas son mas efectivas que las grandes.

Strickland concluye de sus estudios que la remoción de aceite aumenta al aumentar el tamaño de la gota de aceite, concentración del gas y disminución del tamaño de burbuja.

[11]

#### Evaluación del parámetro A/S

Para el diseño de las unidades de flotación, un parámetro fundamental utilizado es la relación A/S definida por:

$$(A/S) = (\text{lb por día de gas presurizado}) / (\text{lb por día de sólidos totales en el influente})$$

Este parámetro es estimado por estudios realizados en pruebas de laboratorio o plantas piloto. El valor de A es obtenido de determinaciones con unidades para gas disuelto.

Para aire se tienen las siguientes ecuaciones:

$$A = 8.34 * Q * (C1 - C2) \text{ [=] lb/día de aire}$$
$$S = 8.34 * Q * Si \text{ [=] lb/día de sólidos totales}$$

donde : Q = MGalones de agua residual por día.  
C1 = lb de aire libre (en exceso) que sale del  
recipiente de retención por MGalón de agua  
residual.  
C2 = lb de aire disuelto en el agua efluente por  
MGalón de agua residual.  
Si = Concentración de sólidos totales en el  
influyente en mg/l.

Por lo tanto:

$$(A/S) = (C1 - C2) / Si$$

Si el sistema tiene recirculación, entonces:

$$A = 8.34 * R * (C1 - C2)$$

donde : R = MGalones por día de afluente recirculado  
Por lo tanto:

$$(A/S) = (R/Q) * (C1 - C2) / Si$$

[14]

## 7.4 MEMBRANAS

El desarrollo tecnológico ha capacitado a los ingenieros para purificar el agua. Los procesos que han utilizado son diversos y entre ellos se encuentran los procesos de membrana, los cuales no involucran cambio de fase y el consumo de energía es muy bajo.

Las membranas son láminas o capilares utilizadas en un proceso de separación y tienen la propiedad de retener ciertas sustancias en estado líquido o gaseoso, pero que al mismo tiempo, permiten el paso de otras sustancias. Esta propiedad se conoce igualmente con el nombre de semipermeabilidad. (En la investigación se utilizan membranas líquidas para casos muy especiales).

Las membranas se fabrican mediante polímeros, como celulosa, poliamida, polisulfón, o también membranas de alúmina, etc. La capacidad de retención de diversos tamaños de partícula y el principio activo conducen a la siguiente subdivisión de orientación: Microfiltración (MF), Ultrafiltración (UF), Osmosis Inversa (RO), y Separación de Gases.

Para la separación de aceite y agua se utilizan los procesos de ósmosis inversa y ultrafiltración.

[15]

### 7.4.1 Osmosis Inversa

La ósmosis ha sido conocida por más de 200 años como un proceso natural que involucra flujo a través de una membrana semipermeable. Una membrana semipermeable es selectiva a ciertos componentes de una solución, usualmente el solvente pasa a través de ella, mientras que los sólidos disueltos (solute) no pasan. La dirección de flujo del solvente está determinado por su potencial químico, el cual está en función de la presión, temperatura y sólidos disueltos.

[16]

El solvente deja de pasar por sí solo a una presión llamada presión osmótica a la cual, se alcanza el equilibrio y la cantidad de disolvente que pasa en ambas direcciones es la misma o en otras palabras ya no hay flujo de disolvente. Si la membrana semipermeable se considera ideal, entonces la presión osmótica es una propiedad de la solución solamente.

Si la presión en el lado de la solución se incrementa por encima de la presión osmótica, la dirección del flujo se invierte. Entonces el disolvente puro pasará desde la solución hacia el disolvente que previamente ya había pasado a través de la membrana hasta el equilibrio. Este fenómeno constituye la base de la ósmosis inversa aplicada en el tratamiento de agua residual.

[7]

La presión osmótica  $D$  de una solución puede ser determinada por:

$$D = 1.12 * (T + 273) * \sum m_i$$

donde :  $T$  = Temperatura absoluta en °C  
 $\sum m_i$  = Sumatoria de las molalidades de todas las iones y no iones en la solución

[16]

Si la solución se considera ideal (o solución diluida), la presión osmótica se puede determinar por :

$$D = (n / V_m) * R * T$$

donde :  $n$  = Número de moles de soluto  
 $V_m$  = Volumen molar del agua  
 $R$  = Constante de los gases  
 $T$  = Temperatura absoluta en °K

[7]

El flujo de solvente (agua) que pasa a través de la membrana, puede ser determinado aproximadamente por :

$$Q_w = (\bar{S}P - \bar{S}D) * K_w * A / \bar{E}$$

y para el soluto:

$$Q_s = \bar{S}C * K_s * A / \bar{E}$$

donde:  $Q_w$  = Flujo a través de la membrana  
 $\bar{S}P$  = Presión diferencial en la membrana  
 $\bar{S}D$  = Presión diferencial osmótica en la membrana  
 $K_w$  = Coeficiente de permeabilidad de la membrana hacia el agua  
 $A$  = Área de la membrana  
 $\bar{E}$  = Espesor de la membrana  
 $Q_s$  = Flujo de soluto a través de la membrana  
 $\bar{S}C$  = Concentración diferencial en la membrana.  
 $K_s$  = Coeficiente de permeabilidad de la membrana hacia el soluto. Para una membrana semipermeable perfecta,  $K_s$  debe ser cero.

[16]



#### 7.4.2 Ultrafiltración

La ultrafiltración al igual que la ósmosis inversa es un proceso en el cual se emplea una membrana porosa para separar solutos de una solución acuosa. En este proceso también se aplica una presión a la solución para provocar el flujo del disolvente a través de la membrana.

La diferencia radica en que los poros de la membrana en la ultrafiltración son de mayor diámetro, lo cual indica que solutos inorgánicos pueden pasar a través de la membrana y sólidos de alto peso molecular (compuestos orgánicos) y sólidos suspendidos son rechazados. Además la ultrafiltración no está controlada por la presión osmótica y puede llevarse a cabo a diferencias de presión bajas.

[17]

La figura 7.4 muestra ambos procesos.

El flujo a través de una membrana para UF puede ser aproximado por:

$$Q_w = \bar{S}P * K * A / \bar{E}$$

donde :  $Q_w$  = Flujo a través de la membrana  
 $\bar{S}P$  = Presión diferencial en la membrana  
 $K$  = Constante de permeabilidad de la membrana  
 $A$  = Área de la membrana  
 $\bar{E}$  = Espesor de la membrana

[16]

En la tabla I se muestran las propiedades más importantes de procesos de separación por membrana.

La ventaja que aporta la utilización de membranas a la separación de sustancias en medios líquidos o gaseosos son numerosas. A continuación se mencionan las más importantes:

- El proceso de separación tiene lugar a la temperatura ambiente, pero también hasta los 90 °C. No se necesita ningún cambio de fase.

- La energía utilizada es mucho menor que la que se necesita en otros métodos.

- Permiten una separación selectiva de sustancias indeseables (limpieza) o deseadas (concentración).

- La operación produce pocas emisiones. No se producen gases de escape adicionales, ni venenosos ni ruido excesivo.

TABLA I.

MÉTODOS MAS IMPORTANTES DE SEPARACION POR MEMBRANA

Proceso	Fase Participantes	Temperatura	Presión	Fuerza Separadora	Zona De Retención
Microfiltración	Líquido-Líquido	Hasta 60 °C	Hasta 10 bar	Diferencia De Presión	Partículas de hasta 0.2000 $\mu\text{m}$
Ultrafiltración	Líquido-Líquido	Hasta 90 °C	Hasta 10 bar	Diferencia De Presión	Partículas de hasta 0.0100 $\mu\text{m}$
Osmosis Inversa	Líquido-Líquido	Hasta 45 °C	Hasta 100 bar	Diferencia De Presión	Partículas de hasta 0.0001 $\mu\text{m}^*$
Separación Gases	Gas-Gas	Hasta 60 °C	Hasta 30 bar	Diferencia De Presión	Diferencia de presión parcial y solubilidad en el solvente**

\* Dependientes de las partículas (iones, moléculas) debido al diferente coeficiente de difusión, estado de hidratación y forma.  
 \*\* Dependiente del polímero, de la concentración, de la temperatura, etc.

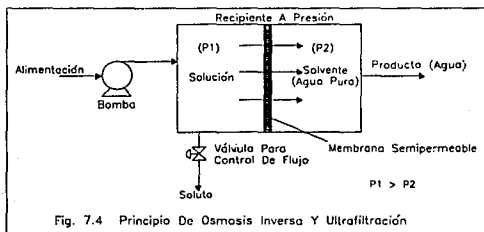


Fig. 7.4 Principio De Osmosis Inversa Y Ultrafiltración

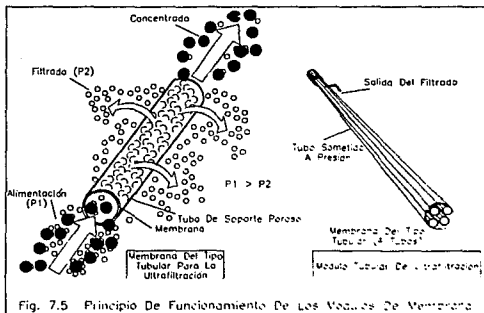


Fig. 7.5 Principio De Funcionamiento De Los Vasos De Membrana

- Las instalaciones de separación por membranas son fáciles de maniobrar y funcionan de manera totalmente automática.

### **Aplicación**

Las aguas residuales con contenido de aceite, como emulsiones utilizadas en la mecanización de piezas con extracción de virutas, aguas de lavado de las fábricas de tratamiento de chapa, etc., se encuentran sujetas a prescripciones más o menos severas según el país.

La separación del agua y aceite se puede llevar a cabo de varias maneras. Una de ellas y que no se ha mencionado antes, es la evaporación del agua lo cual es muy costoso en lo que respecta a consumo de energía. Al final del proceso se obtiene un concentrado de aceite.

El proceso químico exige la utilización de ácidos, álcalis y coagulantes. Una vez efectuada la separación, es preciso evacuar el lodo que se produce. Los costos de inversión son menores, en cambio, los costos de explotación son altos.

La ultrafiltración se encarga de la concentración de aceite de una emulsión o de un agua residual, separándose al mismo tiempo, de manera continua, el agua. Las moléculas de agua atraviesan la membrana bajo presión (de 4 a 4.5 bar), quedando retenidas las macromoléculas del aceite. El principio de funcionamiento de los módulos de membrana utilizados se desprende de la figura 7.5.

La filtración propiamente dicha se realiza en módulos tubulares contruidos de manera especial. Las membranas se encuentran incorporadas en estos tubos en la parte interior de un tubo de apoyo poroso. Esta forma tubular permite una alta velocidad de circulación, de manera que a lo largo de la superficie de la membrana existe siempre un flujo turbulento.

El resultado de esto es que el espesor de la capa debida al proceso que se encuentra sobre la membrana no aumenta, es decir, que no obstruye los microporos de la membrana. En caso de un cuidadoso y limpieza correctos de las instalaciones, tales módulos tubulares aseguran una duración de funcionamiento de más de dos años.

La ultrafiltración permite la automatización completa, y solo exige un mantenimiento simple. Esto supone muy bajos costos de operación lo cual compensa, con mucho, los costos de adquisición más altos.

Por su modo de operación simple, la ultrafiltración resulta adecuada, en particular, para lugares donde se colectan diferentes tipos de emulsiones agua-aceite o aguas residuales que contengan aceite. La ultrafiltración permite reducir el contenido de aceite hasta cien veces. El agua separada responde a las prescripciones en vigor de las aguas residuales, y el concentrado puede utilizarse como combustible o bien ser tratado de nuevo en el reciclado.

[15]

La estructura de las membranas es un factor muy importante para la eficiencia del proceso. Por ejemplo las membranas poliméricas asimétricas han sido usadas por varios años para el tratamiento de aguas residuales aceitosas, además de las membranas inorgánicas de alúmina, zirconia y superficies porosas de acero inoxidable ya que ofrecen resistencia térmica así como también eliminan los problemas asociados con el desarrollo bacterial en las paredes de los poros de la membrana. Estas membranas tienen una estructura microporosa asimétrica. Este tipo de membranas es fabricada por Alcoa Separations Technology Division, Warrendale, Pennsylvania, USA. Están disponibles en tubos porosos individuales o como elementos monolíticos acanalados. Cada elemento monolítico tiene 19 canales.

[18]

El estudio de un proceso de ultrafiltración u ósmosis inversa para la separación aceite de agua requiere de un análisis de los siguientes parámetros: presión de trabajo, flujo de alimentación, concentración inicial de aceite en la emulsión, concentración final de aceite, flujo de ultrafiltrado, grado de desestabilización de la emulsión, colmatación de la membrana, factor de concentraciones, afinidad de la membrana hacia las especies, área y espesor de la membrana.

## **7.5 SEPARACION ACEITE-AGUA MEDIANTE LA ACCION DE CORRIENTE ELECTRICA.**

La corriente eléctrica es un medio efectivo que ayuda en los procesos de separación de aceite y agua. A continuación se mencionan tres maneras de utilizar la corriente eléctrica para la separación.

### **7.5.1 Celdas Electrolíticas**

Las aguas residuales obtenidas de procesos donde se trabajan metales generalmente contienen aceites en forma libre o suspendida y emulsionado químicamente. Esos aceites deben ser removidos antes de que el agua sea descargada o reutilizada. El agua residual tiene alrededor de 1000 a 10000 mg de aceite por litro de agua. El aceite libre puede ser removido por gravedad y un desnatado mecánico, pero remover el aceite emulsificado es más complicado.

Esas aguas emulsionadas comúnmente son tratadas por procesos químicos por lotes, adicionando coagulantes como sales de fierro o aluminio y polímeros, donde al aceite queda absorbido en los precipitados formados de fierro o aluminio. Este método produce agua de buena calidad, pero genera gran cantidad de sólidos disueltos y lodos de gran volumen que contienen aproximadamente 5% de aceite o más.

El proceso electrolítico está basado en la generación in-situ de iones ferroso y no requiere de pruebas adicionales ni ajuste de las cantidades de productos químicos. Este es un proceso continuo y en comparación con el proceso por lotes, requiere poco espacio, hay menor cantidad de sólidos disueltos que con tratamiento químico, produce lodos con alto contenido de aceite y se puede automatizar.

Este método consiste en que el catión reactivo fierro es introducido electrolíticamente como ión ferroso, seguido de una oxidación in-situ al estado férrico y subsecuente precipitación como hidróxido férrico. La emulsión es desestabilizada durante la oxidación antes de que ocurra la coagulación y floculación. La desemulsificación de aceite es entonces, removida por sorción en los microfloculos dispersados de hidróxido férrico.

A continuación se describe una celda electrolítica que se utilizó en un estudio experimental.

[19]

El diagrama esquemático de la celda electrolítica se muestra en la figura 7.6. El agua residual entra a la celda y penetra a través de una cama rectangular con astillas de acero con bajo contenido de carbono que son producto de cortes hechos al acero; éstas actúan como ánodo. Después el agua residual pasa a través de una lámina metálica perforada que actúa como cátodo.

Concentraciones bajas de cloruros o sales de sulfato son convenientes para prevenir la pasivación en el ánodo y aumentar la conductividad iónica. Se aplica suficiente voltaje para disolver la astilla formando iones ferrosos, los cuales reaccionan con el agente emulsificante, liberando el aceite. Los iones hidroxilo son formados en el cátodo. El aceite es sorbido en el floculo de hidróxido férrico el cual es formado por la oxidación de los iones ferroso. Los lodos de hidróxido férrico ricos en aceite se hacen flotar hasta la superficie, los cuales son recogidos por el medio mas conveniente.

La celda electrolítica utilizada en ese estudio se construyó de plexiglas de 1.27cm de espesor y estructura en ángulo de acero. La celda es de 91 cm de ancho, 61 cm de altura y 244 cm de longitud. El agua residual entra a la celda a través de una válvula con salidas múltiples para asegurar una distribución uniforme del flujo a través del electrodo.

La jaula anódica tiene 7.6 cm y es construida de titanio dilatado con perforaciones en forma de diamante, tiene un tamaño aproximado de 1.5 \* 0.5 cm. El titanio puede corroerse por acción galvánica, por tal motivo se reviste con barniz.

La parte frontal de la jaula anódica es forrada con una malla de polietileno con perforaciones de aproximadamente 0.15 cm. La malla se instala para asegurar que las astillas de acero no lleguen a la superficie y hagan contacto con el cátodo u ocupen el espacio que hay entre los electrodos.

La jaula anódica se llena con astillas de acero. El tamaño óptimo de las astillas se encuentra entre 1 ó 2 cm de longitud con diámetro rizado de 0.2 a 0.5 cm. Astillas de diámetro mas pequeño tienden a enmarañar, causando dificultades al empacarlas en la jaula anódica. La distancia entre el ánodo y cátodo es de 1.27 cm. Existen 4 cm entre el cátodo y la superficie de la celda para evitar la posibilidad de un corto circuito con astillas desprendidas. El cátodo se encuentra 1 cm arriba de la superficie del agua y así permitir que los lodos aceitosos floten y evitar que se acumulen entre los electrodos.

La flotación de lodos se realiza con la ayuda de un equipo para flotación con aire disuelto. Las pequeñas burbujas formadas por el aire hacen contacto con sólidos y/o aceite, haciendo que éstos lleguen a la superficie.

Este método se puede emplear para obtener hasta 65% de aceite en los lodos obtenidos.

[19]

### 7.5.2 Coalescencia Electroestática

Las dispersiones y emulsiones de agua en aceite ó aceite en agua, o líquidos que tienen características semejantes al agua y al aceite, pueden ser separados por la acción de una fuerza eléctrica. En la actualidad, este método se aplica a gran escala solo en la industria del aceite, donde se aplican altos y pequeños voltajes de C.A. y altos voltajes de C.D. para separar agua del aceite ó petróleo. El efecto del campo eléctrico es causar la coalescencia (fusión) del agua dispersa que esta en forma de pequeñas gotas; aunque la forma de como ocurre no está claramente entendida. El equipo para lograr esta separación es llamado separador electrostático líquido-líquido.

El campo eléctrico acelera en forma efectiva la separación de las fases en estos sistemas. Los elementos esenciales de esa ruptura son los campos de C.D. pulsante cuando son utilizados en conjunto con electrodos revestidos que pueden fusionar la fase dispersa, aunque ésta represente el 50% del volumen de la dispersión. La fuerza del campo y la frecuencia pulsante son los factores que gobiernan la ejecución. Una correcta combinación, por ejemplo, 80 V/cm y 8 Hz dan un excelente resultado con un bajo consumo de energía.

La aplicación de esta técnica es de gran importancia práctica en sistemas en los cuales el grado de dispersión es menor del 50%. Tales sistemas se encuentran comunmente en extracción por solventes y aguas de lavado de aceites vegetales y minerales. Por ejemplo, en la industria del petróleo es necesario desalinizar el petróleo mediante el contacto con agua, creandose emulsiones de agua en petróleo que contienen de 5 a 10% de agua.

La efectividad del campo eléctrico en la separación agua-aceite con diferentes grados de dispersión se estima en terminos del parámetro de coalescencia P. Este representa el % de reducción de la dispersión.

Minimizar el arrastre es uno de los problemas que hay que enfrentar al diseñar y utilizar los equipos de contacto líquido-líquido. El arrastre se refiere a las gotas de agua que arrastran durante la difusión gotas de aceite.

[20]

Una vez que se ha roto la emulsión, es decir, la dispersión de las fases ha desaparecido, es necesaria entonces, la separación de las fases. Para esto se utiliza una membrana líquida semipermeable, la cual permite el paso de líquidos miscibles en ella y lo impide a los que no lo son. Esto es similar a una extracción por solventes. Por ejemplo, la emulsión a romper puede ser tetracloruro de carbono y agua. La membrana líquida sería el ciclohexano. Las especies pueden estar en un mismo recipiente. Al aplicar corriente eléctrica, se rompe la emulsión, se coalesce la fase dispersa y el tetracloruro de carbono se difunde en el ciclohexano. El tetracloruro de carbono no se hace miscible en el ciclohexano, porque el primero está químicamente estabilizado en la emulsión. En una etapa se lleva a cabo la coalescencia electrostática y en una segunda etapa la separación con la membrana líquida.

[21]

Se cree que las gotas de agua se polarizan en el campo eléctrico creando fuerzas entre ellas mismas, causando su aceleración y de esta manera sufren colisiones y su subsecuente coalescencia. En la frecuencia óptima, el campo eléctrico es lo bastante extenso para que las gotas acuosas logren su polarización inducida total. Las fuerzas entre las gotas están a un máximo bajo esas condiciones eléctricas, provocando un número máximo de colisiones y por lo tanto se alcanza la coalescencia mejor posible.

A frecuencias mas bajas de la óptima se requiere mas tiempo para que las gotas de agua se polaricen; esto se debe a que la velocidad para alcanzar la polarización total disminuye, es decir, el campo eléctrico no cambia lo suficientemente aprisa.

A frecuencias mayores de la óptima, el campo eléctrico no tiene la suficiente extensión para conseguir el estado de polarización total y por supuesto las gotas solo se polarizan hasta donde se extiende el campo eléctrico.

Si la fuerza del campo eléctrico aumenta, entonces el nivel de polarización también lo hará, incrementando las fuerzas de atracción entre las gotas de agua, aumentando las colisiones y por ende la coalescencia. Aunque esto no modifica la frecuencia óptima, si puede reducir el efecto de ésta.



El sistema consiste de dos electrodos revestidos con un dieléctrico (no conductor). Entre ambos electrodos se establece el campo eléctrico. Si los electrodos no están revestidos, la solución cerraría el circuito, provocando la descomposición del agua en sus elementos y no así su coalescencia a causa del campo eléctrico. La característica principal de éste sistema, es la relación polarización/relajación. El término relajación está referido al tiempo necesario para que se presente un cambio en el sistema. Así para presenciar la fusión de las gotas, se requiere que el campo eléctrico haga efecto y para que esto suceda es necesario que pase cierto tiempo. Pasa un tiempo en lo que se polariza el electrodo, otro tiempo en el que el campo eléctrico llega al dieléctrico y lo atraviesa, otro tiempo para que se extienda en la solución y así sucesivamente. Por lo tanto el sistema depende del tiempo de relajación en las interfases y el promedio de los tiempos individuales de relajación de los dieléctricos.

La frecuencia óptima puede ser calculada sobre éstas bases con:

$$N = (2.48 / E * E_0 * A) * (I_m / x * E_{max})$$

donde:  $N$  = Frecuencia de colisión media de la gota.  
 $E$  = Constante dieléctrica de fase continua (por ejemplo la del ciclohexano, membrana líquida) o permitividad absoluta.  
 $E_0$  = Permitividad de especies libres (F/m).  
 $A$  = Area del electrodo (m<sup>2</sup>).  
 $I_m$  = Corriente de conducción media (Amp.).  
 $x$  = Fracción volumétrica, grado de dispersión.  
 $E_{max}$  = Fuerza del campo eléctrico máximo (V/m).

[20]

### 7.5.3 Electroflotación

En ciertas aguas, suficientemente mineralizadas es posible realizar en su seno una electrólisis mediante la circulación de una corriente eléctrica por una serie de electrodos sumergidos en el agua. De esta forma se logra un desprendimiento de finísimas burbujas de hidrógeno y oxígeno, cuyo efecto ascensional produce altos rendimientos de separación de los sólidos floculados.

[13]

La representación esquemática se muestra en la figura 7.7.

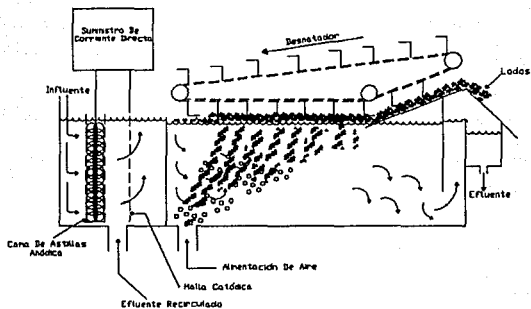


Fig. 7.6 Esquema De La Celda Electrofítica

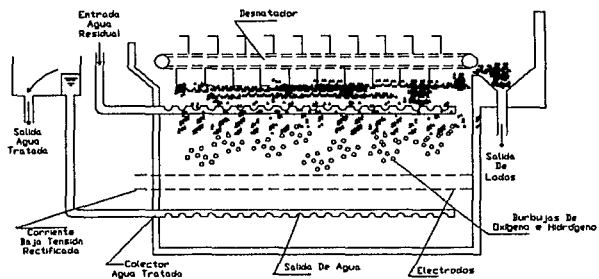


Fig. 7.7 Esquema De La Celda Para Electroflotación

# 8 DESCRIPCION DEL PROCESO

## 8. DESCRIPCION DEL PROCESO

### 8.1 Limpieza De Virutas

Se clasifica el desperdicio de aluminio de acuerdo a su forma física y tipo de aceite en:

- (a) Virutas largas y rizadas con aceite de corte directo.
- (b) Virutas cortas y rotas con aceite soluble en agua.

Es importante determinar el % en peso promedio de aceite que contiene cada tipo de viruta. Para ésto se sigue la siguiente técnica experimental:

#### Viruta con aceite de corte directo

1. Pesar en una balanza analítica 10 muestras de virutas de 100 g c/u. El muestreo se realiza en distintos puntos de los diferentes lotes a los cuales se les determina el contenido de aceite. Triturar cada muestra para que ocupe el menor volumen posible.

2. Colocar cada muestra en un vaso de pp con capacidad suficiente para depositar las virutas.

3. Agregar al primer vaso de pp el disolvente hexano hasta que éste cubra totalmente la viruta, agitar y separar el hexano.

4. Agregar nuevamente hexano limpio al primer vaso de pp, agitar y separar el hexano, el cual no deberá mezclarse con el primero.

5. Secar la viruta en una estufa a 80 °C para que se evapore el hexano residual. Pesar la viruta en la balanza analítica. La diferencia de pesos nos dará los gramos de aceite que tienen los 100 g de viruta, esto es:

$$\% \text{ en peso de aceite} = \left( 100 - \left( \frac{\text{Peso final de la viruta (g)}}{100} \right) * 100 \right)$$

6. Hacer lo mismo con las otras nueve muestras, usar el hexano utilizado para la primera muestra, sin mezclarlos nuevamente. Lo anterior es con el fin de no contaminar el hexano más limpio. Utilizarlo hasta la quinta muestra. Recuperar el hexano por destilación.

7. Hacer un promedio de los %'s en peso obtenidos de las 10 muestras.

8. Otra alternativa para determinar el % en peso de aceite en las virutas, es repetir los pasos 1 a 4 y juntar todo el hexano utilizado para la primera muestra en un vaso de pp previamente tarado; destilar el hexano para recuperarlo y llevar a sequedad (libre de hexano) el vaso de pp en una estufa a 80 °C y la diferencia de pesos entre el vaso de pp limpio al inicio y el vaso de pp después de la evaporación a sequedad nos dará los gramos de aceite que contienen los 100 g de viruta de aluminio, de ésta manera:

$$\% \text{ en peso aceite} = \left( \frac{\text{gramos de aceite contenidos en la viruta}}{100} \right) * 100$$

9. Realizar el punto #7 para obtener el % en peso promedio.

#### **Viruta con aceite soluble**

1. Repetir los 7 pasos anteriores con la viruta contaminada con aceite soluble para obtener el % en peso de aceite. Las remociones se harán hasta que el hexano ya no tñe después de la remoción.

Es importante dar a conocer que el % de aceite soluble removido incluye aceite y agua emulsionados y no únicamente el aceite. El hexano se recupera por destilación.

#### **Optimización**

Con la optimización se pretende reducir al mínimo el consumo de materias primas para la limpieza del metal: agua y detergente industrial para una cantidad dada de virutas.

Para lograr esto se procedió de la forma siguiente:

En un recipiente 1 previamente tarado, se agrega 1 litro de agua, 20 gramos de detergente industrial y una carga de

50 g de virutas sucias. Se sella el recipiente y se agita manualmente por 2 minutos. Se filtra la solución a un recipiente 2.

Al recipiente 1 donde quedó la viruta se le agrega un litro de agua limpia, se sella nuevamente y se agita por dos minutos. Se filtra la solución y el recipiente 1 conteniendo las virutas se traslada a una estufa para su secado a 100 °C. La diferencia de pesos entre el recipiente 1 con los 50 gramos de virutas y el recipiente 1 con virutas llevados a sequedad y tarados, nos proporciona la cantidad de aceite removido, esto es:

$$\% \text{ aceite removido} = \left( 1 - \left( \frac{\text{g de aceite al final en la viruta}}{\text{g de aceite al inicio en la viruta}} \right) \right) * 100$$

6

$$\% \text{ aceite removido} = \left( \frac{\text{g de aceite removido}}{\text{g de aceite en la carga}} \right) * 100$$

Lo anterior nos llevó a dos operaciones: lavado y enjuague respectivamente.

El agua residual producto del primer lavado se utiliza nuevamente para lavar otra carga de 50 g de virutas. Realizar el enjuague con el agua obtenida del primero. Secar la viruta y determinar el % de remoción de aceite.

Repetir ésta operación hasta que el % de remoción sea menor al 60%.

Todo lo mencionado en los párrafos anteriores se aplica de igual forma para cargas de 100g , 150g, 200g, y así sucesivamente, hasta que el agua ya no sea suficiente para cubrir en su totalidad la viruta. Lo anterior es un factor importante que se utiliza en la técnica de burbujeo mencionada más adelante.

Con el fin de seleccionar el detergente más adecuado, se experimentó con los siguientes detergentes: ALTREX, Berilio 700, desengrasante RX líquido y un detergente casero, para la limpieza de ambos tipos de virutas. Se determinó la concentración residual de cada detergente después de cada lavado siempre y cuando fue posible. Lo anterior se cita, debido a que no se tuvieron los medios adecuados para realizar dicha determinación con dos de los 4 detergentes, casero y desengrasante RX.

Seleccionado el detergente óptimo, su dosificación, cantidad de agua y virutas a tratar, se procede entonces, a utilizar la técnica siguiente con el fin de utilizar mayores cantidades de materias primas, así como el ajuste de éstas y de ésta manera hacer más real el proceso.

#### **Limpieza de virutas utilizando burbujas de aire como medio de agitación.**

El proceso de limpieza de virutas consiste en inyectar aire y provocar agitación mediante el burbujeo en un recipiente que contiene 5 litros de agua, el detergente óptimo y una canastilla en la cual estarán las virutas sucias.

Los recipientes son de acrílico y tienen de dimensiones 30 cm largo, 18 cm ancho y 20 cm altura. La canastilla mide 26 cm largo, 16 cm ancho y 25 cm altura y está elaborada con malla de acero inoxidable #80.

El propósito de la canastilla es contener las virutas y así poderlas sacar del recipiente sin ningún problema y trasladarlas hacia otro recipiente que contendrá también 5 litros de agua para su enjuague. En éste último se utiliza por igual el burbujeo con aire.

El aire entra a una presión de 10 Psig, y es suministrado por un compresor de 1/3 HP. La presión se controla y por lo tanto el flujo de aire con una válvula de aguja (reguladora de aire) y un manómetro adaptado a ella.

En el fondo de la canastilla están ubicados 7 difusores con una longitud de 10 cm c/u. A través de ellos se asegura la salida del aire en forma distribuida. De esta manera, las burbujas siempre están en contacto con el aluminio provocando el desprendimiento de aceite de la viruta hacia el agua donde parte de él se emulsiona y parte no.

El tiempo de burbujeo es de 15 min. Al término de éstos, se saca inmediatamente la canastilla, se deja escurrir y se trasladada al segundo recipiente de acrílico para su enjuague únicamente con agua. (Inmediatamente se retira la canastilla para evitar que el aceite no emulsionado ascienda a la superficie y ensucie la misma viruta; es decir, se aprovecha que las gotículas de aceite no emulsionado están finamente dispersas). El aceite no emulsionado y haciendo nata, se retira manualmente por uno de los lados y por la parte superior del recipiente.

Se inyecta aire por 10 minutos para llevar a cabo la operación de enjuague. Se saca la canastilla, se deja escurrir y la viruta se traslada a un recipiente extendido para secarla en la estufa a una temperatura de 100°C. Se determina el % de remoción de aceite de la misma forma como se indicó antes, y se determina la concentración residual del detergente óptimo. De ésta manera se van ajustando las cantidades de agua y detergente para una cantidad mayor de metal.

Para determinar la concentración del detergente industrial, se utiliza una solución indicadora proporcionada por el mismo fabricante del detergente. Es un método rápido y aunque no muy exacto, si nos proporciona una idea muy clara de cuanto está presente. Por ej., para el detergente ALTREX, se toma una muestra de 1.5 ml y se agrega una gota del indicador. Al agregarla, la solución se tornará de color rojo (en ausencia de detergente, el color rojo no aparece), seguir agregando gotas hasta que ese color desaparezca. El número de gotas por un factor de 4.3 nos da la concentración del detergente aproximadamente. El gotero es proporcionado por el mismo proveedor. Para soluciones diluidas se toma una muestra mayor, el consumo de indicador aumenta y únicamente se utiliza la proporcionalidad para determinar la concentración del detergente; es decir, si en una muestra de 3 ml se consumieron 10 gotas, en la muestra de 1.5 ml se consumirán 5 gotas.

Toda la operación se repite para una segunda o tercera carga utilizando el agua misma que resulta del lavado y enjuague.

En ésta técnica se aprovecha la emulsificación del aceite y agua por la presencia del detergente y agitación prolongada. No todo el aceite se emulsiona, sobre todo el aceite de corte directo. Se deja reposar aproximadamente 30 minutos para que por gravedad el aceite no emulsionado ascienda a la superficie y haga nata. En el agua de enjuague es muy mínima la formación de nata para esa cantidad de agua.

Una ventaja que se tiene con el aceite soluble, es precisamente su solubilidad en agua, debida a la presencia de emulsivos; de ésta manera, el aceite adherido a las virutas se solubiliza en el agua, ayudado además por el detergente y agitación que lo emulsionan. Parte del aceite puede llegar a ser liberado de la emulsión, ó puede venir adherido a las virutas no emulsionado. Esto favorece grandemente en el consumo de detergente, el cual es mucho menor al utilizado con la viruta contaminada con aceite de corte directo.



El motivo por el cual es necesario que el agua cubra en su totalidad las virutas es para que el burbujeo haga contacto con las virutas que están en la superficie.

Una alternativa con las virutas largas y rizadas es triturarlas para que ocupen un menor volumen. En ésta ocasión se utilizan las virutas en su estado original.

## **8.2 Tratamiento Del Agua Residual.**

Después de haber establecido definitivamente la técnica de limpieza, el agua de lavado es drenada después de los 30 minutos de reposo a otro recipiente para su tratamiento. El aceite no emulsionado se almacena en otro recipiente.

El tratamiento del agua residual se realiza al agua proveniente del lavado, enjuague y mezcla de ambas y de acuerdo a los resultados obtenidos en la caracterización del agua tratada, obtención de lodos y dificultad para llevar a cabo el tratamiento, se elige entonces, si el tratamiento se hace por separado ó uno solo a la mezcla.

El tratamiento del agua residual propuesto para este sistema, sería el de coagulación con una sal metálica e hidróxido de sodio y un polímero comercial (poliacrilamida).

### **Optimización**

Para optimizar la dosificación de reactivos : coagulante, hidróxido de sodio (sosa) y polímero, se agregan 20 ml de muestra en un vaso de pp. En el caso de la mezcla, se toman 10 ml del agua residual proveniente del lavado y 10 ml del enjuague.

A cada muestra se le mide el pH con papel indicador cuyo rango de pH es de 0 a 14. Se agrega sosa 6 M hasta que el pH alcance un valor de 13 unidades.

Se dosifica una cantidad dada de coagulante en polvo y poco a poco. Se agita vigorosamente para su disolución. Si con esa cantidad no hay presencia de grumos, añadir otra igual y de la misma forma hasta la formación de los coágulos. Posiblemente la coagulación sea ineficaz debido a la relación que hay entre pH y la cantidad dosificada de coagulante.

La prueba anterior es únicamente para saber aproximadamente el óptimo de dosificación y así poder agregar en pequeñas cantidades el coagulante a las otras muestras en un intervalo en el cual se asegura una coagulación efectiva.

Una vez encontrada la relación óptima de dosificación entre coagulante y sosa, se empieza a agregar el polímero hasta observar la formación de agregados grandes, o en otras palabras, la separación visible entre sólidos y agua.

Se determina el pH final después de haber obtenido una coagulación y floculación efectivas.

Se utilizaron dos coagulantes, sulfato de aluminio y sulfato ferroso. Ambos se agregan en polvo y se disuelven agitando en forma manual. El tiempo de disolución es aproximadamente de 15 segundos con agitación vigorosa para los 20 ml de muestra.

Se emplean dos polímeros, Complex-200 y el AP-30, que son poliácridamidas no iónicas. El AP-30 es de mayor resolución que el complex-200. Ambos son producidos por la compañía Complex Química S.A.

Ambos polímeros se preparan al 0.1% y se dosifican directamente seguidos de una agitación manual. Dicha agitación debe ser lenta y no prolongada, debido a que se puede romper el enlace polímero partícula, provocando la ruptura del agregado ya formado.

El complex-200 es una suspensión la cual se disuelve fácilmente en agua. La concentración recomendada por el fabricante es del 0.1%.

El AP-30 es sólido en polvo y es soluble en agua, aunque la solubilización es lenta. Se requiere aproximadamente de 30 minutos para disolver 1 g de AP-30 en un litro de agua que es una concentración recomendada por el fabricante.

La agitación prolongada es innecesaria debido a que la velocidad con que se forman los agregados es muy alta. Es cuestión de que pasen 1 ó 2 segundos para que se forme el agregado.

Una vez determinadas las dosificaciones óptimas de reactivos se procede entonces, a tratar agua residual en mayor cantidad, hasta el tratamiento del agua residual total obtenida de la limpieza del metal.

Después de la formación de agregados más grandes utilizando el polímero, el agua residual tratada más

sólidos, se drenan y se envían hacia un papel filtro de poro mediano para filtrarlos por gravedad.

Encontradas las dosificaciones óptimas, se realizó el tratamiento a los casi 10 litros de agua residual (debido a que se pierde agua durante el lavado y enjuague); se realizó la caracterización del agua tratada, determinando los siguientes parámetros: DQO, aceites y grasas, sólidos totales, alcalinidad y dureza total. La técnica para determinar éstos parámetros son recomendados por el Methods Stardar.

[22]

La caracterización del agua se realiza cada vez que el agua residual tratada ha sido reutilizada 1, 2, 3, etc. veces.

La remoción de aceite y caracterización del agua residual tratada serán los factores que indiquen si es adecuada el agua para su reciclamiento y hasta qué número de veces podrá serlo.

Para el tratamiento del agua residual en mayor cantidad se utilizará nuevamente el burbujeo con aire utilizando como difusor una tubería plástica en espiral de 1/8" con perforaciones a lo largo de toda ella. La presión es de 10 Psig. Para el caso del polímero, la presión debe ser muy pequeña para evitar que la agitación brusca rompa los agregados formados.

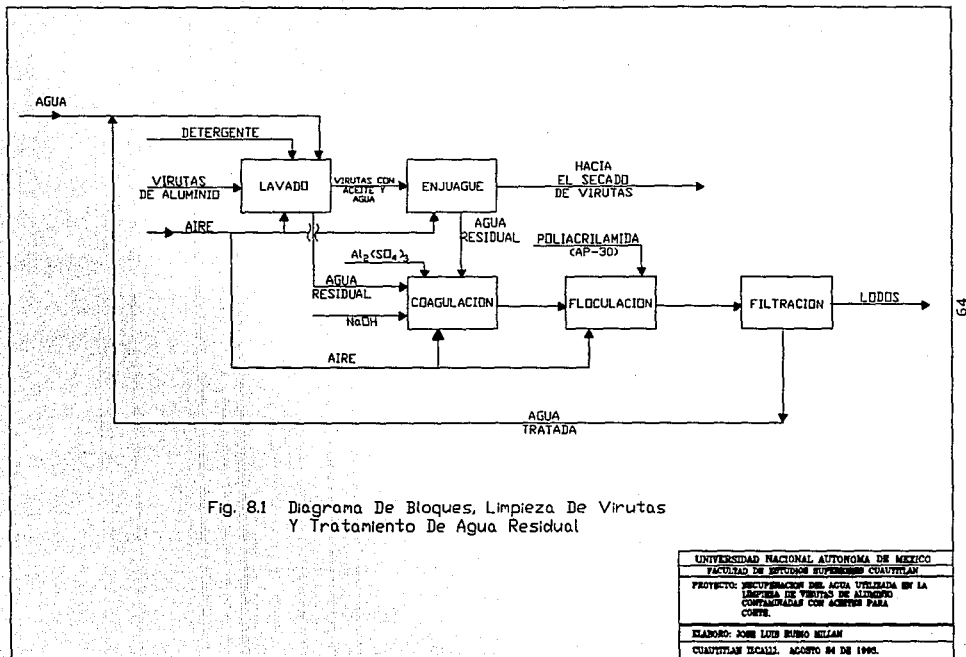


Fig. 8.1 Diagrama De Bloques, Limpieza De Virutas Y Tratamiento De Agua Residual

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA SUPERIOR CUATITLÁN
PROYECTO: RECUPERACIÓN DEL AGUA UTILIZADA EN LA LIMPIEZA DE VIRUTAS DE ALUMINIO CONTAMINADAS CON ACEITES PARA COFRE.
ELABORÓ: JOSE LUIS BARRIO MILLAN
CUATITLÁN ESCALI. AGOSTO 84 DE 1985.

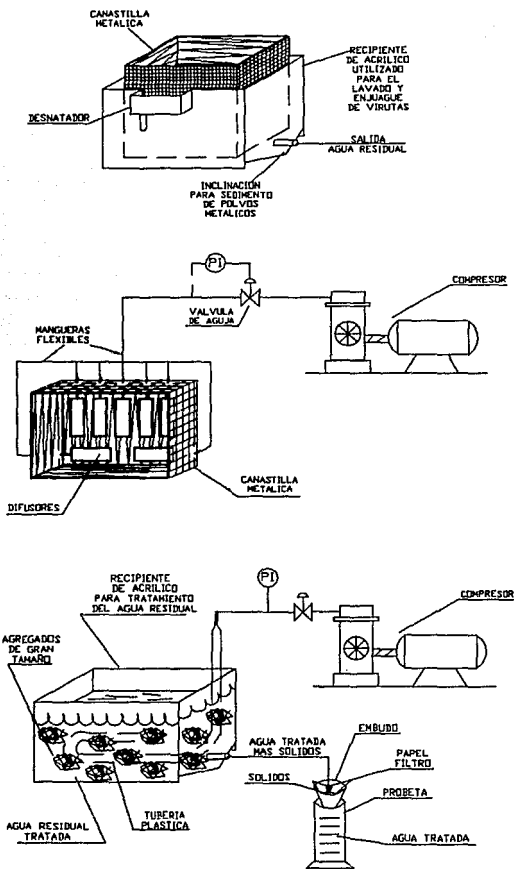


Fig. 8.2 Esquemas Del Equipo Utilizado

# 9 RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

## 9. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

### 9.1 Limpieza De Virutas

El detergente más apropiado para nuestro propósito es el detergente ALITEX en polvo, por las siguientes razones técnicas: Berilio 700 (detergente líquido biodegradable), desengrasante líquido RX y detergente casero, producen demasiada espuma y al utilizarlos en la técnica de burbujeo con aire, ésta se produce inmediatamente desbordándose del recipiente y en gran cantidad, aunque ésta no es la razón principal, además no favorecen la emulsión aceite-agua tanto como uno desea y sobre todo, desaparece su poder activo por la presencia del aceite no emulsionado que se encuentra en demacia. Esto último causó que la cantidad de viruta tratada sea menor.

El detergente ALITEX produce poca espuma, favorece la emulsión aceite-agua y no pierde su poder activo fácilmente, esto por supuesto favorece para poder seguir utilizándolo en los lavados. El exceso de aceite no emulsionado puede causar problemas en este aspecto, pero como gran parte de él se emulsiona, entonces, éste problema se reduce.

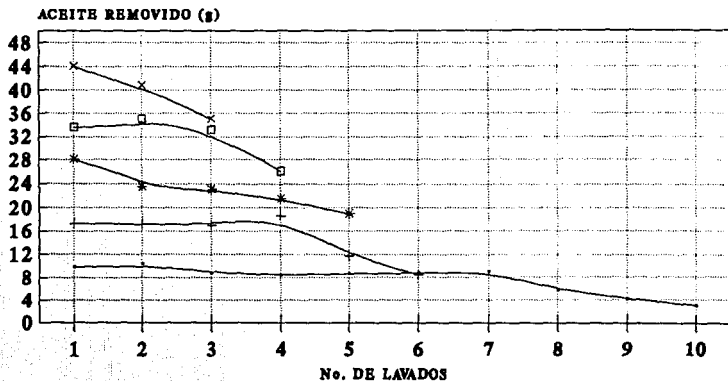
Las razones anteriores aminoran el aspecto económico, debido a que el precio del detergente ALITEX es 1.8 veces en promedio mayor a los otros detergentes. Pero aunque son más baratos, hay que utilizar mayor cantidad de ellos, provocando una inversión mayor.

El detergente ALITEX es un limpiador alcalino con alta detergencia altamente inhibido. Contiene detergentes sintéticos, no se forman jabones duros al emplearse con aguas duras. No ataca al aluminio, llena las especificaciones estrictas para la corrosión de aluminio de la especificación militar MIL-C00543A, enjuaga libremente, no pierde fácilmente su poder activo, excepcional detergencia, habilidad de suspensión para suciedad y es 100 % soluble.

[23]

Los valores obtenidos de % de remoción de aceite, gramos removidos de aceite y concentración residual de ALITEX después de cada lavado, están representados en las figuras 9.1 a 9.6. Estos resultados provienen de la parte experimental realizada para obtener las dosificaciones óptimas. Estos mismos resultados se presentan en las tablas 9.1 y 9.2.

# LAVADO DE VIRUTA CON ACEITE DE CORTE DIRECTO

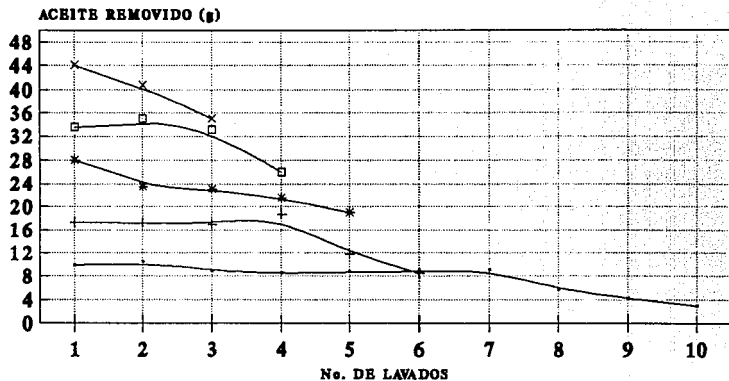


CARGAS (g)

— 50 —+ 100 —\* 150 —□ 200 —× 250



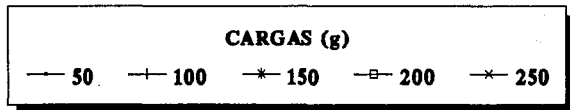
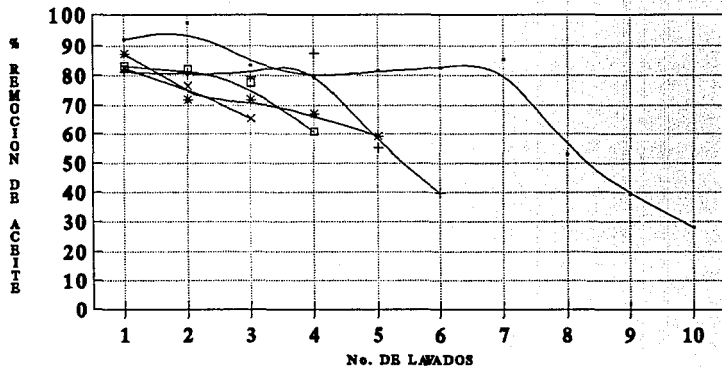
# LAVADO DE VIRUTA CON ACEITE DE CORTE DIRECTO



FBS-C

FIG. 9.1

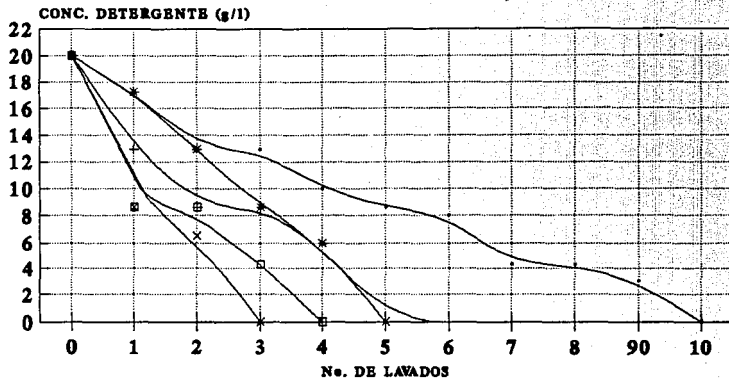
# LAVADO DE VIRUTA CON ACEITE DE CORTE DIRECTO



FES-C

FIG. 9.2

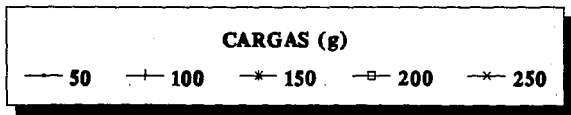
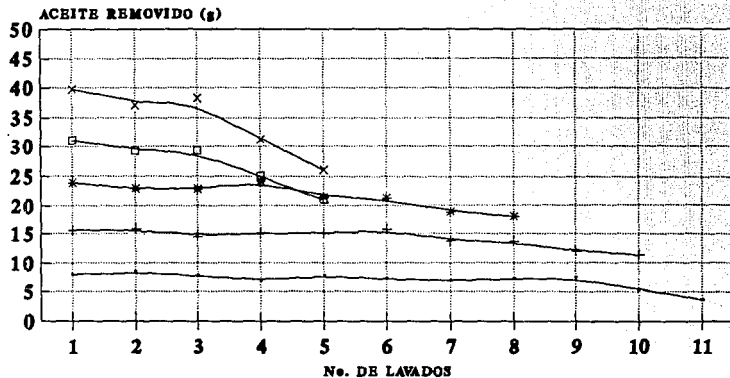
# LAVADO DE VIRUTA CON ACEITE DE CORTE DIRECTO



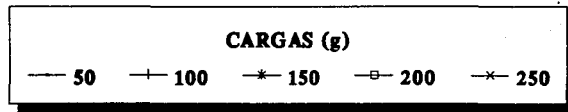
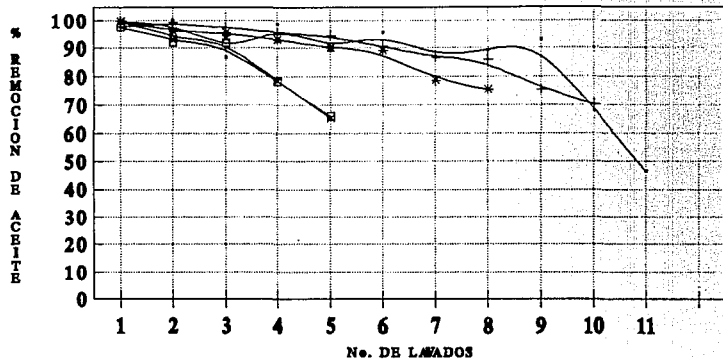
## CARGAS

—●— 50 g    —+— 100 g    —\*— 150 g    —□— 200 g    —x— 250 g

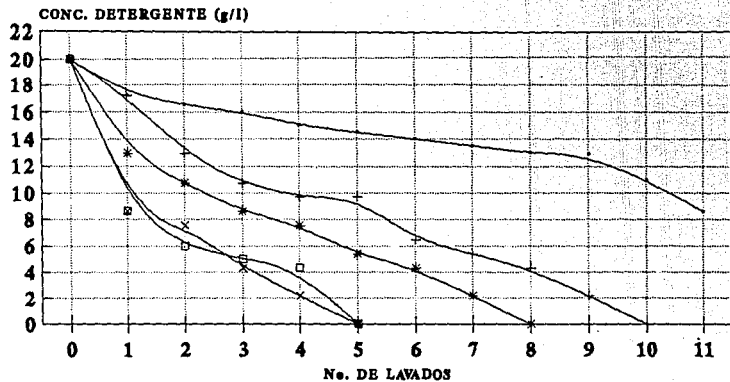
# LAVADO DE VIRUTA CON ACEITE SOLUBLE



# LAVADO DE VIRUTA CON ACEITE SOLUBLE



## LAVADO DE VIRUTA CON ACEITE SOLUBLE



CARGAS (g)

— 50    + 100    \* 150    □ 200    × 250

VIRUTAS CON ACEITE DE CORTE DIRECTO						
Cargas de virutas en gramos	50	100	150	200	250	PROMEDIO
* % Remoción promedio de aceite	85.9	82.2	77	80.8	79.4	81.1
* Gramos de aceite removido	64.3	70.2	74.5	103.6	84.4	79.4
* Gramos totales de viruta tratada	350	400	450	600	500	460

\* El % de remoción de aceite siempre es mayor a 75%. Los resultados obtenidos cuando el % es menor a 75 no se tomaron en cuenta.

TABLA 9.1

Esta tabla nos indica que con cargas de 50 g se realizan 7 lavados para tratar un total de 350 g de virutas, obteniéndose un % de remoción siempre mayor a 75%. El % promedio de remoción de aceite de los 7 lavados es del 85.9 % y los gramos totales de aceite removidos de 350 g de virutas son 64.3 g.

Los valores promedio indicados en la tabla, representan cantidades más reales de lo que sucede con la limpieza de virutas contaminadas con aceite de corte directo, cuando se modificada la carga de éstas. Ellos nos indican, que si se tratan 460 g de virutas utilizando 2 litros de agua (lavado + enjuague) y 20 g de detergente, se remueven 79.4 g de aceite, lo cual nos lleva a un % de remoción de aceite del 81.1%.

VIRUTAS CON ACEITE SOLUBLE						
Cargas de virutas en gramos	50	100	150	200	250	PROMEDIO
** % Remoción promedio de aceite	94.8 ***	93.5	93.9	89.8	91.1	92.6
** Gramos de aceite removido	67.95 ***	119	135.2	114.5	145	130
** Gramos totales de viruta tratada	450 ***	800	900	800	1000	880

\*\* El % de remoción de aceite siempre es mayor a 85%. Los resultados obtenidos cuando el % es menor a 85, no se tomaron en cuenta.

\*\*\* La concentración del detergente después del décimo lavado fué de 9 g/l aproximadamente; lo cual indica que todavía la solución es capaz de limpiar más cargas de 50 g.

TABLA 9.2

Esta tabla nos indica que con cargas de 100 g por ej., se realizaron 8 lavados para tratar un total de 800g de virutas con aceite soluble, obteniéndose un % de remoción siempre mayor a 85%. El % promedio de remoción de aceite a los 8 lavados es de 93.51%, y los gramos totales de aceite removidos de 800 g de virutas son 119g.

Al igual que en el caso anterior, los valores promedio indicados en la tabla nos indican que si se tratan 880 g de virutas utilizando 2 litros de agua y 20 g de detergente, se remueven 130 g de aceite soluble que nos conduce a un % de remoción de aceite de 92.6%. Siguiendo la proporcionalidad, se espera que con 10 litros de agua y 100 g de detergente se puedan tratar aproximadamente 4.5 kg de virutas. En la técnica con burbujeo, se utilizan 10 L de agua y 45 g de ALTREX para tratar 2.5 kg. Sería razonable aumentar la cantidad de ALTREX y tratar más virutas con la misma cantidad de agua, pero la negativa a esto, fue la dificultad para tratar el agua residual que contenía más aceite soluble.

**Para la viruta con aceite de corte directo se tiene lo siguiente:**

- Aproximadamente el agua total de reposición es del 3% para cuando se utilizaron 2 litros de agua (lavado + enjuague).
- Un estimado promedio nos indica que del aceite removido, aproximadamente el 60% se emulsiona y el 40% queda libre en forma dispersa, el cual después de 30 minutos hace nata. Este último se separa por decantación para su medición.
- El porciento en peso promedio de aceite en la viruta es: 21.4 %.
- Tiempos de agitación: 2 minutos para enjuague y 2 minutos para lavado.
- Kg de aceite / kg de viruta limpia = 0.27.
- Un litro de agua es suficiente para cubrir en su totalidad hasta 150 gramos de viruta sucia.
- Es preciso eliminar después de cada lavado la mayor cantidad posible de aceite no emulsionado para evitar ensuciar las otras cargas de desperdicio, así como también evitar la disminución de actividad del detergente.

**Con la viruta contaminada con aceite soluble se llegó a lo siguiente:**

- Aproximadamente el agua total de reposición es del 3% cuando se utilizaron 2 litros de agua (lavado + enjuague).
- Un estimado promedio, nos indica que del aceite removido, aproximadamente el 95% se emulsiona y 5% queda libre en forma dispersa, éste último después de 30 minutos hace nata y por decantación se separa para su medición. El aceite libre proviene tal vez del rompimiento de la emulsión, o la viruta misma que contiene aceite no emulsionado. (En la determinación del % en peso de aceite en las virutas se consideró que ésta última está contaminada únicamente con aceite soluble y no con aceite no emulsionado).



- El porciento en peso promedio de aceite en la viruta es: 15.9 %.
- Tiempos de agitación: 2 minutos para lavado y 2 minutos para enjuague.
- Kg de aceite soluble / kg de viruta limpia = 0.189
- Un litro de agua es suficiente para cubrir en su totalidad 300 g de virutas.

**Resultados obtenidos utilizando el sistema de burbujeo con aire.**

- De 10 litros totales de agua utilizados para la limpieza de virutas, se obtuvieron en promedio 9.3 litros de agua residual. Esto nos conduce a una pérdida de agua del 7%. Las pérdidas se deben a que el agua y agua residual se queda adherida a las virutas que posteriormente se secan. Aquí no se llevó a la práctica, pero se pueden secar en un secador rotatorio con aire caliente a contracorriente, donde se aprovecha en gran medida que el aluminio no absorbe agua.
- Un estimado promedio nos indica que aproximadamente el 60% de aceite de corte directo se emulsiona y el 40% queda libre; es decir, para un lote de 2250 g de virutas sucias, se obtienen aproximadamente 192 g de aceite no emulsionado. Producto de la limpieza a virutas con aceite soluble, se obtiene como máximo el 5% de aceite no emulsionado (este porcentaje depende de que tanto venga contaminada la viruta con aceite mineral no emulsionado; inclusive, puede presentarse la posibilidad que la viruta no contenga dicho aceite).
- Tiempos de burbujeo: 15 minutos para lavado y 10 minutos para enjuague.
- 10 litros de agua y 85 g de detergente ALTEX son suficientes para tratar 2250 g de virutas con aceite de corte directo. Esto es, en un recipiente se lavan 3 cargas de 750 c/u de virutas en 5 litros de agua y 85 g de detergente. Para el enjuague en otro recipiente se utilizan únicamente 5 litros de agua sin detergente.

- 10 litros de agua y 45 gramos de detergente ALTEX son suficientes para tratar 2500 g de viruta contaminada con aceite soluble. Esto es, en un recipiente se lavan 2 cargas de 1250 g c/u en 5 litros de agua y 45 gramos de detergente. Para el enjuague en otro recipiente se utilizan solo 5 litros de agua sin detergente.
- La presión utilizada para el burbujeo en el lavado y enjuague es de 10 psig.

## 9.2 Tratamiento Del Agua Residual

De los dos coagulantes, sulfato ferroso y sulfato de aluminio se seleccionó el segundo, debido a las siguientes razones:

Se requiere de un intervalo de dosificación óptimo para coagular toda la materia coloidal que incluye el aceite. Se requiere un intervalo, debido a que la cantidad de aceite emulsionado que proviene de la limpieza de las virutas no es constante y esto es porque la remoción durante la limpieza ó el aceite contaminando las virutas tampoco lo es. Esto trae por consiguiente problemas de oxidación al agregar en un pequeño exceso el sulfato ferroso, aunque éste esté en el intervalo óptimo. Estos problemas de oxidación se observan claramente, porque el agua tratada resulta de color naranja y además turbia.

Otro motivo por el cual no se seleccionó, es porque el agua tratada se reutiliza para la limpieza de las virutas de aluminio que se contaminarían con los óxidos formados.

Con el sulfato de aluminio no se presentan dificultades de éste tipo, además el agua tratada resultante es de mayor calidad; es decir, la turbidez disminuye considerablemente.

Es necesario reconocer que la coagulación con sulfato ferroso es mas rápida, se forman grumos más grandes y es mas barato. La efectividad del sulfato de aluminio aminora en gran medida los aspectos anteriores.

0.12 ml de hidróxido de sodio de concentración 6 M, fueron suficientes para controlar el pH a 20 ml agua residual.

Aunque se utilizó la misma cantidad de sosa para el agua proveniente de la limpieza de virutas con ambos tipos de aceite, ésta condujo a pH's poco diferentes. Los pH's no son iguales, debido a que se utilizó más detergente con la viruta sucia con aceite de corte directo y por lo tanto el agua resultante de la limpieza obtuvo un pH mayor al que obtuvo el agua resultante de la limpieza de virutas con aceite soluble.

En las tablas 9.3 y 9.4 se muestran las dosificaciones de sosa y sulfato de aluminio utilizadas. Las cantidades de sosa son las mismas y el intervalo de dosificación de coagulante es casi el mismo, aunque el contenido de aceite soluble en el agua residual es aparentemente mayor; es decir, el aceite soluble está compuesto de aceite mineral, agua y emulsivos, pero la mayor parte es agua. Tal vez, el consumo de sulfato de aluminio es semejante, porque se tiene

que vencer la actividad emulsificante de los emulsivos que hacen soluble al aceite en agua. Una vez rota la emulsión, el exceso de coagulante queda presente en el agua como un hidróxido metálico precipitado. La dosificación óptima de coagulante fué semejante para los dos tipos de agua resultante del lavado, enjuague y mezcla de ambas.

Aunque la coagulación sea efectiva, los coagulos formados son demasiados y además pequeños, sobre todo en el agua producto del lavado y mezcla.

En el agua producto de los enjuagues no hubo dificultad alguna, después de tres minutos se observó sedimento de sólidos.

Para poder llevar a cabo la formación de agregados grandes a partir de pequeños, se utilizó un polímero que funciona como cuerpo al cual se adsorben coagulos pequeños y creando agregados de gran tamaño, los cuales flotan o sedimentan rápidamente, observandose una separación totalmente visible de esos sólidos del agua que favorecen la filtración en gran medida.

Se ensayaron 2 polímeros, AP-30 y complex-200, siendo el primero más apropiado para las condiciones dadas.

El AP-30 es de mayor resolución que el complex-200 aunque ambos sean poliacrilamidas no-iónicas (información proporcionada por el fabricante). La preparación de la solución del AP-30 en polvo es mas tardada que la del complex-200 que está en suspensión.

Si se utiliza el complex-200, entonces la agitación debe ser muy ligera y lenta por la inestabilidad de los agregados formados; es decir, la agitación vigorosa o prolongada destruye los agregados haciendolos más pequeños o inclusive los reduce a su tamaño original.

Si se utiliza el AP-30, la agitación puede ser entonces un poco vigorosa, debido a que la estabilidad del agregado es muchas veces más grande. Una vez formado el agregado, es difícil romperlo aún agitando prolongadamente, aunque sí llega a suceder si la agitación es demasiado vigorosa.

Las dosificaciones del polímero AP-30 se muestran también en las tablas 9.3 y 9.4. En éstas tablas se da un panorama respecto al estado del agua tratada y lodos obtenidos, así como el pH final después de un tratamiento efectivo.

La filtración de los lodos para cuando se utilizaron muestras de 20 ml de agua residual se llevó a cabo con vacío para acelerar la operación. Esto no se realizó con cantidades mayores donde la producción de lodos fué grande por la falta de equipo con suficiente potencia de succión.

En las tablas 9.5 y 9.6 se muestran las dosificaciones de sosa, sulfato de aluminio y AP-30 para muestras de 100, 500 y 1000 ml de agua residual emulsionadas con ambos tipos de aceite, donde se fueron haciendo ajustes, sobre todo con el polímero que fué dosificado en menor cantidad conforme aumentaban los ml de agua residual. Esto es más notorio al tratar aproximadamente los 9.3 litros de agua residual.

En éstas tablas se menciona el aspecto del agua tratada y filtrada y sólidos secos y húmedos. De éstos últimos se muestra la cantidad en gramos que se obtienen de ellos en forma húmeda y seca. Esto es un punto muy importante, debido a la escasa utilidad de éstos, los cuales de acuerdo a los resultados se obtienen en gran cantidad. Durante el proceso en gran volumen y secos poco volumen pero muchos gramos.

También se muestran los %'s de recuperación de agua. El agua recuperada incluye la utilizada en los reactivos y en el caso del agua residual con aceite soluble, la que contiene éste último.

Se muestra que el pH final está muy cercano a la neutralidad, lo cual favorece evitando la neutralización con sosa o ácido.

Con los resultados mostrados en éstas tablas (9.5 y 9.6) se ópta por el tratamiento del agua de mezcla, evitando así 2 tratamientos que son más difíciles de controlar que uno solo.

No por ser un solo tratamiento se eligió ésta ruta, sino también porque las dosificaciones son equivalentes, es semejante la cantidad de lodos obtenidos al igual que el % de recuperación de agua y pH's. Inclusive, el aspecto del agua de lavado con aceite de corte directo no es aceptable, queda con mucho color y mucho olor a aceite. La mezcla disminuye éste efecto, aunque es lógico que después del tratamiento individual el agua tratada se puede mezclar dando un mismo resultado. Respecto al equipo, se requieren 2 recipientes para tratar por separado a cada agua residual. Se puede hacer el tratamiento en los recipientes para lavado y enjuague, pero la dificultad que se presenta son los polvos metálicos que provienen de las virutas, y aunque se tiene la canastilla éstos alcanzan a pasar. Si el # de malla se reduce, el aceite no emulsionado quedaría en la canastilla ensuciando las virutas. El polvo metálico puede causar problemas en la filtración. En cambio si se hace un solo tratamiento, el agua residual total se drena hacia otro recipiente de capacidad suficiente para el tratamiento; no hay problemas de polvos metálicos y a la vez se separa el aceite no emulsionado al drenar el agua residual.

**TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL PRODUCTO DE LA LIMPIEZA  
A VIRUTAS CON ACEITE DE CORTE DIRECTO**

PRODUCTO DEL LAVADO										
No.	ml de muestra	gramos de Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	NaOH C = 6N	Coagulación	AP-30 C=1g/l	Floculación	Agua filtrada	Sólidos filtrados	pH's	
1		0.3		no aceptable		no aceptable	no aceptable		El pH inicial de todas las muestras fue de - aprox. 11.5 unidades. Con la sosa el pH llegó a 14 unidades aprox. El pH final fue de 7 unidades aprox. cuando la coagulación fue efectiva.	
2	20 ml	0.31	0.12	+/- aceptable	Agregar de 1 a 1.3 ml	Muy aceptable	no aceptable	Húmedos: aspecto grasoso, mucho olor a aceite, gran volumen y color café tenue (beige). Secos: grasos al tacto, poco volumen, olor a aceite y color café oscuro.		
3	c/u	0.32	ml	aceptable			no aceptable			
4		0.33	a c/u				aceptable			
5		0.34	ml				aceptable			
6	20 ml	0.35	0.12				aceptable			no aceptable
7	c/u	0.36	ml				+/- aceptable			no aceptable
8		0.37	a c/u				+/- aceptable			no aceptable
9		0.38					no aceptable			no aceptable
PRODUCTO DEL ENJUAGUE										
1		0.09		+/- aceptable	Agregar de 1 a 1.3 ml	Muy aceptable	no aceptable	IDEM agua de lavado, excepto que se obtiene una menor cantidad de ellos con poco olor a aceite.	El pH inicial de todas las muestras fue de - aprox. 9 unidades. La adición de sosa modificó el pH a 13 u. El pH final fue de 7 unidades aprox. cuando la coagulación fue efectiva.	
2	20 ml	0.1	0.12	aceptable			no aceptable			
3	c/u	0.11	ml				aceptable			
4		0.12	a c/u				aceptable			
5		0.13	ml				+/- aceptable			no aceptable
6	20 ml	0.14	0.12				+/- aceptable			no aceptable
7	c/u	0.15	ml				no aceptable			no aceptable
8		0.16	a c/u				aceptable			no aceptable
9		0.17		aceptable			no aceptable			no aceptable
PRODUCTO DE LA MEZCLA (50% LAVADO + 50% ENJUAGUE)										
1		0.2		no aceptable	Agregar de 1 a 1.3 ml	Muy aceptable	no aceptable	IDEM a los dos casos anteriores. La diferencia es el volumen de sólidos húmedos y secos que se encuentra entre los dos anteriores.	El pH inicial de todas las muestras fue de - aprox. 10 unidades. La adición de sosa modificó el pH a 13 u. El pH final fue de 7 unidades aprox. cuando la coagulación fue efectiva.	
2	20 ml	0.21	0.12	aceptable			no aceptable			
3	c/u	0.22	ml				aceptable			
4		0.23	a c/u				aceptable			
5		0.24	ml				+/- aceptable			no aceptable
6	20 ml	0.25	0.12				+/- aceptable			no aceptable
7	c/u	0.26	ml				no aceptable			no aceptable
8		0.27	a c/u				aceptable			no aceptable
9		0.28		aceptable			no aceptable			no aceptable

TABLA 9.3

**TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL PRODUCTO DE LA LIMPIEZA  
A VIRUFAS CON ACEITE SOLUBLE**

PRODUCTO DEL LAVADO									
No.	ml de muestra	gramos de Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	NaOH C = 6N	Coagulación	AP-30 C=1g/l	Floculación	Agua filtrada	Sólidos filtrados	pH's
1		0.3		no aceptable			no aceptable		El pH inicial de todas las muestras fue de - aprox. 10.5 unidades. Con la sosa el pH ascendió a 14 unidades aprox. El pH final fue de 6.5 unidades aprox. cuando la coagulación fué efectiva.
2	20 ml	0.31	0.12	*/- aceptable			no aceptable		
3	c/u	0.32	ml	aceptable	Agregar de 0.7 a 1.3 ml	Muy aceptable	Turbidez visualmente baja. Ligero olor a aceite. Color amarillo muy tenue. En general, aspecto aceptable.	Húmedos: olor a aceite, aspecto graso, gran volumen y color gris claro. Secos: poco volumen, grasos al tacto, poco olor a aceite y de color gris oscuro.	
4		0.33	a c/u						
5		0.34							
6	20 ml	0.35	0.12				no aceptable		
7	c/u	0.36	ml	*/- aceptable			no aceptable		
8		0.37	a c/u	no aceptable			no aceptable		
9		0.38		aceptable			no aceptable		
PRODUCTO DEL ENJUAGUE									
1		0.08		no aceptable			no aceptable		El pH inicial de todas las muestras fue de - aprox. 8 unidades. La adición de sosa modificó el pH a 12.5 u. aprox. El pH final fue de 6.5 unidades aprox. cuando la coagulación fué efectiva.
2	20 ml	0.09	0.12	aceptable			no aceptable		
3	c/u	0.1	ml	aceptable	Agregar de 0.8 a 1.2 ml	Muy aceptable	Turbidez visualmente baja. Sin color. Ligero olor a aceite. En general, aspecto muy aceptable.	IDEM agua de lavado, excepto que se obtiene una menor cantidad de ellos con poco olor a aceite.	
4		0.11	a c/u						
5		0.12							
6	20 ml	0.13	0.12				no aceptable		
7	c/u	0.14	ml	*/- aceptable			no aceptable		
8		0.15	a c/u	no aceptable			no aceptable		
9		0.16		aceptable			no aceptable		
PRODUCTO DE LA MEZCLA (50% LAVADO + 50% ENJUAGUE)									
1		0.2		no aceptable			no aceptable		El pH inicial de todas las muestras fue de - aprox. 9 unidades. La adición de sosa modificó el pH a 13 u. El pH final fue de 6.5 unidades aprox. cuando la coagulación fué efectiva.
2	20 ml	0.21	0.12	*/- aceptable			aceptable		
3	c/u	0.22	ml	aceptable	Agregar de 0.8 a 1.2 ml	Muy aceptable	Turbidez visualmente baja y ligeramente menor a la observada con el agua de lavado. Ligero olor a aceite, sin color. En general aspecto aceptable	IDEM agua de lavado y enjuague. La única variante es el volumen de sólidos húmedos y secos.	
4		0.23	a c/u						
5		0.24							
6	20 ml	0.25	0.12				no aceptable		
7	c/u	0.26	ml	*/- aceptable			no aceptable		
8		0.27	a c/u	no aceptable			no aceptable		
9		0.28		aceptable			no aceptable		

TABLA 9.4

**TREATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL PRODUCTO DE LA LIMPIEZA  
A VIRUTAS CON ACEITE DE CORTE DIRECTO**

PRODUCTO DEL LAVADO											
No.	ml de muestra	gramos de Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	NaOH C = 6M	ml de AP-30 C = 1g/l	Agua filtrada	Sólidos filtrados	(g) de sólidos secos	(g) de sólidos húmedos	ml de agua filtrada	% recuperación total	pH final aprox.
1	100	1.65	0.6	6	Color amarillo intenso. Olor a aceite. Turbidez visualmente baja. Aspecto no aceptable	Húmedos: Aspecto graso, color café tenue (beige). Mucho olor a aceite gran volumen. Secos: grasos al tacto, mucho olor a aceite y poco volumen en comparación a los húmedos. Son de color café oscuro.	5.8	25.8	80	80	7
2	500	8.5	3	25			23.4	128.4	395	79	7
3	1000	17	6	40			52	262	790	79	7
PRODUCTO DEL ENJUAGUE											
1	100	0.6	0.6	5	Color amarillo tenue. Ligero olor a aceite. Visualmente se presenta turbidez nula Aspecto aceptable	IDEN al agua de lavado. Excepto que en ésta ocasión el volumen de sólidos húmedos y secos se obtienen en menor cantidad y por lo tanto un menor volumen.	1.4	17.4	84	84	6.5
2	500	3.1	3	20			9.3	89.3	420	84	7
3	1000	6	6	40			18	188	830	83	6.5
PRODUCTO DE LA MEZCLA (50% LAVADO + 50% ENJUAGUE)											
1	100	1.2	0.6	5	Color amarillo tenue. Turbidez visualmente nula. Ligero olor a aceite. Aspecto aceptable	IDEN casos anteriores, excepto por el volumen de sólidos que se encuentra entre los obtenidos del lavado y enjuague.	3.5	24.5	79	78	7
2	500	6	3	20			19.6	114.6	405	81	6.5
3	1000	12	6	40			38	233	805	80.5	6.5

TABLA 9.5



**TRATAMIENTO DEL AGUA RESIDUAL PRODUCTO DE LA LIMPIEZA  
A VIRUTAS CON ACEITE SOLUBLE**

PRODUCTO DEL LAVADO												
No.	ml de muestra	gramos de Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	NaOH C = 6N	ml de AP 30 C = 1g/l	Agua filtrada	Sólidos filtrados	(g) de sólidos secos	(g) de sólidos húmedos	ml de agua filtrada	% recuperación total	pH final aprox.	
1	100	1.65	0.6	5	Color amarillo tenue. Ligero olor a aceite. Turbidez visualmente baja. Aspecto aceptable	Húmedos: Aspecto graso, color gris claro, mucho olor a aceite y gran volumen. Secos: grasos al tacto mucho olor a aceite, poco volumen en comparación a los húmedos y son de color gris oscuro.	3.45	21.45	82	82	6.5	
2	500	8.3	2	20			12	92	420	84	7	
3	1000	16	6	40			25.2	165.2	810	81	6.5	
PRODUCTO DEL ENJUAGUE												
1	100	0.65	0.6	5	Visualmente presenta turbidez nula y sin color. Ligero olor a aceite Aspecto muy aceptable	IDEN al agua de lavado. Excepto que en ésta ocasión el volumen de sólidos húmedos y secos se obtienen en menor cantidad y por lo tanto con menos volumen.	0.77	11.77	89	89	6.5	
2	500	3.25	3	20			3.17	37.17	470	94	6.5	
3	1000	6.5	6	35			6.1	66.1	940	94	6.5	
PRODUCTO DE LA MEZCLA (50% LAVADO + 50% ENJUAGUE)												
1	100	1.2	0.6	5	Color amarillo tenue. Turbidez visualmente nula. Ligero olor a aceite. Aspecto aceptable	IDEN casos anteriores, excepto por el volumen de sólidos que se encuentra entre los obtenidos del lavado y enjuague.	1.5	18.5	83	83	7	
2	500	6	3	20			6.45	91.45	415	83	6.5	
3	1000	12	6	35			14.85	179.85	835	83.5	7	

TABLA 9.6

Una vez elegido el tratamiento a la mezcla, se continuó el tratamiento a 9.3 litros aproximadamente de agua residual producto de la mezcla en otro recipiente. Se agregó el sulfato de aluminio y sosa, seguidos de la agitación con burbujas que salen de una tubería plástica en espiral y con perforaciones. El tiempo de burbujeo es de aproximadamente 10 minutos. Inmediatamente se agregó el AP-30 y se inyectó aire a una presión que no alcanzó a registrar el manómetro, pero fue suficiente para que el AP-30 trabajara efectivamente. El burbujeo es de aproximadamente 15 segundos.

El agua residual que proviene del enjuague es mayor al del lavado. Esto es porque el agua residual producto del lavado se adhiere a las virutas, éstas se trasladan al otro recipiente para el enjuague y al sacarlas y dejarlas escurrir una cantidad de agua mayor a la que traían no puede adherirse.

Los resultados se muestran a continuación. Las dosificaciones se ajustaron debido a que la mezcla no es proporcional. Los valores son promedios de varios ensayos.

**(a) Agua residual con aceite de corte directo**

- Agua de lavado= 4900 ml
- Agua de enjuague= 4300 ml
- Sulfato de aluminio= 110 g
- Hidróxido de sodio= 54 ml, C= 6M
- Polímero AP-30= 300 ml, C= 1 g/l
- Agua tratada (filtrada)= 8300 ml
- % Recuperación de agua= 80.1%
- Sólidos libres de agua= 380 g
- pH Agua residual tratada= (6.5-7) unidades
- Los sólidos libres de agua están compuestos aproximadamente de 76% de materia orgánica y 24% de materia inorgánica.

**(b) Agua residual con aceite soluble**

- Agua de lavado= 4900 ml
- Agua de enjuague= 4500 ml
- Sulfato de aluminio= 110 g
- Hidróxido de sodio= 54 ml, C= 6M
- Polímero AP-30= 300 ml, C= 1 g/l
- Agua tratada (filtrada)= 8400 ml
- % Recuperación de agua= 81.1%
- Sólidos libres de agua= 140 g
- pH Agua residual tratada= (6.5-7) unidades
- Los sólidos libres de agua están compuestos aproximadamente de 15% de materia orgánica y 85% de materia inorgánica.

Es importante mencionar que el detergente utilizado es el necesario para tratar la cantidad dada de metal mencionada antes. Se procuró que ésto resultara así para no tener acumulación de detergente en el agua tratada.

El agua residual tratada (aproximadamente 8.1 litros) se reutilizó para el proceso de limpieza de virutas. La remoción de aceite fué en promedio del 80% para las virutas con aceite de corte directo y del 90% para las virutas con aceite soluble.

Después de recuperar el agua reutilizada, se determinaron los parámetros indicados en la tabla 9.7. Esta caracterización nos sirve al igual que los % de remoción de aceite, como base para decidir sobre el posible y número de reciclamientos del agua residual tratada.

Los % de remoción de aceite nos indican que es posible la reutilización y están apoyados en los resultados de la caracterización donde los valores de los parámetros no son muy diferentes. Esto nos lleva a suponer que el agua residual tratada puede seguir utilizándose por lo menos el doble de las veces reutilizada en el laboratorio, las cuales fueron 3. Podríamos atrevernos a suponer una reutilización del agua de 10 veces.

El agua de reposición (19% aproximadamente) favorece la la calidad del agua. Aunque es conveniente seguir reutilizando el agua, caracterizandola y obteniendo el % de remoción de aceite para establecer mas correctamente el número de reciclamientos.

La filtración de los sólidos para los 9.3 litros de agua residual se llevó a cabo por gravedad; como ya se mencionó antes la falta de equipo a vacío retardó la filtración la cual se llevó a cabo en aproximadamente 1 hora. La filtración por gravedad es ineficiente, provocando que el agua quede absorbida en los sólidos. Un buen equipo de filtración a vacío nos conduciría a una recuperación mayor de agua y en menor tiempo.

<b>CARACTERIZACION DEL AGUA RESIDUAL TRATADA</b>						
<b>PROVENIENTE DE LA LIMPIEZA A VIRUTAS CON ACEITE DE CORTE DIRECTO</b>						
# de veces agua reciclada	DQO (ppm)	Dureza Total (pp)	Alcalinidad (ppm)		Sólidos Totales (ppm)	Aceites y Grasas (ppm)
			A la fenolftaleína	Al amaranjado de metilo		
0	579.8	208.8	negativa	281.25	916.3	262
1	593.5	250	IDEM	315	887.4	132
2	677.42	295.4	IDEM	346.5	890.4	236
3	713.15	285	IDEM	350.4	950.8	280
<b>PROVENIENTE DE LA LIMPIEZA A VIRUTAS CON ACEITE SOLUBLE</b>						
# de veces agua reciclada	DQO (ppm)	Dureza Total (pp)	Alcalinidad (ppm)		Sólidos Totales (ppm)	Aceites y Grasas (ppm)
			A la fenolftaleína	Al amaranjado de metilo		
0	331.56	220	negativa	278.8	635.3	145
1	295.3	217.5	IDEM	342.3	674.8	159
2	320	290	IDEM	393	657.1	111.8
3	377.3	278.15	IDEM	405	715.2	180

TABLA 9.7

### 9.3 Costos De Operación

Los costos de operación se obtienen en base a una tonelada de virutas de aluminio sucias, sometidas al proceso de limpieza.

Las cantidades requeridas de materias primas son:

#### \*\* Virutas con aceite de corte directo

	P.U. N\$/kg	N\$ total
- 37.5 kg de detergente ALTREX.....	8.0	.... 300.00
- 49.0 kg de Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ° industrial	1.4	.... 68.60
- 5.8 kg de NaOH ° industrial.....	0.5	.... 2.90
- 0.14 kg del polímero AP-30.....	27.0	.... 3.78
		-----
TOTAL		N\$= 375.28

#### \*\* Virutas con aceite soluble

	P.U. N\$/kg	N\$ total
- 18.0 kg de detergente ALTREX.....	8.0	.... 144.00
- 46.0 kg de Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> ° industrial	1.4	.... 64.40
- 5.4 kg de NaOH ° industrial.....	0.5	.... 2.70
- 0.125 kg del polímero AP-30.....	27.0	.... 3.37
		-----
TOTAL		N\$= 214.47

Si se tratan 2 lotes de virutas de 500 kg c/u, entonces son necesarios 50 minutos para inyectar el aire proveniente del compresor y así provocar agitación en el agua durante la limpieza de virutas con aceite de corte directo o con aceite soluble.

El tiempo que opera el compresor (50 minutos) es pequeño y por lo tanto los Kw-h utilizados por el motor que acciona el compresor son también pequeños. Considerando que un compresor de 2 CP es suficiente para suministrar el flujo de aire a la presión requerida (10 lb/pulg-2) a los 4.5 metros cúbicos de agua necesarios, entonces, esto nos conduce a un consumo de 1.25 Kw durante 50 minutos. Si el Kw tiene un valor de N\$ 0.26, entonces el consumo de energía eléctrica tendrá un valor de N\$ 0.325 por tonelada de virutas sometidas al proceso de limpieza. Esta cantidad no influye sensiblemente en el costo de operación.

El consumo de agua es también pequeño, debido a que es tratada y reutilizada. El agua de reposición (7% aproximadamente) no es considerada como consumo importante.

Por lo tanto, el costo de operación para tratar 1 tonelada de virutas con aceite de corte directo es de N\$ 380 y para tratar 1 tonelada de virutas con aceite soluble se requiere una inversión de N\$ 220. Las cantidades anteriores se indican así para incluir el costo de mano de obra y consumo de energía eléctrica y agua.

Con la limpieza de virutas de aluminio se pretende alcanzar un 90% de rendimiento en el proceso de fusión. Si se trata 1 tonelada de virutas sucias con aceite de corte directo, se obtienen aproximadamente 840 kg de virutas, las cuales todavía contienen aceite adherido a ellas. Estos 840 kg se funden, obteniéndose aproximadamente 750 kg de aluminio en lingote.

El costo de la viruta sucia es en promedio de N\$ 1.2 por kg (dependiendo de la cantidad de aceite y hierro que la ensucian), por lo tanto, el costo de 1 tonelada de virutas sucias es de N\$ 1200

El costo del aluminio en lingote es en promedio de N\$ 4.8 por kg (dependiendo de la calidad y composición de éste), por lo tanto, el costo de 750 kg de aluminio en lingote es de N\$ 3600. A ésta última cantidad se le resta el costo de la viruta sucia y el costo de operación para su tratamiento, resultando una ganancia parcial de N\$ 2020. No se tiene un valor aproximado del consumo de gas LP ni tampoco de reactivos químicos utilizados durante la fusión, para nuestro fin es suficiente indicar la ganancia parcial.

Sin el tratamiento de limpieza a las virutas, el rendimiento en la fusión es a título informativo de aproximadamente 71%. Esto nos lleva a obtener 710 kg de aluminio en lingote a partir de 1 ton de virutas sometidas a fusión, lo cual nos conduce a un valor de N\$ 3408 por concepto de aluminio en lingote. A ésta cantidad se le resta el costo de la viruta sucia, resultando una ganancia parcial de N\$ 2208.

Los valores de las ganancias parciales son semejantes, lo cual nos indica que el proceso de reciclamiento de virutas de aluminio sigue siendo factible económicamente, además se consigue disminuir la contaminación al medio ambiente.

# 10 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## 10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La investigación experimental demuestra que utilizando la técnica de burbujeo con aire se puede remover el 90% de aceite soluble de las virutas; en cambio, en el caso del aceite de corte directo la remoción de aceite es del 80%, que se considera aceptable considerando la gran cantidad de aceite mineral que contamina las virutas. La técnica es sencilla y el costo de operación es bajo. Aunque es conveniente ensayar con otro detergente y si es posible biodegradable y más barato que el detergente utilizado, ya que éste último es el de mayor costo que las otras materias primas. Claro está que el detergente buscado debe cumplir con las mismas características.

El tratamiento de agua residual que consiste básicamente de una etapa de coagulación (controlando el pH con NaOH 6M) y una floculación, es efectivo porque permite obtener un agua residual tratada con la calidad aceptable para reciclarla.

En conjunto, limpieza de virutas y tratamiento del agua residual consumen materias primas al mínimo, logrando un costo de operación bajo (N\$ 380 por tonelada de virutas con aceite de corte directo y N\$ 220 por tonelada de virutas con aceite soluble), que hacen aún todavía factible técnica y económicamente el proceso de reciclamiento de aluminio.

Los resultados obtenidos pueden ser utilizados para el escalamiento a un proceso industrial para el tratamiento del agua residual contaminada con aceite y limpieza de virutas contaminadas con aceites de corte, las cuales se producen en cantidades relativamente grandes y se utilizan como materia prima para obtener aluminio secundario de pureza aceptable.

La limpieza del metal conduce a una disminución de la contaminación del medio ambiente y reducción de flama intensa durante la fusión de las mismas; además, aumenta el rendimiento del proceso de fusión, debido a que el aluminio a fundir es más puro. Como lo demuestra el hecho de que en algunas fundidoras que reciclan desperdicio de aluminio, funden las virutas en su estado original procedente de los tornos y fresadoras.

Se considera que el agua puede llegar a ser reutilizada hasta 7 veces o más, de acuerdo al grado de remoción de aceite obtenido. Sin embargo, como cualquier otro proceso que haya cumplido su primera etapa, se recomienda realizar



mas pruebas para saber exactamente hasta que punto el agua puede ser reutilizada.

En el momento que el agua tratada ya no sea útil para el lavado de virutas, se dirigirá entonces, al alcantarillado. Aunque lo ideal es caracterizarla y si no cumple con las normas de la SEDESOL, entonces deberá ser sometida a tratamiento para su dirección al alcantarillado.

En el caso de la limpieza del metal se recomienda utilizar, previo a la técnica utilizada en éste estudio, una centrifuga, lo cual permitirá remover alrededor del 50% del aceite de corte; lo cual conduce a un consumo menor de materias primas (detergente, sosa, coagulante y polímero) para la limpieza de una cantidad establecida de virutas, en otras palabras, con el mismo consumo de materias primas se trata más cantidad de virutas.

Aunque el proceso de coagulación/floculación es efectivo, hay gran producción de lodos húmedos que puede dificultar el proceso de filtración a gran escala.

El secado de lodos húmedos conduce a una producción de sólidos libres de agua con un peso aproximado de 14 kg/m<sup>3</sup> de agua residual para sólidos con aceite mineral del aceite soluble y 38 kg/m<sup>3</sup> de agua residual para sólidos con aceite de corte directo.

En un proceso a gran escala, la producción de esos sólidos libres de agua es grande y sobre todo después de un largo periodo de operación.

El tratamiento de éstos sólidos se deja para un posterior estudio, por el momento se indica que de acuerdo con su contenido de materia orgánica, los sólidos con aceite de corte directo pudieran ser útiles como materia energética. Los que contienen aceite mineral del aceite soluble tendrían poca aplicación, debido a que en su mayoría contienen materia inorgánica.

Los párrafos anteriores nos dan a entender que al dar solución a un problema de contaminación producimos otro, pero hay que considerar que ese otro debe repercutir con menor intensidad.

Si se hace un uso eficiente del aceite en los procesos de torneado y fresado y/o se cambia el tipo de dicho lubricante, se podría entonces, minimizar los problemas de contaminación mencionados en los párrafos anteriores.

Desde hace mucho se ha pretendido disminuir el avance de la contaminación, pero ha sido imposible, ya que la velocidad con que avanza dicha contaminación es mayor a la que se impone para disminuirla.

# 11 REFERENCIA BIBLIOGRAFICA

## 11. REFERENCIA BIBLIOGRAFICA

[1] Dr. Guillermo J. Román Moguel; "Estrategias y Sistema de Recuperación de Chatarra de Aluminio"; Depto de Ingeniería Metalúrgica, ESIOIE-IPN; México 1992, Pags 1-13.

[2] Kirk-Othmer; "Enciclopedia de Tecnología Química"; Unión Tipográfica Editorial Hispano-Americana, 1ra Edición en Español, Tomo VI Pags 869-894, Tomo X Pags 228-259,

[3] Duncan J Shaw; "Introducción a la Química de Superficies y Coloides"; Ed. Alhambra; España 1977, Pags 240-246.

[4] Pierre Barrand, Robert Gadean; "Enciclopedia del Aluminio"; Ediciones Urmo; España 1978, Vol. 2, Pags 259-270

[5] Perry, R. H., Chilton, C.H., eds.; "Chemical Engineers' Handbook"; Mc Graw-Hill; 5th ed.; New York 1973.

[6] H.D. Parker and G.D. Pitt; "Pollution-Control Instrumentation For Oil Effluents"; ed. Graham Trotman; USA 1987; Pag. 175-192.

[7] Walter J. Weber, J.R.; "Control de la Calidad del Agua, Procesos Fisicoquímicos"; Ed. Reverte, S.A.; España 1979, Pags 64-105, 319-326.

[8] G.N. Mathavan and T. Miraraghavan; "Use of Peat in the Treatment of Oily Waters"; Water, Air and Soil Pollution; 1989, Vol. 45, Pags 17-26.

[9] Samuel S. Mills; "Oil Removal from Condensate"; Chemical Engineering; February 16, 1987, Pags 179-182.

[10] Bipin S. Parekh; "Get Your Process Water To Come Clean"; Chemical Engineering; January 1991, Pags 70-85.

[11] Bryant W. Bradley; "Flotation Offer Another Water/Oil Separation Alternative"; Oil and Gas Journal; December 9, 1985, Pags 42-45.

[12] Gordon M. Fair, John C. Geyar; "Purificación de Aguas y Tratamiento y Remoción de Aguas Residuales"; Ed. Limusa-Wiley, S.A.; México 1978, Pags 200-204.

[13] Aurelio Hernandez Muñoz; "Depuración de Aguas Residuales"; Servicio de Publicaciones de la Escuela de Ing. de Caminos, Canales y Puentes de Madrid, (U.P.M.); Colección Senior No. 9, Pags 369-387, 447-453.

[14] R.S. Ramalho; "Introduction to Wastewater Processes, Flotation"; Academic Press; USA 1977

[15] Ronald A. Simonet, Manuel Jimenez Perona; "La técnica de las Membranas en el Tratamiento de Residuos"; Ingeniería Química de Madrid; Junio 1986, Pags 31-37.

[16] Lynn E. Applegate; "Membrane Separation Processes"; Chemical Engineering; July 11, 1989, Pags 64-89.

[17] Markind, Mirand, Neri and Stana; "Use of Reverse Osmosis for Concentrating Waste Cutting Oils"; AIChE, Symposium Series, Water-Industrial Waste Treatment; Vol. 70, No. 144, Pags 157-162.

[18] Ramesh R. Bhawe and Hubert L Fleming; "Removal of Oily Contaminants in Wastewater with Microporous Alumina Membranes"; AIChE Symposium Series; Vol. 84, No. 261, Pags 19-27.

[19] Oblinger, Weintraub, Gealer, Blais; "In-Plant Operation of Electrolytic Cell for Oily Wastewater Treatment"; Environmental Progress; February, 1984, Vol. 3, No. 1, Pags 1-5.

[20] P.J. Bailes, S.K.L. Larkai; "Influence of Phase ratio on Electrostatic Coalescence of Water-in-Oil Dispersions"; Chem. Eng. Res. Des.; January 1984, Vol. 62, Pags 33-38.

[21] Yoshida, Yamaguchi, Katayama; "Continuous Demulsification of O/W Emulsion by Means of an Inclined Electrostatic Liquid-Liquid Contactor"; Journal of Chemical Engineering of Japan; 1988, Vol. 21, No. 4, Pags 428-430.

[22] APHA, AWWA, WPCF; "Standard Methods"; American Public Health Association.

[23] "Boletín Servicio Técnico"; Productos y Especialidades Químicas, S.A. de C.V.

[24] Chi-Fun Wang and Walter Hayduk; "Oil-Water Separation by Means of a Voertex Formed in a Stirred Draining Vessel. 2. Optimum Conditions for Oil Removal"; Ind. Eng. Chem. Res.; 1987, Vol. 26, No. 26, Pags 1066-1072.

[25] E.A. Kobylinski and G.L. Hunter; "Wastewater"; Chemical Engineering; June 1992, Pags 74-76.

[26] Isamu Kashiki and Akira Suzuki; "Associated Colloidal Flocculants Under Wide pH Variation"; Journal of Chemical Engineering of Japan; 1988, Vol. 21, No. 4, Pags 352-356.

[27] Mavrov, Dobrevski, Peneva, Rashkov and Stathopoulos; "Treatment of Wastewater Containing Oil"; Water Sci. Technol.; 1989, Vol. 21, No. 1, Pags 137-139.

[28] James K. Edzwald and Brian A. Dempsey; "Committee Report: Coagulation as an Integrated Water Treatment Process"; Research and Technology; October 1989, Pags 72-78.

[29] Anthony J. Tarkin, Diana Tsimis and Doug Rittman; "Water Plant Optimizes Coagulant Dosages"; Water/Engineering and Management; May 1989, Pags 43-47.

[30] H.W. Ballew and M.C. Porter; "Selection of Microporous Membranes for Optimum Separations"; Desalination; 1980, No.34, Pags 3-9.

[31] W. Schneider and O. Baver; "Laboratory Experiments with Hyperfiltration Membranes"; Desalination; 1980, No. 34, Pags 11-23.

[32] Y. Egozy, E. Korngold and N.C. Daltrophe; "Waste Water Recycling by Ion-Exchange: I. Complete Desalination"; Desalination; 1980, No. 33, Pags 123-137.

[33] S.B. Lee, Y. Aurelle and H. Roques; "Modelisation de l'ultrafiltration des émulsions d'huile de coupe dans une cellule non agitée en batch"; Entropie; 1985, No. 121, Pags 45-52.

[34] S.B. Lee, Y. Aurelle and H. Roques; " Etude de l'ultrafiltration d'une émulsion d'huile de coupe"; Entropie; 1985, No. 121, Pags 30-44.

[35] Iqbal K. Banzal; "Ultrafiltration of Oily Waste from Process Industries"; AIChE Symposium Series; Vol. 71, No. 151; Pags 93-99.

[36] Mark J. Hammer; "Waste and Wastewater Technology"; SI Version; Second Edition, USA 1986.

[37] Gopalratman, Bennett, Peters; "The Simultaneous Removal of Oil and Heavy Metals from Industrial Wastewater by Joint Precipitation and Air Flotation"; Environmental Progress; Mayo 1988, Vol. 7, No. 2, Pags 84-92.

[38] S. Dakovic, J Turkulov, Z. Bulajic, V. Oljarevic and C. Tomasevic; "Waste Water Treatment in the Oil Industry"; Fette Seifen Anstrichmittel; Vol. 87, No. 1, Pags 11-15.

[39] Andrzej M. Dziubek and Apolinary L. Kowal; "Modelling of the Coagulation-Adsorption Process in Treatment Systems"; Water Sci. Tech.; 1984, Vol. 17, Pag 1113-1120.

[40] Russell R. Renk; "Electrocoagulation of Tar Sand and Oil Shale Wastewaters"; Energy Progress; December 1988, Vol. 8, No. 4, Pags 205-208.

[41] K. Watanabe, H Yamanouchi, Y. Ueta and O. Nagata; "Present Situation and Problems Related to Marine Oily Water Separations Techniques"; Water Sci. Technol.; 1991, Vol. 93, No. (1-3), Pags 319-328.