

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA GEOLOGICA MINERA Y METALURGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALURGICA



**EL EFECTO DE LAS PROPIEDADES FISICAS EN EL
PROCESO DE SEPARACION DE FASES EN LA EXTRACCION
POR SOLVENTES DE COBRE**

**INFORME DE SUFICIENCIA
PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO
METALURGISTA**

PRESENTADO POR:
HYDER DAVID MAMANI HUANUCO

LIMA – PERU

2012

DEDICATORIA

Este trabajo es dedicado a mi familia
y la Universidad de Santiago de Chile
por el apoyo abnegado y constante.

RESUMEN

Una de sus principales problemáticas asociada con la etapa de separación de fases en la extracción por solventes se debe a la formación de terceras fases por incremento en el tiempo de separación, variación de las propiedades físicas (densidad, viscosidad y tensión interfacial) de las fases involucradas, % de extractante en la fase orgánica, concentración del metal en la fase orgánica y la temperatura del medio en la que se trabaja, entre las principales.

En este informe de suficiencia se estudió el efecto de las propiedades físicas de las fases acuosa y orgánica, el efecto de la temperatura y la concentración de cobre en la fase orgánica sobre la velocidad de separación de fases y el arrastre de acuoso en orgánico. Se trabajó en pruebas batch con reactores agitados mecánicamente con temperatura y velocidad de agitación controladas, se utilizó un extractante de nombre Lix 984N, el diluyente Shelsoll 2046 AR y soluciones acuosas sintéticas con distintas concentraciones de cobre y ácido.

Se encontró que la viscosidad está fuertemente ligada a la temperatura y al % de extractante; por ejemplo, a 5 °C con un 10% de extractante se tiene una viscosidad de 2.47 cP, si se incrementa a 40 °C y a 30% de extractante se tiene 3.05 cP.

En el caso de la tensión interfacial el fenómeno de inversión de fases fue notado en función a la temperatura y al % de extractante, pudiéndose determinar para ambos

casos que el punto donde los valores son mínimos es aproximadamente a temperatura ambiente.

Asimismo, se encontró que la variación de los parámetros que afectan fuertemente a las propiedades físicas y la determinación de la fase continua producen variaciones en el arrastre de acuoso en orgánico; el desenvolvimiento del arrastre de acuoso en orgánico en función al tiempo de ruptura primaria puede ser estimado en función a las propiedades físicas y la velocidad de coalescencia a fin de poder predecir la influencia de las mismas durante la separación de fases.

Se obtuvo además que el comportamiento de las propiedades de fases bajo las diferentes condiciones estudiadas influya directamente en el atrapamiento de acuoso en la fase orgánica, lo cual permite relacionar propiedades físicas versus atrapamiento de acuoso en orgánico.

INDICE

INDICE DE TABLAS	10
INDICE DE FIGURAS	12
NOMENCLATURA	16
GLOSARIO	17
CAPITULO I	21
ASPECTOS GENERALES	21
1.1 Justificación	21
1.2 Problemática	22
1.3 Hipótesis de trabajo	24
1.3.1 Objetivos	25
1.3.1.1 Objetivo general	25
1.3.1.2 Objetivos específicos	25
1.4 Alcances	26
1.5 Limitaciones	26
CAPÍTULO II	28
ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS	28
2.1 Investigaciones afines al tema de estudio	28
2.1.1 Introducción	28
2.1.2 Aspectos teóricos	29
2.1.3 Parámetros físicos	30
2.1.4 Tiempo de separación de fases	33
2.2 Tecnología de extracción por solventes	35
2.2.1 Introducción	35

2.2.2	Proceso de extracción por solventes	36
2.2.3	Sistema de extracción por solventes	38
2.2.3.1	Etapa de extracción	39
2.2.3.2	Etapa de reextracción	41
2.2.3.3	Etapa de lavado – operación complementaria	43
2.2.3.4	Reactivos orgánicos comerciales en la industria del cobre	44
2.3	Transferencia de materia en extracción por solventes	48
2.3.1	Densidad	49
2.3.2	Viscosidad	50
2.3.2.1	La viscosidad dinámica o absoluta	52
2.3.2.2	La viscosidad cinemática o comercial	53
2.3.2.3	Variación de la viscosidad con la temperatura.	54
2.3.2.4	Variación de la viscosidad con la temperatura y la presión.	55
2.3.3	Tensión interfacial	56
2.3.3.1	Definición termodinámica de la tensión interfacial	58
2.3.3.2	Efecto de la temperatura sobre la tensión interfacial	62
CAPÍTULO III		65
PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL		65
3.1	Procedimiento experimental	65
3.2	Descripción de los reactivos utilizados	66
3.2.1	Fase acuosa	66
3.2.2	Fase orgánica.	66
3.3	Caracterización de los reactivos utilizados	67
3.3.1	Reactivo Lix 984N.	67
3.3.2	Diluyente Shellsol 2046 AR.	67

3.4	Metodología experimental.	69
3.4.1	Medición de densidad.	69
3.4.2	Medición de viscosidad.	70
3.4.3	Medición de la tensión interfacial	71
3.4.4	Medición de arrastres A/O	75
3.4.4.1	Método turbidimétrico	76
3.5	Equipos y materiales utilizados	77
CAPÍTULO IV		81
DISCUSIÓN Y RESULTADOS		81
4.1	Estudios preliminares	81
4.1.1	Caracterización de las propiedades físicas de las soluciones acuosa y orgánica	81
4.1.1.1	Diluyente y extractante puro	81
4.1.1.2	Soluciones acuosas	85
4.1.1.3	Fase orgánica con distintos porcentajes de extractante	89
4.1.2	Caracterización de las propiedades físicas en el proceso de Extracción por solventes	93
4.1.2.1	Fase orgánica al 10% v/v	93
4.1.2.2	Fase orgánica al 20% v/v	97
4.1.2.3	Fase orgánica al 30% v/v	101
4.2	Estudio del efecto de las propiedades físicas en la velocidad de coalescencia	106
4.2.1	Influencia del % de extractante en la velocidad de coalescencia de la fase dispersa	106
4.2.1.1	Efecto a 10% Lix 984N	107
4.2.1.2	Efecto a 20% Lix 984N	108

4.2.1.3	Efecto a 30% Lix 984N	110
4.2.2	Correlación entre Propiedades físicas y Velocidad de coalescencia	111
4.2.3	Influencia del % de extractante en el tiempo de ruptura primaria	116
4.2.3.1	Efecto a 10% Lix 984N	116
4.2.3.2	Efecto a 20% Lix 984N	118
4.2.3.3	Efecto a 30% Lix 984N	119
4.2.4	Efecto del % de extractante en la separación de fases	121
4.3	Efecto de la temperatura en la separación de fases	123
4.3.1	Influencia de las propiedades físicas en la velocidad de coalescencia	123
4.3.2	Efecto a 10% Lix 984N	124
4.3.2.1	Efecto a 20% Lix 984N	125
4.3.2.2	Efecto a 30% Lix 984N	125
4.3.3	Influencia de la temperatura en la velocidad de coalescencia	126
4.3.3.1	Efecto a 10 % Lix 984N	127
4.3.3.2	Efecto a 20 % Lix 984N	128
4.3.3.3	Efecto a 30 % Lix 984N	130
4.4	Estudios del efecto del % de extractante en la generación de arrastres A/O	132
4.4.1	Influencia de la concentración de cobre y porcentaje de extractante (% v/v) en la fase orgánica	132
4.4.2	Influencia de la velocidad de coalescencia	134
4.4.3	Influencia del tiempo de separación de fases (ruptura primaria)	135
4.4.4	Influencia de las propiedades físicas	136
4.4.4.1	Efecto de la viscosidad	136
4.4.4.2	Efecto de la densidad	137

4.4.4.3 Efecto de la tensión interfacial	139
CONCLUSIONES	141
BIBLIOGRAFIA	145

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Evolución histórica de la extracción por solventes de cobre en la industria (Andrés Reghezza, 1987. Fundamentos y aplicaciones de Extracción por Solventes)	36
Tabla 2.2 Tabla comparativa de propiedades extractantes comúnmente usados (P. Navarro, 2001. Extracción por Solventes de Cobre)	46
Tabla 2.3 Principales compañías mineras productoras de cobre en Chile (2004)	47
Tabla 2.4 Formulas para la viscosidad en función a la temperatura	54
Tabla 3.1 Principales propiedades Extractante Lix 984N (Andrés Reghezza, 1987. Teoría y práctica de Extracción por Solventes)	67
Tabla 3.2 Propiedades típicas diluyente Shellsol 2046 AR (Andrés Reghezza, 1987. Teoría y práctica de Extracción por Solventes)	68
Tabla 4.1 Plantas hidrometalúrgicas en Chile (Minería Chilena Set 2004, N° 279, pp 66-72).	92
Tabla 4.2 Tabla resumen velocidad de coalescencia a 10% Lix 984N	108
Tabla 4.3 Tabla resumen velocidad de coalescencia a 20% Lix 984N	109
Tabla 4.4 Tabla resumen velocidad de coalescencia a 30% Lix 984N	111
Tabla 4.5 Velocidades de coalescencia batch y propiedades físicas de 19 sistemas agua/solvente Orgánico mutuamente saturados (J. Golob and R. Modic, 1977. Coalescence of liquid/liquid dispersions in gravity settlers)	112

Tabla 4.6 Velocidades de coalescencia batch y propiedades físicas de 9 sistemas fase Acuosa / fase Orgánica mutuamente saturados _____	114
Tabla 4.7 Constantes obtenidas por regresión múltiple lineal _____	114
Tabla 4.8 Tiempo de separación de fases a 10% Lix 984N _____	117
Tabla 4.9 Tabla comparativa entre tiempo inicial y de separación de fases _____	117
Tabla 4.10 Tiempo de separación de fases a 20% Lix 984N _____	119
Tabla 4.11 Tabla comparativa entre tiempo inicial y de separación de fases _____	119
Tabla 4.12 Tiempo de separación de fases a 30% Lix 984N _____	120
Tabla 4.13 Tabla comparativa entre tiempo inicial y de separación de fases _____	121
Tabla 4.14 Tabla resumen de las propiedades físicas en función a la temperatura a 10% Lix 984N _____	124
Tabla 4.15 Tabla resumen de las propiedades físicas en función a la temperatura a 20% Lix 984N _____	125
Tabla 4.16 Tabla resumen de las propiedades físicas en función a la temperatura a 30% Lix 984N _____	126
Tabla 4.17 Velocidades de coalescencia para 10% Lix 984N _____	127
Tabla 4.18 Velocidades de coalescencia para 20% Lix 984N _____	129

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Tratamiento de minerales oxidados de cobre _____	23
Figura 2.1 Proceso típico de extracción por solventes _____	39
Figura 2.2 Esquema del sistema de Extracción por solventes típico _____	44
Figura 2.3 Moléculas extractantes utilizadas en Extracción por solventes _____	45
Figura 2.4 Distribución del extractante en el mercado (2004) _____	47
Figura 2.5 Preferencias de los extractantes en el mercado chileno (2004) _____	48
Figura 2.6 Medidas de la densidad según gravedad API _____	50
Figura 2.7 Proceso de deformación de un fluido _____	51
Figura 2.8 Diagrama Viscosidad como desplazamiento _____	52
Figura 2.9 Acción de fuerzas en las moléculas en un sistema acuoso-orgánico _____	58
Figura 2.10 Diagrama interfase entre dos líquidos (líquido 1, líquido 2 e interfase). _____	59
Figura 2.11 Diagrama sistema difásico. _____	59
Figura 2.12 Empacamiento de las moléculas en la interfase agua (color verde) – aceite (color rojo) _____	62
Figura 2.13 Efecto de la temperatura sobre la tensión interfacial en un medio octano-acuoso _____	64
Figura 3.1 Reactor de vidrio utilizado en las pruebas _____	69
Figura 3.2 Densímetro GAMMA _____	70
Figura 3.3 Viscosímetro KPG Cannon Fenske _____	71
Figura 3.4 Tensiómetro K-6 Krauss _____	72
Figura 3.5 Colocación del anillo dentro de la vasija _____	72

Figura 3.6 Adición de la fase más densa_____	73
Figura 3.7 Adición de la fase menos densa – visualización de la interfase_____	73
Figura 3.8 Medición de la tensión interfacial_____	74
Figura 3.9 Retiro de la muestra del equipo_____	74
Figura 3.10 Relación entre sulfatos y % transmitancia_____	77
Figura 4.1 Densidad del extractante Lix 984N y diluyente Shellsol 2046 AR_____	82
Figura 4.2 Viscosidad extractante Lix 984N y diluyente Shellsol 2046 AR_____	83
Figura 4.3 Efecto viscosidad en consumo específico de extractante (Reporte anual minera Michilla 1997, pp 105)_____	85
Figura 4.4 Densidad fase acuosa a distintas concentraciones de cobre y ácido sulfúrico_____	86
Figura 4.5 Viscosidad fase acuosa a distintas concentraciones de cobre y ácido_____	87
Figura 4.6 Efecto de la viscosidad en la eficiencia del proceso de extracción (Increment of the Transference Efficiency in a Solvent Extraction Circuit in Sociedad Minera Cerro Verde, Félix Amado, Daniel Mayorga, Walter Aguayo - Sociedad Minera Cerro Verde S.A.A., Perú, pp 12)_____	89
Figura 4.7 Densidad fase orgánica a distintas concentraciones de extractante Lix 984N_____	90
Figura 4.8 Viscosidad fase orgánica a distintas concentraciones de extractante Lix 984N_____	91
Figura 4.9 Viscosidad fase orgánica a distintas concentraciones de cobre_____	93
Figura 4.10 Densidad de la fase orgánica a distintas concentraciones de cobre_____	94
Figura 4.11 Tensión interfacial de la fase orgánica a distintas concentraciones de cobre_____	95

Figura 4.12 Viscosidad de la fase orgánica a distintas concentraciones de cobre	97
Figura 4.13 Densidad de la fase orgánica a distintas concentraciones de cobre	99
Figura 4.14 Tensión interfacial de la fase orgánica a distintas concentraciones de cobre	100
Figura 4.15 Viscosidad de la fase orgánica a distintas concentraciones de cobre	102
Figura 4.16 Densidad de la fase orgánica a distintas concentraciones de cobre	103
Figura 4.17 Tensión interfacial de la fase orgánica a distintas concentraciones de cobre	104
Figura 4.18 Perfil de separación batch (fase dispersada más densa).	106
Figura 4.19 Perfil de coalescencia de la fase dispersada a 10% Lix 984N	107
Figura 4.20 Perfil de coalescencia de la fase dispersada a 20% Lix 984N	109
Figura 4.21 Perfil de coalescencia de la fase dispersada a 30% Lix 984N	110
Figura 4.22 Velocidad de coalescencia batch como una función de las propiedades físicas para Líquidos puros	113
Figura 4.23 Velocidad de coalescencia de las fase dispersa en función de las propiedades físicas para líquidos puros ($T=20^{\circ}\text{C}$, $\phi = 0.50$, continuidad orgánica).	115
Figura 4.24 Tiempo de separación de fases a 10% Lix 984N	116
Figura 4.25 Tiempo de separación de fases a 20% Lix 984N	118
Figura 4.26 Tiempo de separación de fases a 30% Lix 984N	120

Figura 4.27 Efecto del porcentaje de extractante en el tiempo de separación de fases_____	122
Figura 4.28 Efecto de la temperatura en la velocidad de coalescencia calculada_	128
Figura 4.29 Efecto de la temperatura en la velocidad de coalescencia calculada_	130
Figura 4.30 Efecto de la temperatura en la velocidad de coalescencia calculada_	132
Figura 4.31 Efecto del % de extractantes y concentración de cobre en el arrastre A/O_____	133
Figura 4.32 Efecto de la velocidad de coalescencia en el arrastre de O/A_____	134
Figura 4.33 Efecto del tiempo de separación en la generación de arrastre A/O__	135
Figura 4.34 Grafico comparativo entre viscosidad y arrastre A/O ppm_____	137
Figura 4.35 Grafico comparativo entre densidad y arrastre A/O ppm_____	138
Figura 4.36 Grafico comparativo entre tensión interfacial y arrastre A/O ppm__	139

NOMENCLATURA

<u>Símbolo</u>	<u>Descripción</u>	<u>Unidades</u>
P	Presión	kPa
V	Volumen	m ³
W	Trabajo	
A	Area	m ²
μ_c	Viscosidad de la fase continua	CentiPoise (cP)
μ_d	Viscosidad de la fase dispersa	CentiPoise (cP)
a, b, c, d	Coefficientes constantes	---
T = Temperatura (K)	Temperatura	K
ν	Viscosidad cinemática	mm ² /s
γ	Tensión interfacial	mN/m
γ_r	Tensión superficial del agua a 20°C	mN/m
ρ_c	Densidad	Kg/m ³
$\Delta\rho$	Diferencia de densidad entre fase continua y fase dispersa	Kg/m ³
v_d	Velocidad de coalescencia batch de fase dispersa	cm/s
[Cu]	Concentración de Cobre en solución	g/l
TSF	Tiempo de separación de fases	Segundos
To	Tiempo inicial de coalescencia	Segundos

GLOSARIO

Continuidad de fases

Existe una relación entre el arrastre y la continuidad de fase. Bajo continuidad orgánica, la fase acuosa se dispersa en forma de gotitas en la fase orgánica, el arrastre acuoso en la fase orgánica es común.

En las dispersiones orgánicas continuas por lo general producen una fase acuosa baja en el arrastre orgánico. Por lo tanto, con el fin de producir un licor tira y refinado bajo en el arrastre orgánico, se recomienda para operar la primera etapa de extracción y la última etapa de extracción con dispersiones orgánicas continuas en los mezcladores.

Tensión interfacial

Se llama tensión interfacial a la energía libre existente en la zona de contacto de dos líquidos inmiscibles. Esta energía es consecuencia de las tensiones superficiales de los dos líquidos, y evita que se emulsiones espontáneamente. Las unidades de medida de la tensión interfacial son Newton/m o dinas/cm.

Continuidad acuosa

Esta condición aplica cuando la fase orgánica se dispersa en forma de pequeñas gotas en toda la fase acuosa.

Continuidad orgánica

La condición cuando la fase acuosa se dispersa en forma de pequeñas gotitas en toda la fase orgánica.

Crud

Un término común para la masa de sólidos que se acumulan en la interfase orgánica / acuosa.

Diluyente

Es el solvente orgánico en el que el extractante se disuelve para formar en la fase orgánica. Se compone de cualquier tipo de hidrocarburo alifático o aromático, o una mezcla de los dos.

Dispersión

Una emulsión inestable causada por contacto de las fases orgánica y acuosa.

Coefficiente de distribución

Es una medida del poder extraer de la fase orgánica. Es igual a la concentración del metal en la fase orgánica dividida por la concentración en la fase acuosa.

Curva de distribución

También se conoce como isoterma y el diagrama de McCabe-Thiele. Es un gráfico que muestra la relación, en equilibrio, entre la concentración del metal en la fase acuosa como una función del metal en la fase orgánica.

Emulsión

Es una dispersión estable de las fases orgánica y acuosa que requieren mucho tiempo para unirse y separarse.

Arrastre

Es la suspensión de pequeñas gotas de una fase en la que se deja llevar por otra fase.

Extractante

El componente activo en la fase orgánica que reacciona químicamente con el metal a partir de un complejo orgánico de metal que es soluble en la fase orgánica.

Cinética de extracción

La velocidad a la que un metal se transfiere de la fase acuosa a la fase orgánica. Se determina el tiempo de contacto y el tamaño de la mezcladora.

Capacidad de carga

La concentración máxima de un metal en la fase orgánica bajo un conjunto dado de condiciones.

Modificador

Un componente añadido a la fase orgánica, por lo general para impedir la formación de una tercera fase mediante el aumento de la solubilidad del complejo orgánico de metal.

Ratio O / A

La cantidad de fase orgánica dividida por la cantidad de fase acuosa

Extracción porcentual

Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Ext (\%)} = S / D \times D / (1 + O / A \times P) 100 \times$$

"D" es el coeficiente de distribución.

Fase de Continuidad

El tipo de dispersión de las dos fases, ya sea acuosa u orgánica continúa.

Fase de la Separación

Un término utilizado para describir cuando las fases orgánica y acuosa se unen y se separan en dos componentes

Fase de Inversión

Un cambio en la dispersión de la continuidad de fase uno al otro.

Separación Factor

Es una medida de la selectividad de la fase orgánica. Se calcula por la siguiente ecuación:

$$SF = D_{\text{metal}} / D_{\text{impureza}}$$

"D" es el coeficiente de distribución.

Área del sedimentador

Una medida para describir el tamaño requerido para un decantador. Generalmente se expresa como $m^3/h/m^2$.

CAPITULO I

ASPECTOS GENERALES

1.1 Justificación

Los principales pilares que justifican la realización del informe de suficiencia son:

- **Innovación:** Implementar el conocimiento actual sobre el tiempo de dispersión enfocado en base a las propiedades físicas lo cual permita entender mejor la importancia de cada una de las propiedades físicas medibles.
- **Evolución:** Los constantes descubrimientos de nuevas tecnologías hace evolucionar inevitablemente el procesamiento de minerales, es por esto que basándose en las nuevas tecnologías que se imponen en el mercado se ha optado por implementar una manera de determinar y/o aproximar los tiempo de separación de fases utilizando información medible a nivel laboratorio.
- **Economía:** Basada en ello, se puede disminuir la formación de terceras fase producto de un tiempo corto para su completa separación, ello viene de la mano con un rediseño de los *mixer-settler* los cuales permitan mejorar y optimizar el proceso de Extracción por solventes y minimizar las perdidas.

- **Creatividad:** Este informe de suficiencia es parte de un conjunto de estudios realizados años atrás por investigadores donde se estudio la correlación entre el tiempo de separación y las propiedades físicas inherentes a cada compuesto. Un informe de suficiencia de estas características nunca antes ha sido presentado, y menos implementado a nivel industrial como parámetro de operación.
- **Necesidad:** Quizás una de las mayores justificaciones, ya que con esta aplicación, es posible poder establecer la base de un trabajo posterior que permita la utilización en la industria y en la minería.

1.2 Problemática

El cobre se encuentra presente en la corteza terrestre formando compuestos tipo óxidos y/o sulfuros. En la actualidad no existen yacimientos con cantidades de cobre nativo o puro (Cu).

Los minerales oxidados se sitúan en la superficie de la corteza terrestre y los sulfurados a mayor profundidad. Los óxidos se pueden identificar por sus intensos colores azulinos o verdosos y su opacidad. Una de las principales características fisicoquímicas es su fácil disolución en la presencia del ácido sulfúrico. Los sulfuros, por su lado se caracterizan por su color y su brillo metálico y su poca reactividad con el ácido sulfúrico.

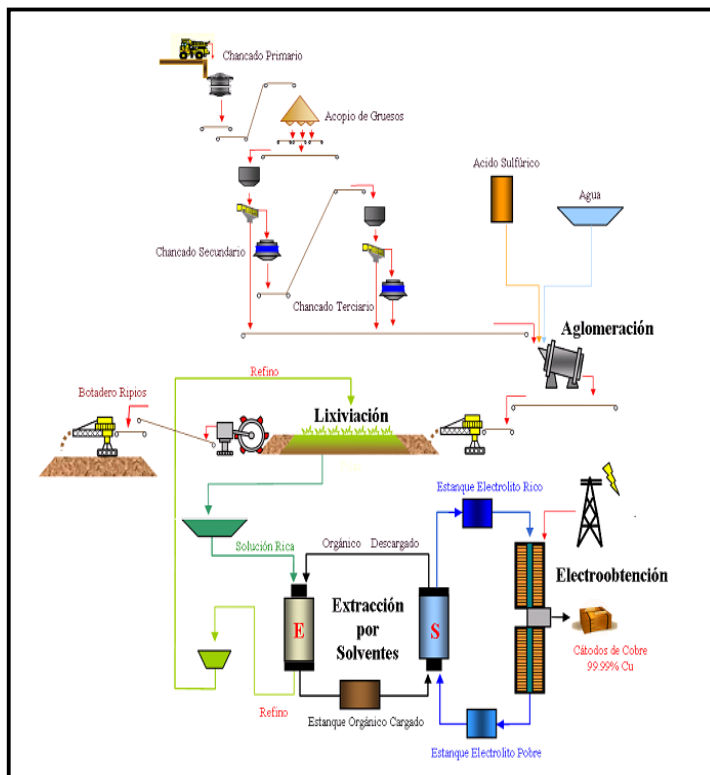


Figura 1.1 Tratamiento de minerales oxidados de cobre

En todo proceso de extracción por solventes (SX), se genera el arrastre de una de las fases en la otra en la forma de microgotas que no logran ser separadas en los decantadores, lo que trae consigo problemas operacionales y deficiencias en la recuperación.

En la extracción por solventes (SX) interesa de sobremanera los arrastres de acuoso en el orgánico cargado por cuanto al avanzar este último a la etapa de re-extracción genera una contaminación gradual del electrolito con impurezas perjudiciales afectando la electrodeposición (EW).

Los arrastres en la fase orgánica en el refino y en el electrolito rico también son de preocupación ya que esta pérdida de orgánico del circuito representa una de los principales costos de operación de la planta de extracción por solventes. A la vez los arrastres causan problemas de contaminación del electrolito rico con el orgánico y posteriormente en los cátodos a obtener en la electrodeposición. Los niveles de arrastre son una respuesta de la eficiencia de la separación de fases, la cual está influenciada por los siguientes factores principales:

- Propiedades físicas (densidad, viscosidad, tensión interfacial)
- Temperatura
- Continuidad de fase
- Grado de agitación en el mezclador
- Razón de fases, O/A
- Naturaleza de la fase orgánica
- Tasa de formación de borras : CRUD

1.3 Hipótesis de trabajo

La hipótesis de trabajo está basada en que durante mucho tiempo varios investigadores plantearon la necesidad de poder predecir el tiempo de ruptura primario así como poder definir el perfil de coalescencia durante el proceso de separación de fases en función a las propiedades físicas.

Es así que a partir de un estudio donde se menciona diversas propiedades físicas se propone la utilización de un modelo planteado por Golob y Modic a fin de determinar si dicha propuesta matemática se aplicaba a nuestro sistema siendo que

nuestra fase orgánica estaba compuesta por una mezcla extractante–diluyente y la fase acuosa era una mezcla de sulfato de cobre pentahidratado y ácido sulfúrico.

1.3.1 Objetivos

El objetivo general es el título de la investigación y los objetivos específicos son los que determinan el proceso del esquema experimental en cada una de sus etapas a llevarse a cabo.

1.3.1.1 Objetivo general

El objetivo general es definido como el estudio del efecto de las propiedades físicas en el arrastre de fases durante el proceso de extracción por solventes.

1.3.1.2 Objetivos específicos

Son los siguientes:

- Efecto de la temperatura, el porcentaje de extractante y la concentración de cobre en las propiedades físicas del extractante, diluyente y de las soluciones acuosas a distintas concentraciones.
- Efecto de la temperatura, la concentración de cobre y el porcentaje de extractante en las propiedades físicas de la fase orgánica y acuosa en un sistema orgánico-acuoso.
- Establecer una correlación entre las propiedades físicas y la velocidad de coalescencia, así como el modelamiento del perfil de coalescencia de la fase dispersa.

- Efecto de la temperatura, la concentración de cobre, la velocidad de coalescencia y las propiedades físicas en el tiempo de ruptura primario (etapa de separación de fases).
- Efecto de la concentración de cobre, los porcentajes de extractante, velocidad de coalescencia, tiempo de ruptura primario y las propiedades físicas en la generación de arrastres A/O.

1.4 Alcances

Están enfocados en el efecto de las propiedades físicas inherentes a cada solución producto de la mezcla en el tiempo de separación de fases de las mismas posterior a ello.

Las pruebas fueron realizadas a escala de laboratorio a fin de conocer la variación de cada una de las propiedades físicas en función al carguío de cobre dentro de si, esto va desde el análisis de las tensión interfacial entre dos soluciones en función a la temperatura, hasta el efecto en la viscosidad y la densidad de las soluciones producto obtenidas en cada etapa.

1.5 Limitaciones

Las aplicaciones encontradas en el presente trabajo están circunscritas a escala de laboratorio, lo cual puede para ser escalado a nivel industrial es necesario la realización de diversas pruebas a fin de poder establecer cualquier cambio a lo propuesto en este presente trabajo.

El planteamiento y ejecución de las diversas pruebas a nivel laboratorio fueron realizadas con soluciones sintéticas preparadas para laboratorio, para conocer el efecto del tiempo de separación de fases en función a las propiedades físicas medibles en cada una de las fases producto de la mezcla de ambas.

CAPÍTULO II

ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

2.1 Investigaciones afines al tema de estudio

2.1.1 Introducción

En este capítulo se señalan los detalles de investigaciones previas que se han realizado sobre el tema afín al presente estudio realizado.

El proceso de extracción por solventes es, en líneas generales, la recuperación del soluto en la fase acuosa mediante la extracción con una fase orgánica, inmiscible con la anterior. Esta técnica se realiza desplazando el equilibrio de la reacción que controla la distribución de un soluto de dos líquidos inmiscibles. La manipulación del equilibrio se realiza generalmente por un ajuste de pH en la fase acuosa mezclando y agitando físicamente ambos líquidos formando una dispersión de una de las fases dentro de la otra, hasta acercarse a un equilibrio. En la etapa de mezclado se produce la transferencia de masa del soluto que se desea extraer. El mezclado y separación de grandes caudales de solución, se realiza en equipos denominados *mixer-settler*. Luego, las soluciones se dejan decantar en los *settler* realizándose la separación de

las dos fases de las cuales la que traía originalmente el producto, recibe el nombre de refinado y la que recibió se denomina extractante.

2.1.2 Aspectos teóricos

Varias investigaciones han tratado de establecer una correlación entre las propiedades físicas con la sedimentación y la coalescencia, principalmente la determinación de la altura de la banda de dispersión durante el proceso de separación de fases, basándose en la determinación experimental de la velocidad de coalescencia así como el perfil de coalescencia obtenido a fin de poder simular su desenvolvimiento bajo determinadas condiciones de trabajo.

Entre los más importantes tenemos a Golob y Modic (J. Golob and R. Modic, *Coalescence of liquid-liquid dispersions in gravity settlers*, Trans IChemE 1977, Vol. 55, 207-211), quienes a través de varias pruebas y comparaciones entre datos teóricos y resultados experimentales pudieron obtener correlaciones semi empíricas las cuales a nivel laboratorio y a escala industrial tienen un alto grado de exactitud pudiendo predecir el desenvolvimiento de un proceso de separación de fases así como la altura de la banda de dispersión obtenida durante dicho proceso.

Así también tenemos a Hartland y Jeelani (S.A.K. Jeelani and S. Hartland, *Effect of Dispersion Properties on the Separation of Batch liquid-liquid Dispersions*, Ind. Eng. Chem. Res. 1998, Vol. 37, 547-554), quienes dieron los lineamientos base (1986) para la descripción de un proceso de separación de fases en función al diseño de un sedimentador por gravedad de un sistema líquido-líquido. Más adelante se

estudió el efecto de las propiedades físicas sobre dispersiones liquido-liquido a nivel laboratorio (1998), donde se consideró el desenvolvimiento de la altura de la banda de dispersión en función a las interfases de coalescencia y dispersión, tomando como dato inicial el valor conocido del diámetro inicial de la gota y el tiempo de coalescencia interfacial.

Finalmente se tiene a Nadiv y Semiat (Corinne Nadiv and Raphael Semiat, *Batch settling of liquid-liquid*, Ind. Eng. Chem. Res. 1995, Vol. 34, 2427-2435), quienes analizaron y estudiaron la sedimentación de dispersiones liquido-liquido, teniendo como parámetros principales las velocidades de coalescencia y sedimentación, la altura inicial de la dispersión y los tiempos respectivos a fin de poder obtener un modelo simple y que permita un fácil entendimiento así como su aplicación en pruebas a nivel laboratorio.

2.1.3 Parámetros físicos

Golob y Modic (1977), efectuaron varias pruebas a nivel batch para poder establecer una correlación entre las propiedades físicas y la velocidad de coalescencia de dispersiones entre líquidos puros y los ocurridos en sistemas industriales. Además de tener datos experimentalmente obtenidos, también se recopiló datos de diversos autores a fin de poder comprobar si dicha correlación permitía tener una función que permita conocer la velocidad con la que el acuoso coalesce dentro de una continuidad orgánica.

El objetivo de dicho trabajo fue encontrar una correlación entre la velocidad de coalescencia batch y las propiedades físicas de líquidos puros mutuamente saturados,

así mismo, comprobar si la correlación permite también una aplicación a nivel industrial de dicha correlación, en este caso en específico se llevo al proceso de extracción *AMEX* aplicado al uranio. También se trató de establecer una correlación entre la velocidad de coalescencia y el flujo específico de ingreso por unidad de área del sedimentador.

El estudio se llevo a cabo dentro de un amplio rango de valores de propiedades físicas. Dichos compuestos fueron llevados a contactos con agua destilada por un periodo de 2 horas de agitación a una temperatura constante (20°C). La determinación de la velocidad de coalescencia se dio midiendo la pendiente de la recta obtenida en casi la totalidad de la separación de fases.

Se pudo establecer a fin de cuentas una correlación para un conjunto de 19 sistemas puros, los cuales por su alta correlación ($r^2=99.7\%$), se planteó como alternativa simple y sencilla para obtener en función a las propiedades físicas tales como densidad, viscosidad y tensión interfacial a fin de poder predecir el desenvolvimiento de la fase dispersada (fase acuosa), y así mismo poder determinar si el arrastre de gotas de acuoso en orgánico (A/O) aumenta a medida que se disminuya dicha velocidad.

Jeelani y Hartland (1986, 1998), trataron de diseñar a partir de pruebas de laboratorio un sedimentador por gravedad en función a lo planteado antes por otros autores. Recientes experimentos han permitido el desarrollo de modelos teóricos basados en diferentes mecanismos que controlan la separación de dispersiones. Esto permite que

la variación en la altura de dispersión pueda ser predecida a partir de los perfiles de coalescencia y sedimentación.

Para ello tomaron en cuenta las propiedades físicas antes mencionadas pero al mismo tiempo también propusieron que el tiempo de coalescencia de una gota en la interfase la altura de la dispersión, el diámetro promedio de la gota inicial en la dispersión, la fuerza de cohesión de la fase dispersada también son parámetros iniciales que permiten modelar de manera más exacta el proceso de separación de fases, específicamente los perfiles de coalescencia así como la altura de la banda de dispersión durante el proceso de separación.

En este caso se tomó como fase continua agua desmineralizada con una densidad de 996 Kg/m³ y una viscosidad de 1 mPa.s. La fase dispersa fue una mezcla de un compuesto a base de decano (25%) en parafina con una densidad de 837.3 Kg/m³ y una viscosidad de 1.26 mPa.s a 20°C. la tensión interfacial inicial fue de 52.4 mN/m.

El procedimiento fue usando envases los cuales fueron llenados en ambas fases. Los líquidos fueron agitados por 2 horas hasta que alcanzaron una total saturación mutua entre ambas fases. También se mostró que la ubicación del agitador es importante porque allí se define la continuidad dentro del proceso de mezclado para determinar cual es la fase que coalesce.

2.1.4 Tiempo de separación de fases

Nadiv y Semiat (1995), concluyeron que el tiempo de coalescencia es muy importante dentro del modelamiento de la separación de fases, cabe señalar que muchos de los modelos fueron propuestos teniendo como dato inicial el tiempo de separación de fases y/o el tiempo de coalescencia interfacial medido. Se analizó el efecto de diversos parámetros para determinar su incidencia teniendo como principal parámetro la velocidad de coalescencia ya que una disminución del mismo permite un mayor tiempo de separación y viceversa.

Parte del estudio incluyó analizar la ubicación del agitador dentro del reactor permitiendo así estudiar su incidencia que determina el tipo de continuidad en que se está trabajando porque ello determina de manera directa el tipo de continuidad al cual es sometido dicho proceso de mezclado. Como resultado se pudo obtener dentro de una continuidad acuosa que los tiempos de separación eran más cortos, a diferencia de una continuidad orgánica donde los tiempos son más largos, debido a que el frente de coalescencia necesita mayor tiempo en comparación con el frente de sedimentación.

Así mismo se pudo observar que a medida que la velocidad de agitación se incrementaba, los tiempos de coalescencia también y esto debido a que a mayor velocidad de agitación la generación de gotas más finas es mayor que a menores velocidades, generando esto en un incremento en el tiempo de coalescencia de la fase dispersada.

Jeelani y Hartland (1986), dentro de sus primeros estudios definieron los modelos de separación de fases teniendo como mecanismo la deducción del modelo del perfil de sedimentación y coalescencia. Estas deducciones parten en base a los datos iniciales y al tipo de curva que uno obtiene de manera experimental.

Estas variaciones permiten la determinación del modelo apropiado respondiendo a los mecanismos individuales involucrados. En líneas generales es un diagrama lógico el cual dentro de una serie de etapas envueltas y detalladas dentro del diagrama permite su modelamiento.

Además Jeelani y Hartland (1998), propusieron la partición del tiempo separación de fases esta se dividió en 2 etapas, obviamente dicha división esta dada porque ellos definen que el momento donde la altura de la capa de la zona densa decrece es el tiempo de inflexión, por lo tanto se define un comportamiento antes del tiempo de inflexión y posterior a este, teniendo esto como base que la continuidad es acuosa y no orgánica.

2.2 Tecnología de extracción por solventes

2.2.1 Introducción

La extracción por solventes se remonta al año 1965 donde el éxito alcanzado impulsó la instalación de numerosas plantas a nivel industrial que operan generalmente con un circuito lixiviación (LX) – extracción por solventes (SX) – electrodeposición (EW). De esta manera el desarrollo de esta técnica fue notable y viendo que la recuperación de cobre reviste especial interés, afianzándose como uno de los procesos más empleados comercialmente para la obtención de este metal a partir del óxido.

Su aplicación en la industria del cobre ha posibilitado el beneficio de menas oxidadas que por métodos tradicionales sería antieconómico su procesamiento. Esto ha permitido tratar minerales de baja ley (ripios, desmontes, etc.) o soluciones diluidas (agua de mina, soluciones de descarte) con niveles variables de impurezas, obteniéndose soluciones muy concentradas y puras, las cuales estaban aptas para la electrodeposición. De esta forma, una vez extraído el cobre, pueden extraerse otros elementos de valor, un ejemplo típico es la extracción de Uranio a partir de soluciones de lixiviación pobres de cobre y en otro ejemplo, las soluciones extraídas de la tostación de minerales de cobre–molibdeno, en la cual primero se separa el molibdeno y luego se procede a recuperar el cobre. El proceso antes mencionado de lixiviación – extracción por solventes – electrodeposición no presenta mayores problemas de tipo ambiental en comparación frente a otras alternativas. A continuación se muestra la tabla 1, donde se detalla el desarrollo histórico de la extracción por solventes en el área de la metalurgia.

Tabla 1.1 Evolución histórica de la extracción por solventes de cobre en la industria (Andrés Reghezza, 1987. Fundamentos y aplicaciones de Extracción por Solventes)

Año	Aplicación
1842	Extracción de uranio
1942	Purificación de nitrato de uranilo, USA – proyecto Maniatan
1951	Separación de circonio de hafnio con MIBC, Bureau of Mines
1953	Refinación de uranio con TBP, Nacional Lead Co.
1955	Recuperación de uranio como sub producto de la producción de Acido fosforito mediante acido octipirofosfórico
1956	Recuperación de uranio y vanadio mediante acido alquifosfórico y aminas alifáticas
1957	Extracción de niobio y tantalio con MIBK, Bureau of Mines
1959	Recuperación de torio de efluentes de uranio
1966	Instalación de planta SX-EW por la Rancher Corporation, Arizona, usando el reactivo LIX 64N producido por la Henckel Corporation.
1970	Construcción e instalación de la primera planta SX-EW a gran escala en Nchanga – Zambia.
1971	Separación de níquel y cobalto con el uso de aminas terciarias. Empleo de la extracción por solventes en el oro. Desarrollo de la extracción por solventes en recuperación de zinc.
1975	Separación y recuperación de germanio, con LIX 63, Hoboken – Overplet, Bélgica

2.2.2 Proceso de extracción por solventes

El proceso de extracción por solventes (extracción líquido-líquido) es una técnica de separación que envuelve la transferencia de masa a través de la fase límite, y debido

a que no es limitada a la transferencia del metal desde una fase acuosa a una no acuosa o viceversa. Nosotros por lo tanto veremos algunas restricciones para la aplicación de la extracción por solventes al procesamiento metalúrgico.

Básicamente, el proceso de extracción por solventes es aplicado a la separación de metales y a la purificación de mezclas requiere solo que un metal específico sea transferido inicialmente desde una fase acuosa a una no acuosa, seguido por una inversión de esta transferencia. Este proceso puede ser definido simplemente por la siguiente ecuación:



Aquí la fase no acuosa es denotada por una barra sobre la especie considerada para estar presente en esa fase. Esta ecuación que representa una situación donde una especie metálica M en una fase acuosa es contactada con una no acuosa conteniendo el extractante E, por lo que la transferencia del metal M a través de la fase imite produce una especie \overline{ME} la cual es soluble en la fase no acuosa. Este fenómeno es descrito como extracción, y tiene como objetivo la separación de un metal en este caso M, desde otros metales o compuestos de un sistema acuoso. Este proceso de extracción es un proceso de equilibrio, y el alcance al cual la extracción ocurre.

El proceso de extracción prevé la transferencia del metal desde una fase a otra. En los procesos metalúrgicos, un segundo proceso es requerido para transferir el metal desde la fase orgánica a una fase acuosa nueva. Esto, el proceso de reextracción, es lo inverso del proceso de extracción, y requiere que el equilibrio en la ecuación antes mostrada sea cambiado a la izquierda.

Es evidente entonces que la separación y recuperación de un metal en particular puede al menos en teoría, ser logrado por dos operaciones básicas de transferencia envolviendo dos fases líquidas. Las dos fases envueltas deben tener una mínima solubilidad mutua.

El proceso básico de extracción por solventes es en teoría, algo simple, el cual depende esencialmente del cambio de la posición del equilibrio químico de un sistema de dos fases, por el cual significa cualquier extracción de metal o reextracción es alcanzada. Pero como es usual en este caso, la aplicación de una operación básicamente simple a situaciones reales incrementa de algún modo la complejidad. Sin embargo, la simplicidad básica del proceso de extracción por solventes es una atracción particular para su uso en los procesos metalúrgicos.

2.2.3 Sistema de extracción por solventes

En el proceso de extracción por solventes se distinguen dos partes fundamentales, una de ellas es la operación de extracción o carga del reactivo y la otra, operación de reextracción o descarga del reactivo. A continuación se revisaran los aspectos fundamentales de cada una de las dos operaciones esenciales para la existencia del proceso de SX.

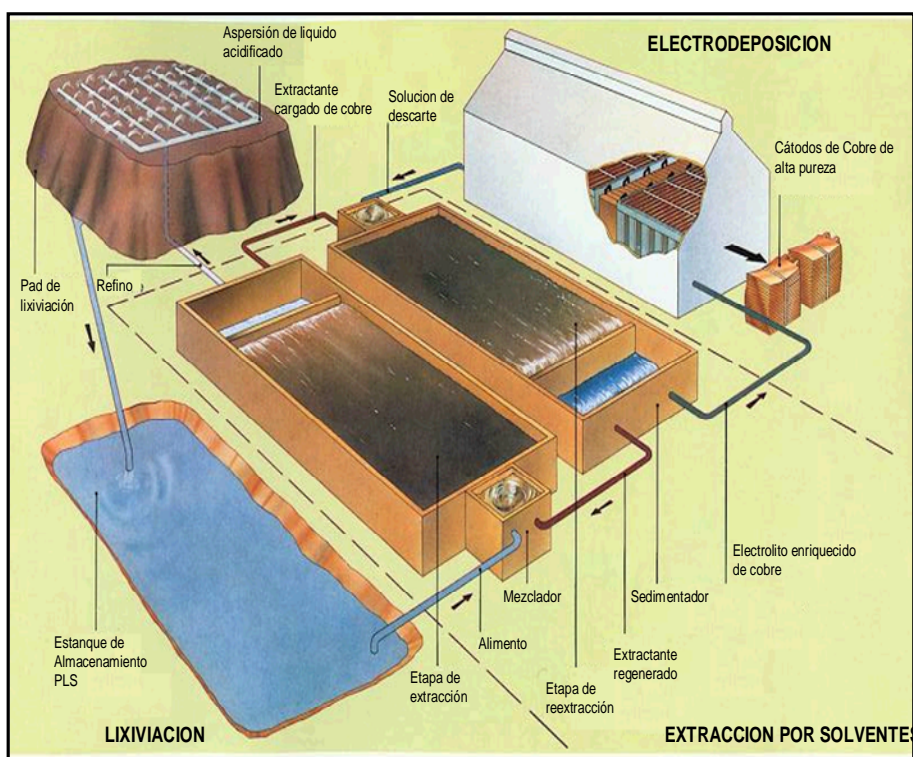


Figura 2.1 Proceso típico de extracción por solventes

A continuación se detalla cada una de las etapas del proceso de extracción por solventes las cuales van a permitir un mejor entendimiento del sistema y de cada una de las etapas para así poder comprender la problemática general.

2.2.3.1 Etapa de extracción

Para ejecutar la operación de extracción, esencial para el proceso de SX, es requerido en primer lugar la presencia de una fase constituida por la solución portadora de la especie o especies, la cual es denominada “fase acuosa”, mientras que por otra parte se requiere una fase orgánica conformada por el reactivo extractante disuelto dentro de un diluyente orgánico.

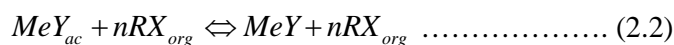
Ambas fases son inmiscibles por lo que para poder proceder a ejecutar la operación de extracción es necesario producir una mezcla entre ambas, esto se logra mediante la acción de elementos externos que proporcionan la energía necesaria para lograrlo. Cuando se logra la mezcla, ocurre una transferencia de la especie o especies metálicas disueltas en la fase acuosa, la cual se asocia químicamente con el reactivo orgánico extractante en la fase orgánica, hasta alcanzar el equilibrio químico definido como coeficiente de distribución. Se debe tener en cuenta que existen ciertas restricciones como la capacidad de carga y la dilución que presenta el mismo reactivo en la fase orgánica, cuyo límite es la viscosidad y la solubilidad del respectivo complejo organometálico extraído.

Generando una fase orgánica cargada con la especie o especies metálicas de interés y una solución acuosa descargada (agotada, pobre o refino), dada la inmiscibilidad ya señalada y las características geométricas de los recipientes que las contienen, ambas fases se separan, quedando la fase orgánica cargada ya lista para una siguiente operación de descarga, mientras la fase acuosa pobre es retornada a la lixiviación y/o a otra operación de neutralización y descarte.

En esta etapa es importante el control de las impurezas que suelen venir en la solución acuosa ya que la idea principal es no solo extraer la especie de interés, sino que es hacerlo en forma selectiva y con una buena recuperación, cumpliendo con los objetivos exigidos al reactivo. Según el tipo de reactivo extractante que se esté usando y del metal, o del complejo metálico, que se esté extrayendo se tiene que la

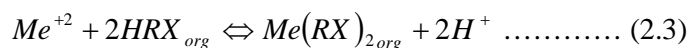
extracción misma puede ser molecular o iónica, siendo esta última, catiónica o aniónica.

Si la extracción es de forma molecular:



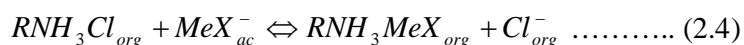
Ejemplos claros están dados por la extracción del cloruro ferrico ($HFeCl_4$) con éter dietílico ($(C_2H_5)_2O$) y el del nitrato de uranilo ($UO_2(NO_3)_2$) con TBP.

Si la extracción es catiónica:



Ejemplos están dados por el caso del Zinc (Zn^{+2}) con D_2EHPA y el caso del cobre (Cu^{+2}) con las oximas quelantes del tipo LIX o Acorga.

Si es del tipo aniónico se tiene:



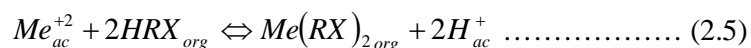
Claros ejemplos están dados por la extracción utilizando aminas, por ejemplo, el cloruro de platino ($PtCl_2$)⁻² con trioctilamina (R_3NH).

2.2.3.2 Etapa de reextracción

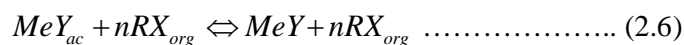
La operación de Reextracción o descarga del reactivo, consiste en la recuperación de la especie metálica desde la fase orgánica, con la regeneración simultánea de las capacidades extractivas de la fase orgánica, lo que permite ser vuelta a usar en la

etapa de extracción. En muy pocas ocasiones el reactivo orgánico requiere ser regenerado o acondicionado en una operación separada. Aprovechando la devolución del metal, o complejo metálico, la nueva fase acuosa de reextracción, es seleccionada bajo condiciones que favorezcan la reversibilidad de la reacción de extracción.

De esta manera los extractantes tipo quelante, los ácidos orgánicos y en general todos los reactivos orgánicos que operan por intercambio catiónico, funcionan sobre la base del ciclo de hidrógeno y la operación de descarga se produce bajo condiciones de mayor acidez, es decir, de mayor concentración de protones H^+ , o de bajo pH, condición que desplaza hacia la izquierda la reacción reversible:



En el caso de mecanismos de extracción molecular, o neutra, no existe la misma correlación del hidrógeno cíclico y por lo tanto, otros cambios habituales frente a las condiciones de extracción los que favorecen la descarga del reactivo orgánico cargado.



La recuperación directa del metal de interés, precipitándolo como un sólido directamente desde la fase orgánica, ha sido una permanente preocupación de los investigadores. Por ejemplo, se ha investigado la reducción directa mediante gas hidrógeno, sin embargo, se ha demostrado que la mayoría de los reactivos

extractantes usados en la extracción por solventes tienden a descomponerse a las elevadas temperaturas y altas presiones que se requieren para que dicho proceso de precipitación suceda. No obstante, algunos ácidos carboxílicos alifáticos permanecen estables y metales como el cobre, el cobalto y el níquel se pueden reextraer directamente desde estos extractantes, aunque esto no ha pasado de una investigación sin aplicaciones prácticas concretas.

2.2.3.3 Etapa de lavado – operación complementaria

En muchas ocasiones la extracción por solventes se aprovecha para cambiar de medio acuoso, hacia otro medio que resulta mas favorable, por ejemplo, el proceso posterior de recuperación del metal, otro ejemplo lo constituye la lixiviación en medio de ácido sulfúrico para el uranio, que resulta muy practica por su alta disponibilidad y bajos costos de consumo de ácido en el ataque de los minerales de baja ley. Posteriormente se realiza la descarga dentro de un medio nítrico.

Para la lixiviación del cobre en la cual se utiliza el agua de mar, con alto contenido de sales, en especial cloruros. Sin embargo, el medio de recuperación electrolítica de cátodos de alta calidad requiere de un electrolito puro, que no admite más de 20 a 30 ppm de iones cloruros, es decir, es una disminución del cloro en más de 2000 veces.

En todos los casos, lo que se hace es un eficaz lavado del reactivo orgánico cargado, si el efecto de los arrastres es dañino en la etapa de reextracción. También existen casos en que el lavado debe hacerse en ambos sentidos, sobre el orgánico cargado, para evitar arrastres desde el circuito de extracción y sobre el orgánico descargado, para eliminar el efecto de contaminación desde el circuito de descarga.

Para la operación de lavado debe evitarse que se produzcan efectos indeseados, por ejemplo, de descarga prematura, cuando el lavado se ejecuta sobre el orgánico cargado. En todo caso, un circuito de extracción por solventes completo, que involucra las operaciones de extracción, de lavado, de descarga y la posterior recuperación del metal, como se muestra a continuación en la figura 2.2.

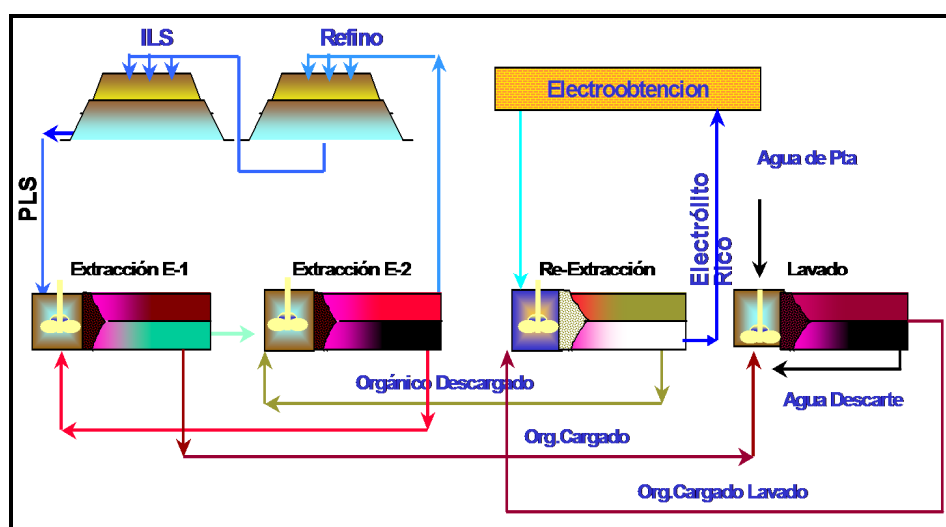


Figura 2.2 Esquema del sistema de Extracción por solventes típico

2.2.3.4 Reactivos orgánicos comerciales en la industria del cobre

En la industria del cobre, los extractantes utilizados en el proceso de extracción por solventes utilizan las moléculas denominadas aldoximas (por ejemplo, nonilaldoxima y dodecilaldoxima) y cetoxima más el uso de modificadores de fases como el éster, tridecanol y nonilfenol. A partir de estas moléculas se forman los extractantes comerciales, los cuales tienen características químicas y físicas dependiendo de las mezclas formadas y del tipo de modificador utilizado.

El desarrollo del proceso de extracción por solventes estuvo asociado al nacimiento de ligantes específicos para el cobre (aldoximas), posteriormente se introdujeron otras formulaciones basadas en las cetoximas los cuales mejoraron las s.

En la figura 2.3, se muestran moléculas de extractantes usados en el proceso de extracción por solventes del cobre.

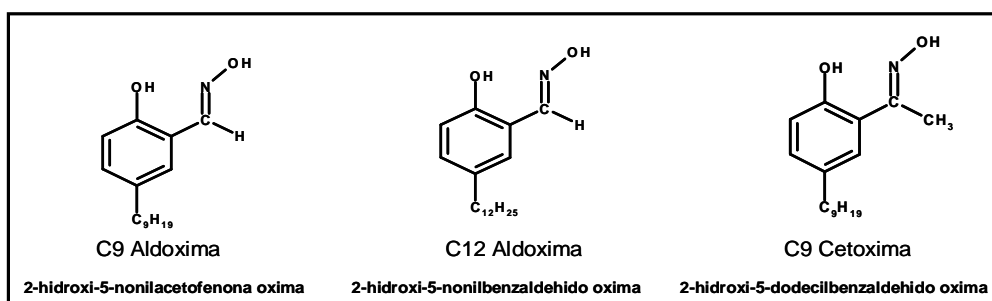


Figura 2.3 Moléculas extractantes utilizadas en Extracción por solventes

El uso de reactivos tipo aldoximas produjo un gran impulso a la tecnología de extracción por solventes del cobre, sin embargo, presentaron problemas en la etapa de reextracción debido a los elevados requerimientos de ácido.

Por otro lado, las cetoximas presentaron problemas debido a su baja capacidad de carga y su pobre desempeño a bajos niveles de pH, lo cual requería más etapas de operación para una mejor recuperación del cobre.

La adición de modificadores a las aldoximas mejoraron sus propiedades de reextracción no afectando su elevada capacidad de extracción, lo que incremento significativamente la capacidad de transferencia del reactivo, que dieron lugar al

desarrollo de nuevas formulaciones que contienen aldoximas y modificadores ó aldoximas con cetoximas débiles. En tabla 2.2 se presenta una tabla comparativa de principales propiedades de estos reactivos orgánicos.

Tabla 2.2 Tabla comparativa de propiedades extractantes comúnmente usados (P. Navarro, 2001. Extracción por Solventes de Cobre)

Propiedad	Aldoxima	Cetoxima	Mezcla
Capacidad de Extracción	Alta	Moderada	Ajustable a medida
Capacidad de Reextracción	Moderada	Alta	Ajustable a medida
Cinética de Extracción y Reextracción	Muy rápida	Rápida	Rápida
Selectividad Cu/Fe	Alta	Moderada	Excelente
Separación de fases	Buena	Buena	Muy buena
Estabilidad	Moderada	Buena	Muy buena
Generación de Crud	Moderada	Moderada	Baja

Su uso dependerá de las características del PLS y la potencialidad que presente la configuración de extracción por solventes frente a fluctuaciones de la concentración de cobre en PLS para mantener y/o incrementar la producción de cátodos.

Se puede observar el comportamiento de los extractantes, la aldoxima pura con un alto poder de extracción, pero con baja capacidad para reextracción, a continuación la aldoxima con modificador que presenta alta capacidad de carga y una moderada capacidad de reextracción y finalmente la cetoxima que se presenta con características de menor capacidad de carga frente a las aldoximas, pero con una alta capacidad de reextracción.

Dependiendo de las características del PLS y de la configuración deseada con mayor o menor flexibilidad se puede encontrar la mezcla apropiada para alcanzar un elevado desenvolvimiento físico y químico en planta SX.

En la tabla 2.3 se presentan las principales plantas de producción de cobre que utilizan el proceso de extracción por solventes y los respectivos extractantes usados (nombre comercial y sustancia activa).

Tabla 2.3 Principales compañías mineras productoras de cobre en Chile (2004)

Empresa	Extractante	Sustancia activa
Cerro Colorado	Lix860 NIC - Lix 84 IC	Aldoxima/Cetoxima
Codelco	M 5774	Aldoxima
Collahuasi	M 5640	Aldoxima
El Abra	Lix 984 NC	Aldoxima/Cetoxima
Lomas Baya	Lix 84 IC	Aldoxima
Mantos Blancos	M 5640	Aldoxima
Michilla	Lix 984 NC	Aldoxima/Cetoxima
Quebrada Blanca	Lix 984 N	Aldoxima/Cetoxima
El Tesoro	Lix 84 IC	Cetoxima
Zaldivar	Lix 984 NC	Aldoxima/Cetoxima

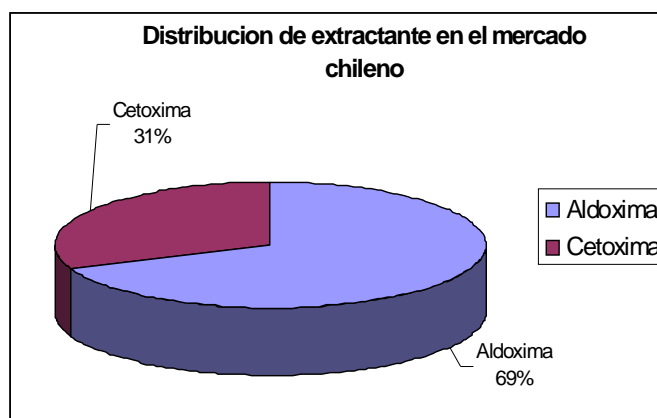


Figura 2.4 Distribución del extractante en el mercado (2004)

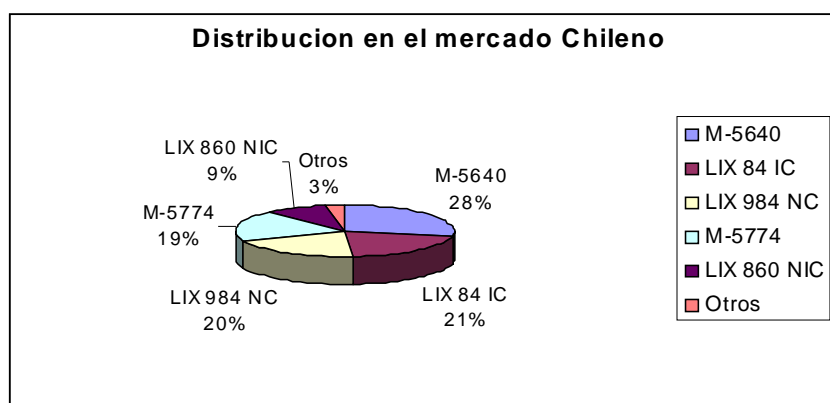


Figura 2.5 Preferencias de los extractantes en el mercado chileno (2004)

En las figuras 2.4 y 2.5 se muestran la distribución del uso de extractantes en el mercado chileno en términos de aldoximas y cetoximas. La distribución de los distintos reactivos comerciales se da en aproximadamente el 69% del mercado actual utiliza aldoximas mientras que el 31% restante cetoximas, esto no implica que no se utilicen mezclas dentro de sus procesos.

De la figura 2.5 se desprende que el extractante más usado es el M 5640 con un 28% de la preferencia, seguido del LIX 84 IC con un 21%, LIX 984 NC con un 20%, M 5774 con un 19% y el LIX 860 NIC con un 9%. Los otros reactivos son mucho menos usados a nivel industrial y representan el 3%.

2.3 Transferencia de materia en extracción por solventes

Dentro del proceso de extracción por solventes están involucrados diversos factores los cuales determina un mayor o menor arrastre de fases, las propiedades físicas tales como la densidad, viscosidad y tensión interfacial influyen de manera directa en el

proceso de mezclado y posterior separación de fases. Muchos autores han hecho mención muy superflua acerca de la influencia de las propiedades físicas en el proceso de mezclado y separación de fases, tal es así que se menciona como principal y más importante propiedad física a la diferencia de densidades entre ambas fases las cuales permiten una menor o mayor velocidad de coalescencia y así una mejor separación de fases.

Para tener un mejor entendimiento se van a detallar las propiedades físicas involucradas para así poder entender su importancia en el proceso.

2.3.1 Densidad

En ocasiones se usan otras características para definir el fluido en lugar de su densidad, aunque están directamente relacionadas con ella. Por ejemplo, la gravedad específica se define como la relación entre un cierto volumen de producto y el mismo volumen de agua destilada a 4°C.

En los Estados Unidos suele usarse la gravedad API. Esta es una escala arbitraria que expresa la gravedad o densidad del fluido (en este caso aceite) medida en grados API.

$$\text{Grados API} = \frac{141.5}{\text{densidad a } 60^{\circ}\text{F}} - 131.5 \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

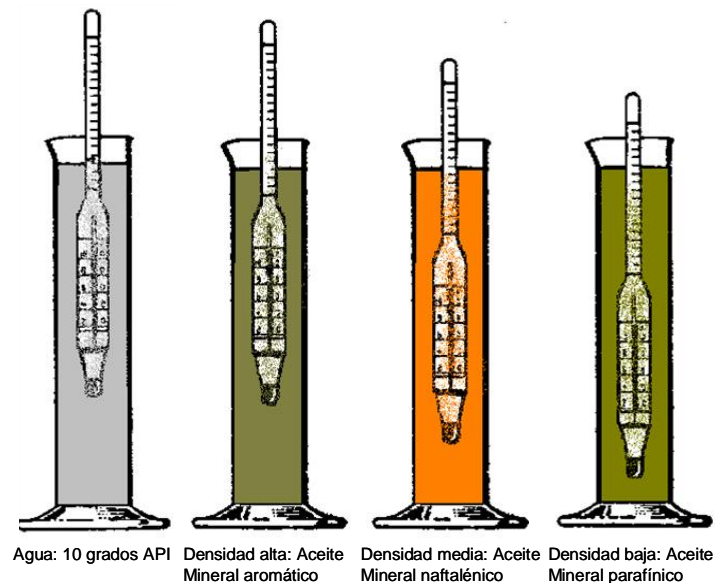


Figura 2.6 Medidas de la densidad según gravedad API

2.3.2 Viscosidad

Se define fluido como una sustancia que se deforma continuamente bajo la acción de un esfuerzo de corte, por tanto, en ausencia de este, no habrá deformación. Los fluidos pueden clasificarse de manera general de acuerdo con la relación entre el esfuerzo de corte aplicado y la relación de deformación. Consideremos un elemento de fluido entre dos placas paralelas infinitas. La placa superior se mueve a una velocidad constante, ∂u , bajo la influencia de una fuerza aplicada constante ∂F_x . El esfuerzo de corte τ_{xy} aplicado al elemento de fluido está dado por:

$$t_{yx} = \lim_{\partial A_y \rightarrow 0} \frac{\partial F_x}{\partial A_y} = \frac{\partial F_x}{\partial A_y} \dots\dots\dots (2.8)$$

Donde ∂A_y es el área del fluido en contacto con la placa. Durante el intervalo de tiempo ∂t el fluido se deforma de la posición MNOP a la posición M'NOP'. La relación de deformación del fluido está dada por:

Relación de deformación = $\lim_{\partial t \rightarrow 0} \frac{\partial a}{\partial t} = \frac{\partial a}{\partial t}$

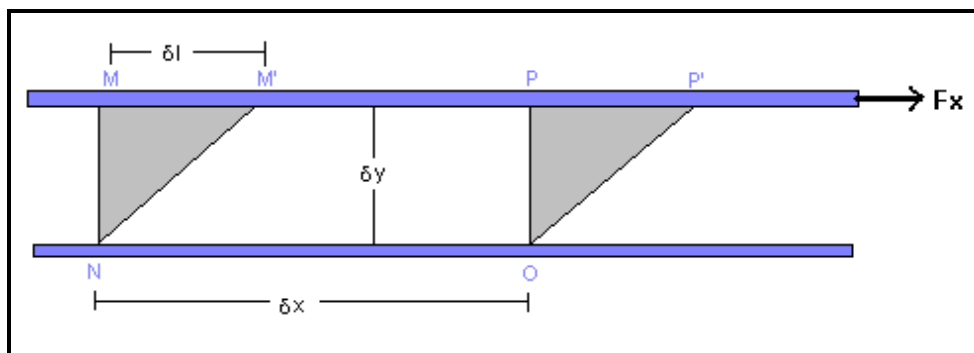


Figura 2.7 Proceso de deformación de un fluido

Para calcular el esfuerzo de corte τ_{xy} , es deseable expresar da/dt en términos de cantidades medibles fácilmente. Esto puede hacerse sin dificultades. La distancia dl entre los puntos M y M' es

$$\partial l = \partial u \times \partial t \dots\dots\dots (2.9)$$

O de manera alternativa para ángulos pequeños,

$$\partial l = \partial y \times \partial a \dots\dots\dots (2.10)$$

Igualando estas dos expresiones para dl obtenemos:

$$\frac{\partial a}{\partial t} = \frac{\partial u}{\partial y} \dots\dots\dots (2.11)$$

Por lo tanto el elemento de fluido de la figura cuando se somete a un esfuerzo de corte, experimenta una relación de deformación (relación de corte) dada por $\frac{\partial u}{\partial y}$. Los fluidos en que los esfuerzos de corte es directamente proporcional a la tasa de deformación son fluidos newtonianos. El término no newtoniano se utiliza para clasificar todos los fluidos en los cuales el esfuerzo de corte no es directamente proporcional a la relación de corte.

2.3.2.1 La viscosidad dinámica o absoluta

Se define matemáticamente como la relación entre el esfuerzo aplicado para mover una capa de aceite (tensión de corte) y el grado de desplazamiento conseguido. El concepto de viscosidad puede entenderse mejor con la siguiente figura en la cual se explica el desplazamiento de un fluido.

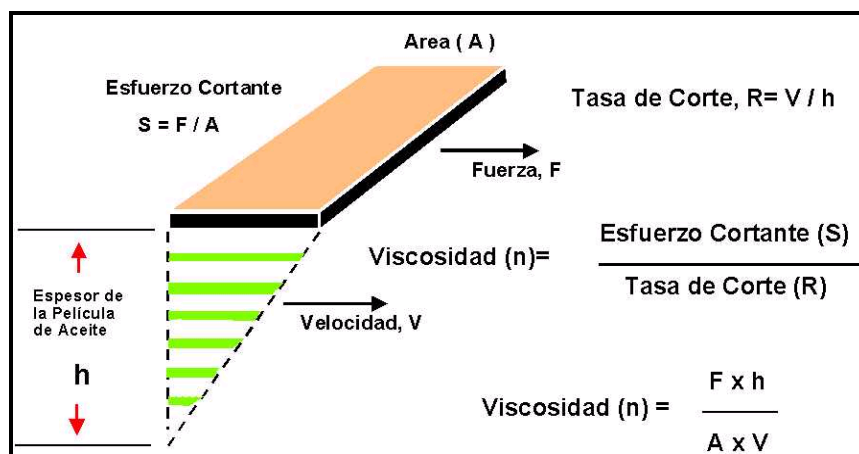


Figura 2.8 Diagrama Viscosidad como desplazamiento

La viscosidad es una medida de la resistencia que ofrece una capa de aceite a desplazarse sobre la capa adyacente. A mayor viscosidad mayor resistencia a fluir

(ej. la miel es más viscosa que el agua, pues posee más resistencia a fluir). La medida de la viscosidad es en Centistokes = mm^2/seg ó Centipoises=Centistokes/Densidad, según el sistema internacional, antiguamente se utilizaban los Segundos Saybolt Universales (SSU), sistema ahora descartado.

En la figura 2.9 puede observarse que n es el coeficiente de viscosidad absoluta y V/h es la tasa de corte o grado de desplazamiento. Por tanto la viscosidad absoluta queda definida como:

$$\text{Viscosidad absoluta } (n) = (F/A) / (V/h) \dots\dots\dots (2.12)$$

Podemos ver así que la viscosidad de un fluido se puede determinar conociendo la fuerza necesaria para vencer la resistencia del fluido en una capa de dimensiones conocidas.

2.3.2.2 La viscosidad cinemática o comercial

Se define como la resistencia a fluir de un fluido bajo la acción de la gravedad. En el interior de un fluido, dentro de un recipiente, la presión hidrostática (debido al peso del fluido) está en función de la densidad.

Por otra parte, el tiempo que tarda en fluir un volumen dado de fluido es proporcional a su viscosidad dinámica. Podemos expresar la viscosidad cinemática como:

$$\text{Viscosidad cinemática} = \mu/d \dots \dots \dots (2.13)$$

Donde μ es el coeficiente de viscosidad dinámica y d es la densidad, todo ello medido a la misma temperatura. Por lo mencionado anteriormente, la viscosidad cinemática puede definirse como el tiempo requerido por un volumen dado en fluir a través de un tubo capilar por acción de la gravedad.

2.3.2.3 Variación de la viscosidad con la temperatura.

Existen varias formulas que nos permiten evaluar la variación de la viscosidad del aceite al cambiar la temperatura. Las más importantes son:

Tabla 2.4 Formulas para la viscosidad en función a la temperatura

Autor	Formula	Observaciones
Poiseuille (1840)	$\mu = \frac{\mu_o}{1 + \alpha T + \beta T^2}$	μ_o = Viscosidad dinámica a 0°C. α y β = Coeficientes constantes
Andrade (1930)	$\mu = Ae^{\frac{B}{T}}$	A, B = Constantes T = Temperatura (K)
Barr	$[\log(\nu + 0.8)]^{0.3} = A + \frac{B}{T}$	ν = Viscosidad cinemática mm ² /s.
ASTM	$\log(\log Z) = A - B \log T$ $Z = \nu + 0.7 + C - D + E - F + G - H$	T = Temperatura (K) C..H= Funciones de ν (*)

(*) El cálculo de las funciones C, D, E, F, G y H son las siguientes

Función	Formula
C	$\exp(-1.14883 - 2.65868\nu)$
D	$\exp(-0.0038308 - 12.5645\nu)$
E	$\exp(4.56491 - 37.6289\nu)$
F	$\exp(13.0458 - 74.685\nu)$
G	$\exp(37.4619 - 192.643\nu)$
H	$\exp(80.4945 - 400.468\nu)$

Para calcular la viscosidad a una temperatura dada, se puede utilizar la expresión más simple:

$$Z = \nu + 0.7 + \exp(-1.47 - 1.84\nu - 0.51\nu^2) \dots\dots\dots (2.14)$$

$$\nu = (Z - 0.7) - \exp[-0.4787 - 3.295(Z - 0.7) + 0.6119(Z - 0.7)^2 - 0.3193(Z - 0.7)^3] \quad (2.15)$$

2.3.2.4 Variación de la viscosidad con la temperatura y la presión.

De las numerosas ecuaciones utilizadas para determinar la viscosidad en función de la temperatura y la presión proponemos la de Barrs:

$$\mu = \mu_o \exp[AP - B(T - T_o)] \dots\dots\dots (2.16)$$

Que es una combinación de las ecuaciones de Reynolds para la variación de la viscosidad con la temperatura, y la de Barrs para el efecto de la presión. En esta expresión, μ_o es la viscosidad a la temperatura T_o y presión atmosférica, $A = 1/430$ y $B = 1/36$.

2.3.3 Tensión interfacial

Se llama tensión interfacial a la energía libre existente en la zona de contacto de dos líquidos inmiscibles. Esta energía es consecuencia de las tensiones superficiales de los dos líquidos, y evita que estos emulsionen espontáneamente.

Las unidades de medida de la tensión interfacial son las mismas que las usadas en la tensión superficial. El valor de la tensión interfacial del aceite es indicativo de varias características del aceite:

- Es una medida de la inmiscibilidad del aceite: Cuando dos líquidos inmiscibles están en contacto, las moléculas en el interior del líquido se atraen unas a otras en todas direcciones. Sin embargo, en la zona de contacto de los líquidos las moléculas de cada líquido están en contacto con las del otro y experimentan fuerzas distintas, unas debidas a las moléculas de su fase y otras debidas a las moléculas de la otra fase. Al formarse la emulsión, el área de contacto entre los líquidos se incrementa notablemente, incrementándose la tensión interfacial. En consecuencia, la tensión interfacial tenderá a unir las gotas y reducir el área de contacto. Cuanto más alto sea el valor de la tensión interfacial del aceite, más difícil será romper la interfase y formar la emulsión, y, una vez conseguido, lograr que la emulsión sea estable será igualmente difícil.
- Debido a que la acumulación de contaminantes y productos de la degradación del aceite hacen bajar el valor de la tensión interfacial, este valor, comparado con el del aceite nuevo, nos da una indicación del grado de envejecimiento del aceite, de

su nivel de oxidación, y /o de la presencia de impurezas. En el aceite nuevo y sin aditivos, la tensión interfacial tiene un valor de entre 40 y 45 dinas/cm, que con el uso de aditivos puede bajar a 25-30 dinas/cm.

- El valor de la tensión interfacial en un aceite nuevo, comparado con otros, es un indicativo del grado de refinado. Una tensión interfacial alta en un aceite nuevo indica la ausencia de compuestos polares orgánicos (aromáticos) en el aceite. (Estos compuestos han sido eliminados durante el refinado del aceite).

Al ser la tensión interfacial consecuencia directa de la tensión superficial, la tensión interfacial se ve afectada por los mismos factores que la tensión superficial.

La tensión interfacial (al igual que la superficial) puede reducirse con el uso de aditivos emulsificantes. Estas sustancias se acumulan en la zona de contacto de las dos fases de la emulsión, reduciendo la tensión interfacial. Las siliconas, por ejemplo, se utilizan en los aceites minerales para reducir la tensión superficial y facilitar la formación de emulsiones.

Vamos a determinar de forma cualitativa, la resultante de las fuerzas de interacción sobre una molécula que se encuentra en:

- A, interior del líquido
- B, en las proximidades de la superficie
- C, en la superficie

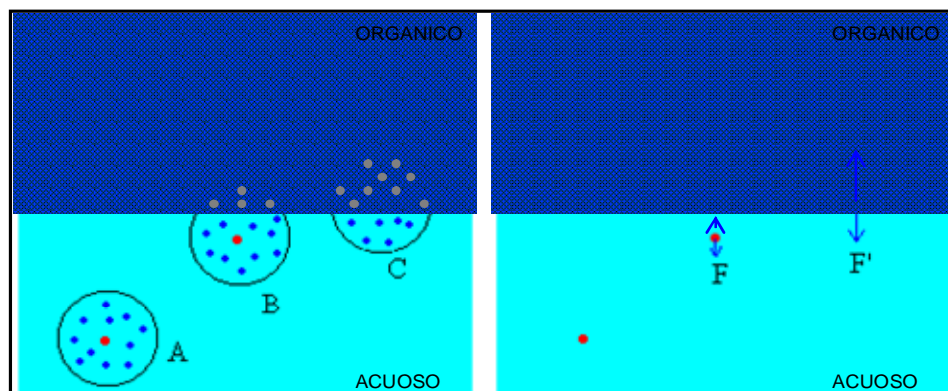


Figura 2.9 Acción de fuerzas en las moléculas en un sistema acuoso-orgánico

Consideremos una molécula (en color rojo) en el seno de un líquido en equilibrio, alejada de la superficie libre tal como la A. Por simetría, la resultante de todas las fuerzas atractivas procedentes de las moléculas (en color azul) que la rodean, será nula. En cambio, si la molécula se encuentra en B, por existir en valor promedio menos moléculas arriba que abajo, la molécula en cuestión estará sometida a una fuerza resultante dirigida hacia el interior del líquido. Si la molécula se encuentra en C, la resultante de las fuerzas de interacción es mucho mayor que en el caso B. Las fuerzas de interacción, hacen que las moléculas situadas en las proximidades de la superficie libre de un fluido experimenten una fuerza dirigida hacia el interior del líquido.

2.3.3.1 Definición termodinámica de la tensión interfacial

Cuando se ponen en contacto dos líquidos inmiscibles el sistema considerado estará formado por las dos fases líquidas y la interfase de contacto entre ellas. Las moléculas de la interfase entre dos líquidos estarán sometidas a fuerzas de

magnitudes diferentes a las que están sometidas las moléculas del seno de cada uno de los líquidos (Figura 2.10).

Además se tendrán también interacciones de tipo Van der Waals con las moléculas del otro líquido en la interfase, lo que conducirá a que la tensión a la interfase (tensión interfacial) tenga un valor intermedio entre las tensiones superficiales de los dos líquidos condensados.

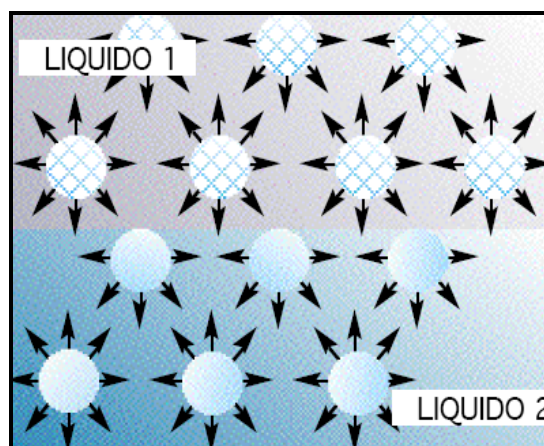


Figura 2.10 Diagrama interfase entre dos líquidos (liquido 1, liquido 2 e interfase).

Ya que la tendencia natural, de los líquidos, es reducir su superficie, cualquier intento de aumentar ésta, requiere de la realización de un trabajo.

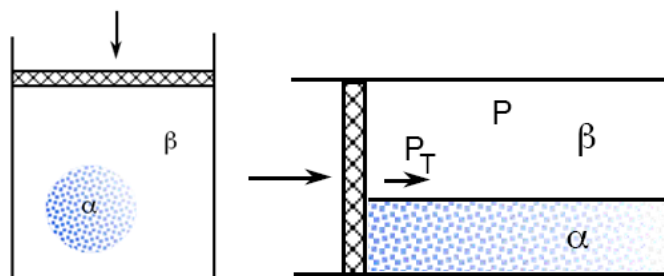


Figura 2.11 Diagrama sistema difásico.

Supongamos que se extiende la película de líquido contenida en un bastidor de alambre rectangular (véase figura 2.12). Si se aplica una fuerza F (que actuará en sentido contrario y estará balanceada por la fuerza de tensión superficial), al lado móvil del bastidor, para desplazar la película una distancia ∂x , el trabajo (W) realizado estará dado por $\partial W = F \partial x$, pero $F = 2 \gamma$; ya que la película posee dos superficies, entonces: $dW = 2 \gamma \partial x$, siendo $2 \partial x$ el incremento de área generado ∂A , y por lo tanto $\partial W = \gamma \partial A$.

Según lo mostrado anteriormente, el trabajo necesario para modificar el área está dado por $\gamma \partial A$. Si además de este trabajo se toma en consideración el asociado a cualquier cambio de volumen ó $-P \partial V$, donde P es la presión en cada fase y V el volumen total del sistema, el trabajo total realizado en el sistema cerrado es:

$$\partial F = -P \partial V + \gamma \partial A \dots\dots\dots (2.17)$$

Ya que para aumentar el área se requiere un trabajo positivo, la tensión tiene un valor positivo. Para un sistema multicomponente, el potencial químico de cada componente debe ser igual en cada fase y en la interfase. La variación de la energía del sistema está dada por:

$$\partial G = -S \partial T + V \partial P + \gamma \partial A + \sum \mu \partial n \dots\dots\dots (2.18)$$

↙ ↘

Cambio de energía libre Gibbs

↑

Energía necesaria para modificar el área de contacto

↑

Potencial químico de componentes de cada fase

En la que $\gamma_i \partial A$ es el trabajo reversible a P y T constante asociado con la variación del área. Todas las relaciones termodinámicas clásicas se escriben con el término adicional concerniendo la superficie.

$$\partial U = T\partial S - P\partial V + \gamma_i \partial A + \sum \mu \partial n \dots\dots\dots (2.19)$$

$$\partial H = T\partial S + V\partial P + \gamma_i \partial A + \sum \mu \partial n \dots\dots\dots (2.20)$$

$$\partial F = -S\partial T - P\partial V + \gamma_i \partial A + \sum \mu \partial n \dots\dots\dots (2.21)$$

En donde S es la entropía, P la presión, A es el área de contacto en la interfase, μ el potencial químico y n el número de moles por unidad de área de interfase.

Para un mejor entendimiento se usara de base el aceite y el agua. Si el agua es colocada en contacto con aceite la interfaz entre los 2 líquidos tiene una superficie con una tendencia a contraerse. Esto es representado como tensión interfacial (γ_i) y es expresado en dinas/cm y/o N/m, similar a la tensión superficial (γ_o). Este término es incluido en la ecuación antes indicada:

$$\partial F = -S\partial T - P\partial V + \gamma_i \partial A + \sum \mu \partial n \dots\dots\dots (2.22)$$

Para el total de la energía de todo el sistema. Para el butanol versus agua γ_i es solo 1.8 dinas/cm. Esto muestra que las moléculas del butanol ($\gamma_o=24$) debe concentrarse en la interfaz agua-aceite, donde la repulsión entre las moléculas empaçadas y orientadas es como se aprecia en la figura 2.12, compensando de algún modo la tendencia usual de contracción de una interfase.

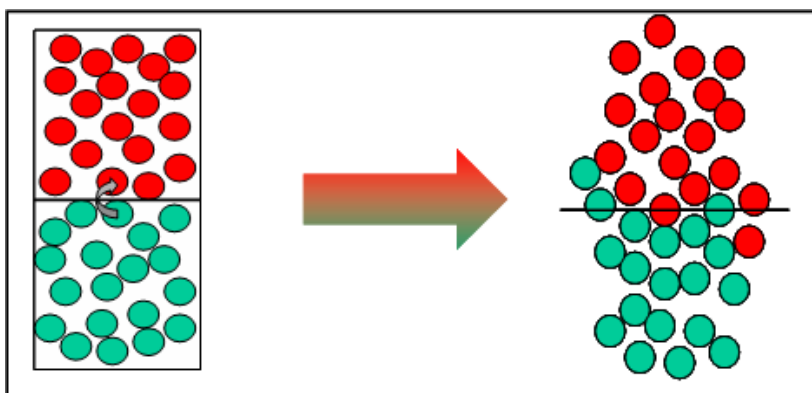


Figura 2.12 Empacamiento de las moléculas en la interfase agua (color verde) – aceite (color rojo)

El empacamiento interfacial ocurre porque las cabezas hidroxilo de las moléculas del butanol (círculos rojos) pueden escapar desde el aceite dentro del agua (círculos verdes), mientras que las cadenas permanecen en el aceite, este proceso resulta en un estado de baja energía libre estándar.

2.3.3.2 Efecto de la temperatura sobre la tensión interfacial

Cuando dos líquidos son completamente inmiscibles, las propiedades y estructura de la interfase entre ambos han sido clarificadas por mediciones de la dependencia de la tensión interfacial sobre la temperatura.

En el caso de la fase acuosa, cuanto mayor es la temperatura la tensión superficial tiende a disminuir, básicamente, si el agua llega a estar más caliente, es más difícil para las moléculas de agua mantenerse juntas. Para la fase orgánica, viene a estar

asociada también a la viscosidad, por lo que a mayores temperaturas y su menor viscosidad la tensión superficial tiende a ser menor.

Con la mezcla de los dos líquidos, se debe tener presente la interacción entre ambos y la influencia de la viscosidad y temperatura en los valores. Es por ello que habiendo sido desarrollados muchos métodos los cuales permiten la medición exacta de la tensión interfacial ya sea a nivel macroscópico y/o microscópico se estudio el efecto de la temperatura en la tensión interfacial como se observa a continuación en la figura 2.12 en la cual se aprecia la medición de los valores de tensión interfacial para gotas suspendidas de octano en una fase acuosa saturada. Como resultado se puede observar que dentro del sistema Agua - Octano – CnE4 los valores variaron desde 1 a 10^{-4} mN/m y esto dependiendo de la temperatura en el sistema y la longitud de la cadena hidrocarbonada. Los valores mínimos de la tensión interfacial coinciden con la temperatura de inversión de fases, que en ambas naturalezas hidrofílicas y olofílicas están en equilibrio.

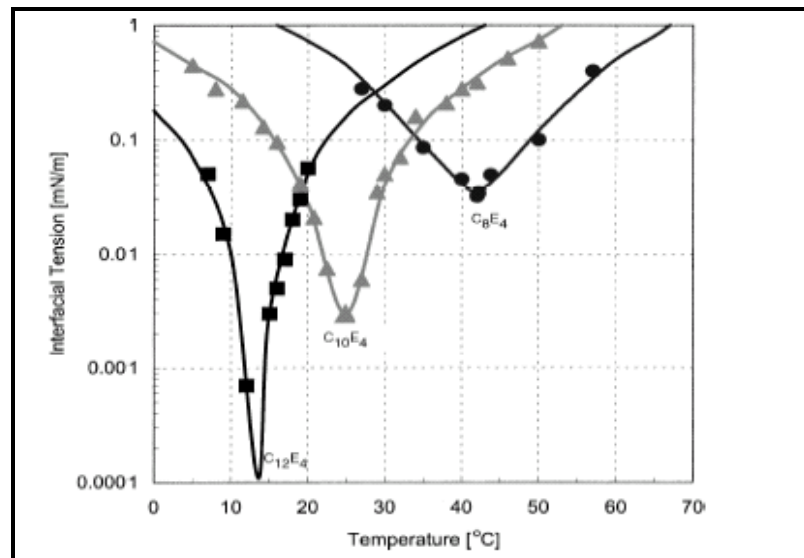


Figura 2.13 Efecto de la temperatura sobre la tensión interfacial en un medio octano-acuoso

CAPÍTULO III

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.1 Procedimiento experimental

En el presente estudio se trabajo con reactivos de extracción por solventes para el cobre procedente de Cognis en el caso del lix 984N y Shell Chemicals para el caso del shellsol 2046 AR, que serán utilizados durante toda la parte experimental.

De acuerdo a lo mencionado en el capitulo anterior, se puede deducir que el modelamiento a partir de las propiedades físicas es posible teniendo como premisa el mantener las mismas condiciones de trabajo en todas las pruebas realizadas, en especial la continuidad que es esencial para la obtención de resultados.

Fue demostrado a partir de los trabajos de investigación antes mencionados, la correlación entre las propiedades físicas y el proceso de separación de fases propuesto por Golob y Modic, es la que más se ajusta a nuestro esquema debido a que se va a trabajar bajo una continuidad orgánica. Así mismo, Jeelani y Hartland utilizaron el modelo propuesto y desarrollado por Nadiv y Semiat, el cual por su

versatilidad permite el modelamiento a partir de los datos obtenidos en el desenvolvimiento del proceso de separación de fases.

A partir de lo mencionado líneas arriba es que el esquema experimental fue diseñado a fin de poder corroborar y analizar si nuestros resultados nos permiten poder determinar una correlación a nivel laboratorio entre nuestros resultados y lo propuesto por estos autores.

3.2 Descripción de los reactivos utilizados

3.2.1 Fase acuosa

Las fases acuosas para las pruebas de extracción de cobre, se prepararon analíticamente a partir de sulfato de cobre pentahidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{SO}_4$) Q.P. (químicamente puro), disuelto en agua bidestilada, el ajuste de pH inicial se realizó mediante la adición de gotas de ácido sulfúrico (H_2SO_4) de aproximadamente 98% grado PA. Las concentraciones deseadas de Cu^{+2} , se lograron pesando las cantidades correspondientes en cada concentración.

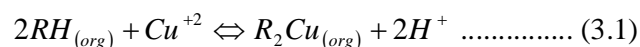
3.2.2 Fase orgánica.

En la preparación de las fases orgánicas se utilizó el extractante lix 984N y el diluyente Shellsol 2046 AR. Las concentraciones en volumen de extractante deseadas en la fase orgánica se realizaron diluyendo un volumen determinado de extractante en un determinado volumen de diluyente. No se hizo uso de ningún tipo de modificador para la preparación de éstas fases.

3.3 Caracterización de los reactivos utilizados

3.3.1 Reactivo Lix 984N.

El extractante lix 984N, suministrado por Cognis, es un reactivo que se usa para extracción por solventes en la industria minera. En su composición posee una mezcla del lix 986N-I y el Lix 84-I en proporción 1:1 teniendo como especies activas al 5-nonilsalicilaldoxima y el 2-hidroxi-5-nonilacetofenona oxima, teniendo como diluyente un hidrocarburo de alto punto de fusión el cual forma complejos solubles con cationes metálicos, de acuerdo a la siguiente reacción estequiométrica:



Las propiedades típicas de este reactivo se entregan en la tabla 3.1

Tabla 3.1 Principales propiedades Extractante Lix 984N (Andrés Reghezza, 1987. Teoría y práctica de Extracción por Solventes)

<u>Propiedades físicas</u>		<u>Especificaciones técnicas</u>	
Apariencia física	Líquido color ámbar	Máxima carga Cobre	> 5.1 g/ Cu
Gravedad específica	0.89 – 0.91 (25°C)	Pto Isoterma extracción	> 4.4 g/l Cu
Flash Point	> 71.11 °C	Cinética extracción	> 95% (30 seg)
Solubilidad complejo	> 30 g/l Cu	Selectividad Cu/Fe	> 2000
		Separación fases	< 70 seg

3.3.2 Diluyente Shellsol 2046 AR.

El diluyente shellsol 2046 AR, suministrado por Shell Chemicals, a través de la organización de Shell Chile S.A.C, ha sido utilizado en los procesos de extracción de

cobre y otros minerales por más de 30 años. En la actualidad este compuesto orgánico es un producto derivado del proceso de refinación del petróleo (mezcla de aromáticos y parafinas), con baja tasa de evaporación y alto punto de inflamación, posee una tasa de evaporación significativamente menor a la observada en otros diluyentes utilizados en procesos de extracción por solventes en la minería del cobre. Esta importante propiedad le confiere grandes ventajas económicas al minimizar la tasa de reposición del diluyente en el proceso de extracción por su mayor punto de inflamación (84°C), es clasificado como producto no inflamable. El shellsol 2046 AR tiene excelentes propiedades en separación de fases, cinética de extracción y de re-extracción, este diluyente asegura un tiempo de separación de fases de entre 35 y 60 segundos (según tipo de continuidad) y una cinética de extracción superior al 95%. Posee características químicas y metalúrgicas tales que le permiten ser compatible con los diluyentes más comunes actualmente usados.

Tabla 3.2 Propiedades típicas diluyente Shellsol 2046 AR (Andrés Reghezza, 1987.

Teoría y práctica de Extracción por Solventes)

PROPIEDADES	TEST METODO	UNIDAD	VALOR TÍPICO
Rango Destilación	ASTM D86	°C	210
FBP			260
Flash point (PMCC)	ASTM D93	°C	89 – 92
Punto Anilina	ASTM D611	°C	58 – 69
Color Saybolt	ASTM D156		15- 20
Densidad a 15 °C	ASTM D4052/D1298	g/cc	0.805 - 0.820
Viscosidad Cinemática	ADTM D445	mm ² /s	1.75
Tensión Superficial 25° C	ASTM D1331-56	dinas/cm	29.8
Tensión Interfacial 25° C	ASTM D1331-56	dinas/cm	47.7
Aromáticos	FIA/ D1319	% m	15 (+/- 3)
TSF Extracción C.O.	Met. Shell	Seg.	< 60

3.4 Metodología experimental.

En todas las pruebas experimentales de extracción por solventes, se utilizó un reactor de vidrio donde la fase orgánica y acuosa fueron mezcladas y se trabajó con una velocidad de agitación de aproximadamente 500 RPM con un tiempo de contacto de fases de 5 minutos; se midió el tiempo de separación de fases para cada experiencia.

El procedimiento experimental para la medición de viscosidad, tensión interfacial y densidad para todas las experiencias fue el mismo variando solamente las condiciones particulares de cada una de las experiencias. En el caso de la medición de arrastres A/O se procedió a tomar muestras en cada etapa del carguío del extractante con cobre, en total se procedieron a realizar 3 contactos por lo que se obtuvieron 3 muestras las cuales fueron analizadas por el método de turbidimetría para el cálculo de arrastres.



Figura 3.1 Reactor de vidrio utilizado en las pruebas

3.4.1 Medición de densidad.

La medición de densidad se realizó utilizando un densímetro aerómetro GAMMA (Figura 3.2).

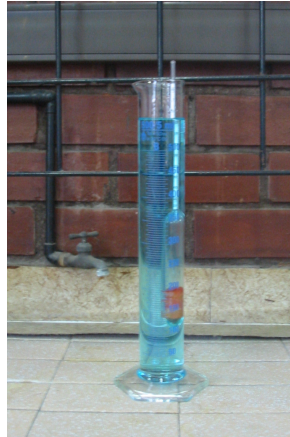


Figura 3.2 Densímetro GAMMA

La solución a medir se introduce en una probeta graduada, la que es mantenida en un baño termostático a la temperatura deseada por un tiempo de 10 minutos. Luego, se introduce el densímetro en la solución, se obtiene el valor de densidad directamente del instrumento. La medición se realizó 5 veces y se obtuvo un promedio, como valor final.

3.4.2 Medición de viscosidad.

Se realizó con un viscosímetro KPG CANNON FENSKE como puede ser observado en la figura 3.3.

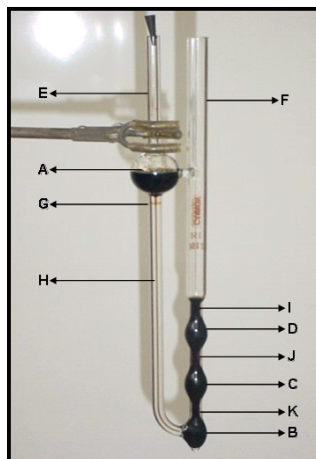


Figura 3.3 Viscosímetro KPG Cannon Fenske

La solución se introduce en el viscosímetro aplicando succión, para posteriormente colocar el viscosímetro en un soporte y se introduce en un baño termostático a la temperatura deseada, por un tiempo determinado para cada temperatura de trabajo, antes de realizar la medición. Para realizar la medida se deja pasar flujo de la muestra capilarmente al tubo H y se llena aproximadamente a la mitad el bulbo B, se para el menisco en el bulbo B colocando un tapón de goma en el tubo E. Luego se remueve el tapón de goma y se deja que el menisco viaje ascendente en el bulbo C y D; se mide el tiempo usando dos cronómetros el tiempo que tarda el menisco en pasar desde la marca K a la J, y desde la J a la I. Se calcula la viscosidad cinemática de la muestra multiplicando el tiempo en segundos por cada bulbo en función de la constante de viscosidad para cada uno.

3.4.3 Medición de la tensión interfacial

Se realizó con un tensiómetro marca Krüss modelo K-6 como se muestra en la figura 3.4.

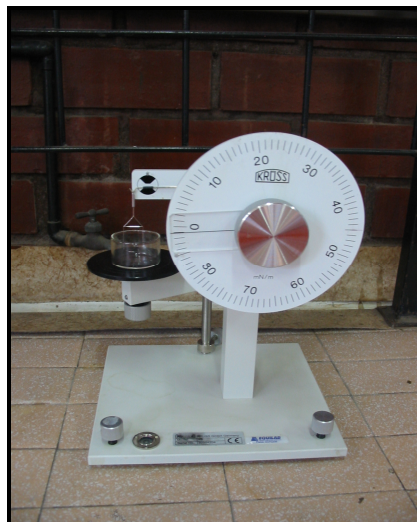


Figura 3.4 Tensiómetro K-6 Krauss

Las soluciones a utilizar primero son llevadas a la temperatura deseada, para posteriormente tomar aproximadamente entre 8 a 10 ml de ambas fases las cuales son colocadas en una vasija de vidrio de acuerdo al siguiente procedimiento:

- Introducir el anillo de Du Nouy hasta llegar a 5 mm de la superficie de la vasija de vidrio.



Figura 3.5 Colocación del anillo dentro de la vasija

- Adicionar la solución más densa primero, esto para evitar generar contacto entre ambas fases.

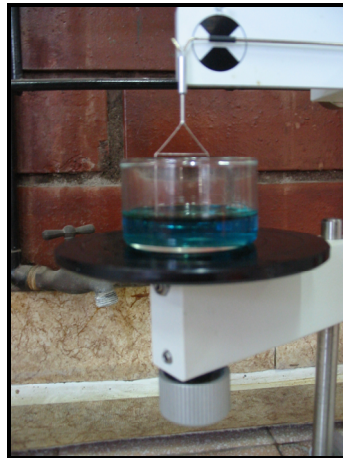


Figura 3.6 Adición de la fase más densa

- Luego, adicionar la solución menos densa sobre la superficie del líquido más denso para evidenciar tranquilamente la interfase liquido-liquido.

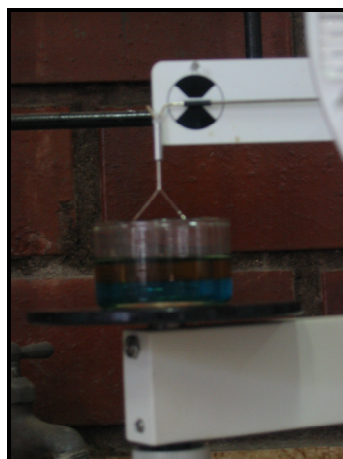


Figura 3.7 Adición de la fase menos densa – visualización de la interfase

- Luego, colocar el anillo de Du Nouy a 5 mm de la interfase liquido-liquido antes de iniciar la medición de la tensión interfacial.
- Luego se gira la perilla procurando mantener en todo momento un movimiento uniforme a fin de mantener una misma condición de fuerza durante la medición.

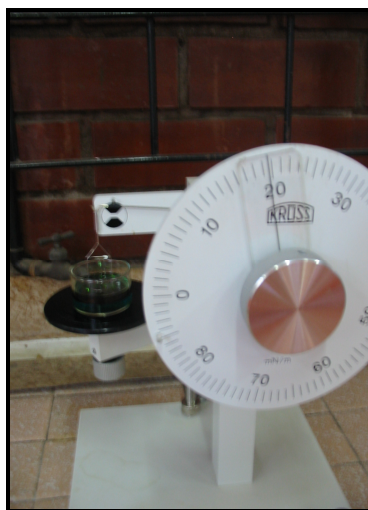


Figura 3.8 Medición de la tensión interfacial

- Una vez obtenido el valor se procede a la lectura del mismo y al retiro de la muestra del equipo.

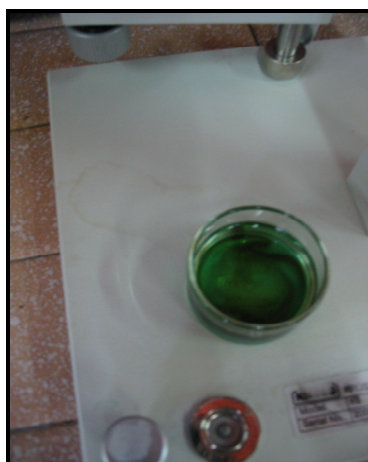


Figura 3.9 Retiro de la muestra del equipo

3.4.4 Medición de arrastres A/O

La determinación de los arrastres de la solución acuosa en solución orgánica está definida por la posición del agitador en el reactor.

Según Nadiv y Semiat la ubicación del agitador genera diferentes tipos de comportamientos de las soluciones en contacto, por ello se realizó la prueba en tres ubicaciones distintas; dentro de la solución orgánica, dentro de la solución acuosa y por ultimo en la interfase entre ambas soluciones.

Los resultados obtenidos muestran que al tener el agitador en la solución orgánica el tiempo de separación fue más largo, lo que representa una separación simple, donde la mayoría de la dispersión se comportó como orgánico dentro del acuoso. Para efectos del estudio de la primera etapa de extracción se requiere que la fase orgánica sea la continua y la fase acuosa sea la dispersa, por lo que según los estudios anteriores se procedió a trabajar con el agitador dentro de fase acuosa.

Para la medición de arrastres de solución acuosa en medio orgánico se aplicó el método de determinación de sulfatos, la cual nos daría una idea clara de la cantidad de arrastres en la fase orgánica. Para ello se utilizara el método turbidimétrico que nos permite medir la cantidad de sulfatos en solución presente.

3.4.4.1 Método turbidimétrico

La determinación cuantitativa del volumen arrastrado de acuoso en orgánico cargado o descargado a través de un método indirecto de precipitación con BaCl_2 y posterior medición por transmitancia a fin de medir la turbidez y obtener un valor aproximado. El procedimiento experimental se detalla a continuación para la medición de arrastres por el método indirecto.

Tomar una muestra de 100 ml de orgánico en el embudo de decantación y contactar con un 50 ml de agua desmineralizada acidulada a pH 2 durante 5 minutos, dejar separar las fases y colectar la fase acuosa.

Tomar los 50 ml de la fase acuosa colectada y agregue 100 ml de agua destilada. Proceda a ajustar pH con ácido clorhídrico concentrado en presencia de 3 gotas de anaranjado de metilo hasta captar un viraje de coloración de incoloro a anaranjado.

Calentar la solución hasta punto de ebullición y agregar lentamente 20 ml de BaCl_2 al 10% por las paredes del vaso, si la precipitación persiste continúe con la adición de este. Dejar disgregado la solución en caliente por 30 minutos sin ebullición.

Una vez obtenida toda la precipitación del BaSO_4 se a adicionar glicerina a fin de mantener en suspensión las partículas y poder medir a través de la turbidez el contenido de sulfatos en el orgánico.

La medición se realiza por intermedio de la transmitancia a fin de calibrar el equipo con muestras patrón y generar una recta la cual permite posteriormente poder determinar el contenido de sulfatos en función a la transmitancia.

A continuación se muestra una curva calibrada para medir turbidez por medio de la relación lineal entre el % transmitancia vs. mg/l sulfato.

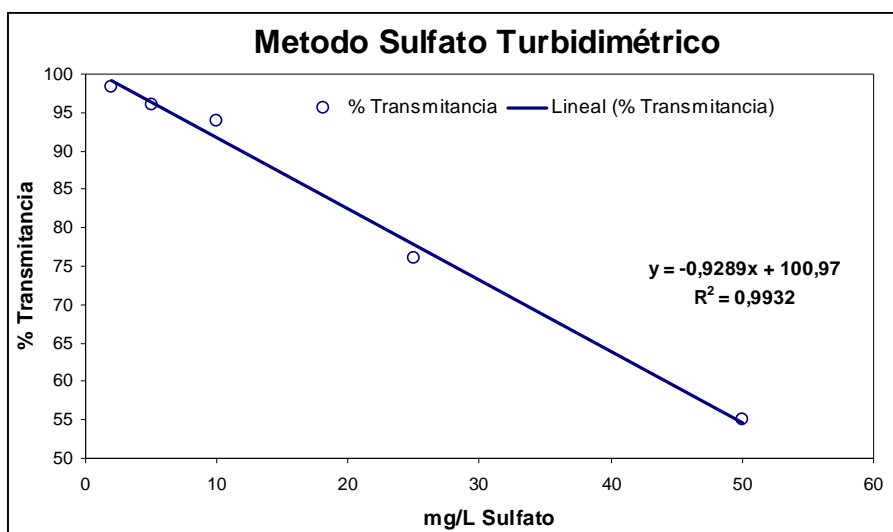


Figura 3.10 Relación entre sulfatos y % transmitancia

3.5 Equipos y materiales utilizados

- Reactores de vidrio de 100 y 1000 ml con respectiva llave de evacuación en la parte inferior con agitadores con motor y selector de velocidad marca Heidolp, modelo RZR1.



- Baño termostático BOEKEL, modelo 148002.



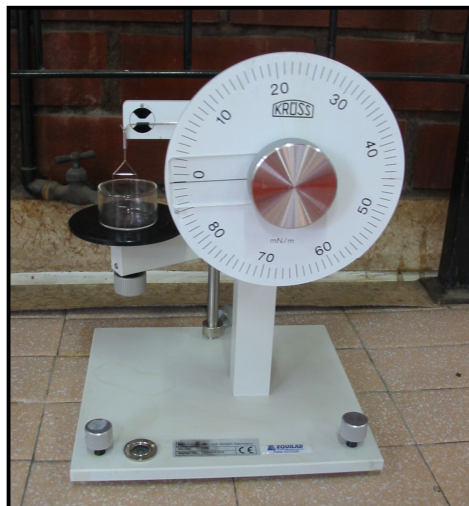
- Termómetro.
- pH-metro marca Hanna, modelo 8417, con electrodo de cloruro de Potasio marca Sensorex, modelo 120 C.
- Densímetro marca Gamma.



- Material de vidrio: matraces, vasos precipitados de distintos volúmenes, pipetas, probetas graduadas, vidrio reloj, picetas.
- Viscosímetro marca Cannon- Fenske.



- Tensiómetro Kruss modelo K-6



– Vista Laboratorio Hidrometalurgia – USACH



CAPÍTULO IV

DISCUSIÓN Y RESULTADOS

4.1 Estudios preliminares

4.1.1 Caracterización de las propiedades físicas de las soluciones acuosa y orgánica

4.1.1.1 Diluyente y extractante puro

En la figura 4.1, se presentan los resultados obtenidos de densidad y en la figura 3.2 lo obtenido en viscosidad correspondientes al diluyente shellsol 2046 AR y al extractante lix 984N puros, a diferentes temperaturas.

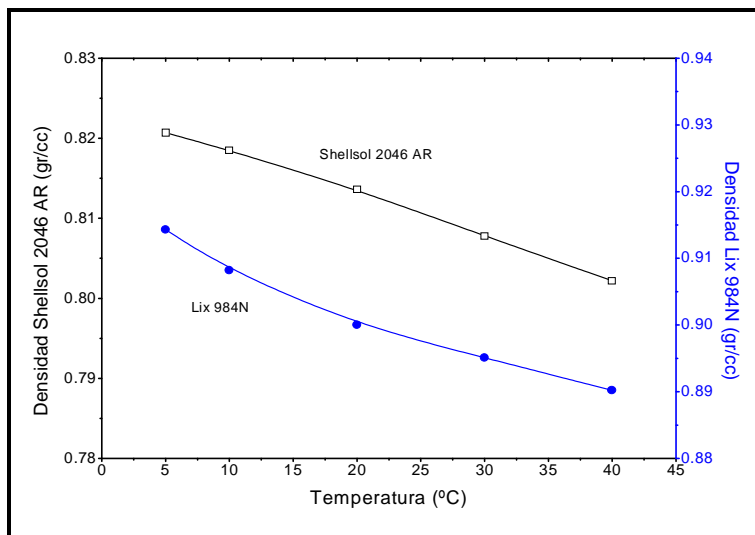


Figura 4.1 Densidad del extractante Lix 984N y diluyente Shellsol 2046 AR

Como se muestra en la figura 4.1, la variación de la densidad del diluyente shellsol 2046 AR, en función de la temperatura resulta casi lineal con una variación en el en el rango de estudio entre 5°C y 40°C de (poner aquí la pendiente de la recta con su correspondientes unidades), disminuye muy levemente con el aumento de la temperatura mostrando una tendencia lineal dentro del rango de estudio; por ejemplo, a 5°C la densidad obtenida es de 0,82 g/cc, al aumentar la temperatura a 40°C la densidad obtenida fue de 0.803 gr/cc.

También se puede apreciar en la figura con respecto a la variación de la densidad del extractante Lix 984N, en función de la temperatura. Se observa en forma general que la densidad, en el rango de estudio entre 5°C y 40°C, disminuye muy levemente con el aumento de la temperatura mostrando una tendencia lineal con una pendiente más pronunciada que en relación al obtenido para el diluyente; por ejemplo, a 5°C la

densidad obtenida es de 0.915 g/cc, al aumentar la temperatura a 40°C la densidad obtenida fue de 0.890 gr/cc.

Se aprecia claramente, que la densidad del diluyente es menor que la del extractante, esta es una de las principales razones por la cual el extractante no se usan en forma pura sino en mezclas que permitan una densidad apropiada para el sistema.

Cabe mencionar que el diluyente es usado junto al reactivo orgánico, y en algunas ocasiones conjuntamente a un modificador para mejorar la separación de fases. De mezclarse con el reactivo facilitara el contacto entre las fases, puede condicionar los tiempos de retención para extracción y reextracción y, por lo tanto, la cantidad de extractante necesario.

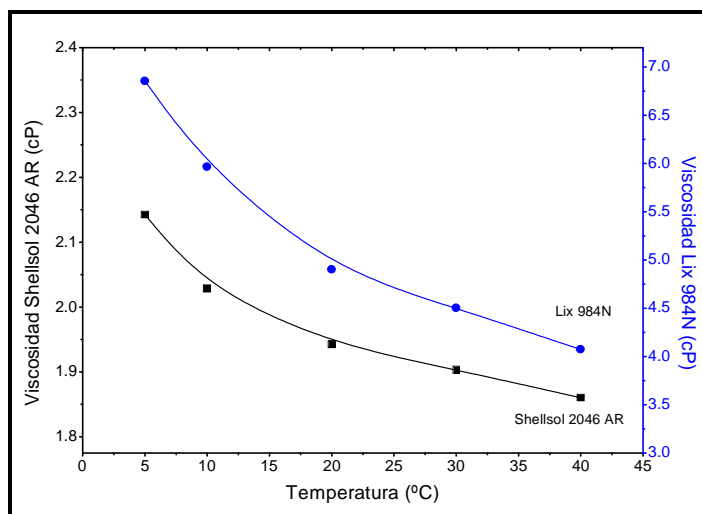


Figura 4.2 Viscosidad extractante Lix 984N y diluyente Shellsol 2046 AR

En la figura 4.2 se aprecia la viscosidad en función de la temperatura para el diluyente Shellsol 2046 AR; por ejemplo, a la temperatura de 5°C la viscosidad es de 2.15 cp; en cambio, para 40°C la viscosidad disminuye notoriamente a 1.87 cP.

También se puede apreciar la viscosidad en función de la temperatura para el extractante Lix 984N en forma pura, claramente se aprecia como la temperatura afecta la viscosidad del extractante en mayor proporción que en relación al obtenido con el diluyente; a temperaturas bajas en este caso de 5°C la viscosidad alcanzada es de 6.55 cP; a diferencia de lo que ocurre a altas temperaturas donde la viscosidad a 40°C disminuye a 4.0 cP.

Como puede verse, la temperatura afecta notoriamente la viscosidad del diluyente y extractante, tal como ha sido demostrado, aunque el cambio es más notorio en el caso del extractante puro, el cual reduce su viscosidad en un 75%, en comparación al 19% obtenido en el diluyente shellsol 2046 AR.

Como se puede ver en la figura 4.2, la medición de la viscosidad es fundamental para la eficiencia de un proceso en extracción por solventes. Esto debido a que juega un papel importante en la etapa de separación de fases ya que afecta directamente la velocidad de separación de fases, por consiguiente, generando que en el decantador (settler) haya pérdidas de orgánico por la no separación completa de las fases. Con ello se hace necesaria la reposición de reactivo extractante lo cual eleva los costos para la empresa (ver Figura 4.3).

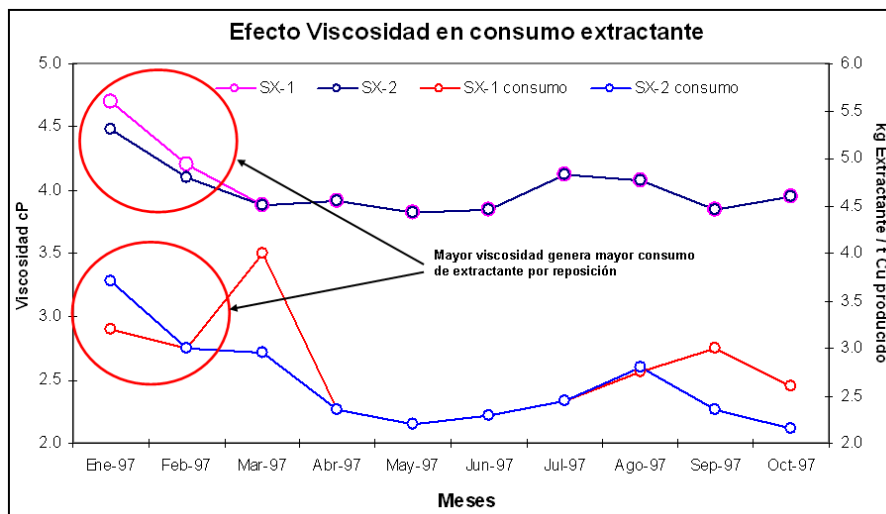


Figura 4.3 Efecto viscosidad en consumo específico de extractante (Reporte anual minera Michilla 1997, pp 105)

En función a lo indicado líneas arriba, si mejoramos el tiempo de separación de fases y minimizamos las pérdidas de orgánico, como consecuencia podemos incrementar la eficiencia del proceso.

4.1.1.2 Soluciones acuosas

En las figuras siguientes se presentan los resultados obtenidos de densidad y viscosidad de soluciones acuosas, que contienen diferentes concentraciones de ácido sulfúrico y sulfato de cobre a diferentes temperaturas.

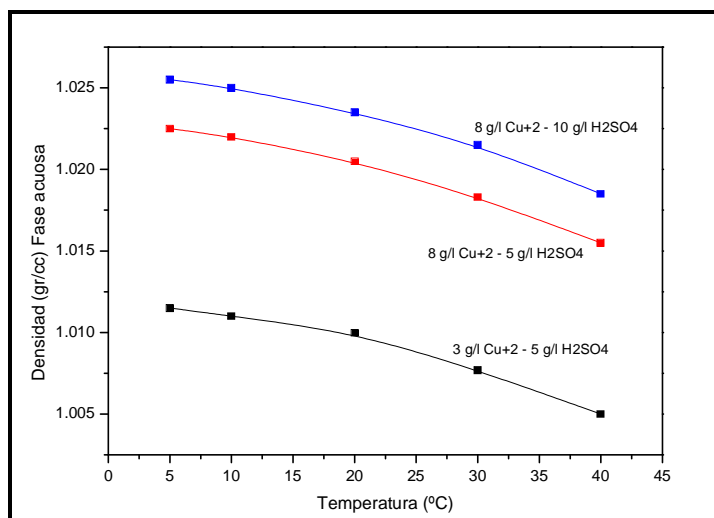


Figura 4.4 Densidad fase acuosa a distintas concentraciones de cobre y ácido sulfúrico

En la figura 4.4, se muestran las curvas de variación de densidad para los tres tipos de soluciones acuosas. Se observa que la densidad de las soluciones acuosas varían muy levemente con la temperatura dentro del rango de estudio; por ejemplo, en la solución que tiene 8 g/l cobre (II) y 5 g/l de ácido sulfúrico, la densidad a 5°C es de 1,0225 g/cc, en cambio al aumentar la temperatura a 40°C, la densidad es 1,016 g/cc, prácticamente se muestra una tendencia lineal.

Adicionalmente se puede apreciar el efecto de la influencia de la concentración de determinados elementos dentro de la fase acuosa; por ejemplo a 5°C se observa que el incremento de la concentración de cobre (II) de 3 g/l a 8 g/l aumenta la densidad de la fase acuosa de 1.012 a 1.0225 gr/cc ,afectando de manera directa en la variación de la densidad en relación a la adición de ácido sulfúrico el cual incrementa la densidad de 1.0225 a 1.026 gr/cc (de 5 g/l a 10 g/l), manteniéndose tales

diferencias aun a 40°C, por lo que la variación de la densidad mantiene una tendencia lineal en todo su comportamiento dentro del rango de estudio.

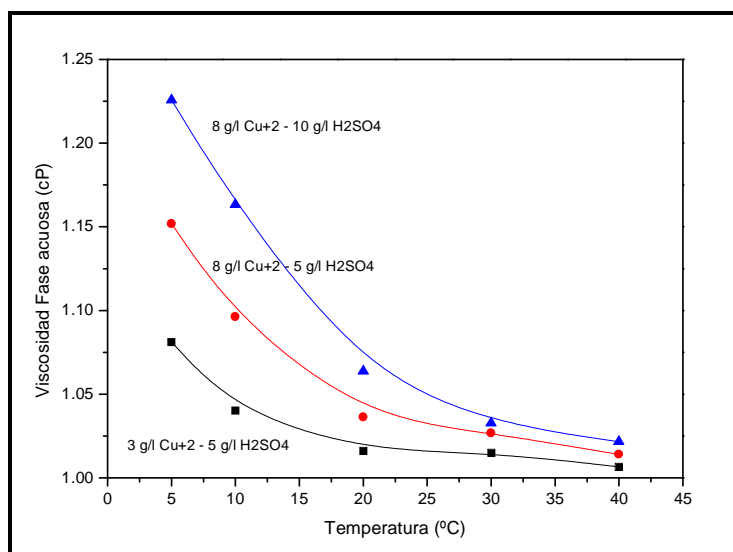


Figura 4.5 Viscosidad fase acuosa a distintas concentraciones de cobre y ácido

En la figura 4.5, se muestra el gráfico obtenido para las pruebas de medición de viscosidad realizada a las tres soluciones acuosas con distintas concentraciones de cobre. Según dicho gráfico, la viscosidad de la solución acuosa disminuye por efecto de la temperatura, como por ejemplo, la viscosidad de la solución de 8 g/l de cobre (II) y 10 g/l ácido sulfúrico a una temperatura de 5 °C es de 1.225 cP, y al aumentar la temperatura a 40°C, la viscosidad disminuye a 1.025 cP; con lo cual se aprecia el efecto de la temperatura sobre esta propiedad física.

Para una misma cantidad de cobre, pero variando la cantidad de ácido sulfúrico; se observa la solución con 8 g/l de cobre (II) y 5 g/l ácido sulfúrico, a 5°C presenta una

viscosidad de 1.150 cP; en cambio si se disminuyera la cantidad de cobre a 3 g/l, la viscosidad disminuye a 1,060 cP, se puede apreciar entonces, que aumentando la cantidad de sulfato de cobre la viscosidad de la solución acuosa aumenta. Al aumentar conjuntamente la concentración de cobre y ácido, por ejemplo, la solución de 3 g/l de sulfato de cobre (II) y 5 g/l de ácido sulfúrico, a 5°C, tiene una viscosidad de 1.060 cP, al aumentar la concentración a 8 g/l de cobre (II) y 10 g/l ácido sulfúrico, la viscosidad a 5°C, aumenta a 1.225 cP.

Según lo mencionado líneas arriba, podemos observar en la figura 4.5, que el efecto de la temperatura es fundamental para poder optimizar la eficiencia del proceso, siendo que conocemos en función a este parámetro la variación de la viscosidad. De acuerdo a ello, si mantenemos estable la temperatura de la solución acuosa e incrementamos la temperatura de la solución orgánica (extractante + diluyente) en 3 puntos, podemos obtener como resultado un incremento en la eficiencia del circuito de hasta 7 puntos porcentuales en lo referente a un circuito en serie y de hasta 8 puntos porcentuales en un circuito en paralelo (ver Figura 4.6).

Es por ello que el efecto del incremento de la temperatura permite minimizar las pérdidas de orgánico y reduce los tiempos de separación de fases (velocidad de coalescencia), y por consiguiente, incrementa la recuperación del proceso.

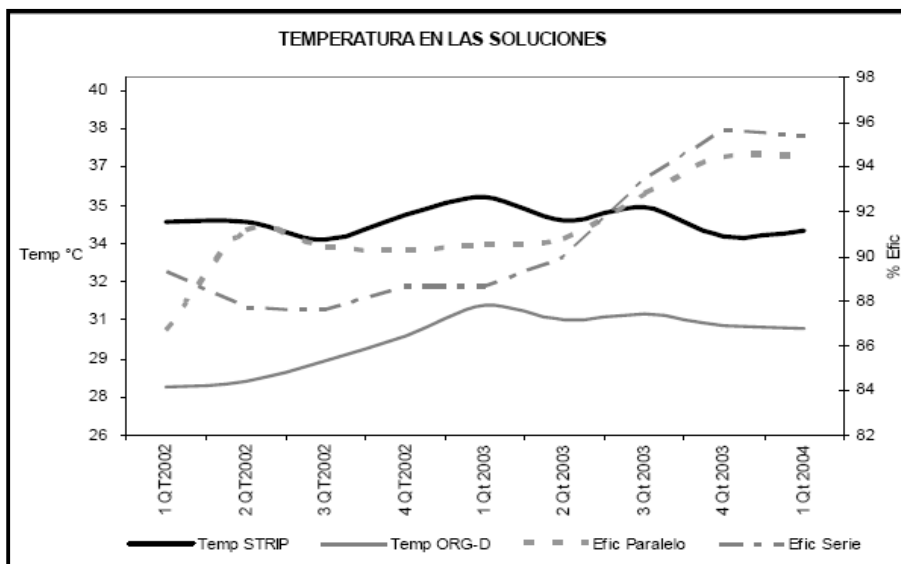


Figura 4.6 Efecto de la viscosidad en la eficiencia del proceso de extracción (Increment of the Transference Efficiency in a Solvent Extraction Circuit in Sociedad Minera Cerro Verde, Félix Amado, Daniel Mayorga, Walter Aguayo - Sociedad Minera Cerro Verde S.A.A., Perú, pp 12)

4.1.1.3 Fase orgánica con distintos porcentajes de extractante

En las figuras siguientes se muestran los resultados obtenidos de la medición de densidad y viscosidad de la fase orgánica con distintos porcentajes del extractante Lix 984N y solvente shellSol 2046 AR.

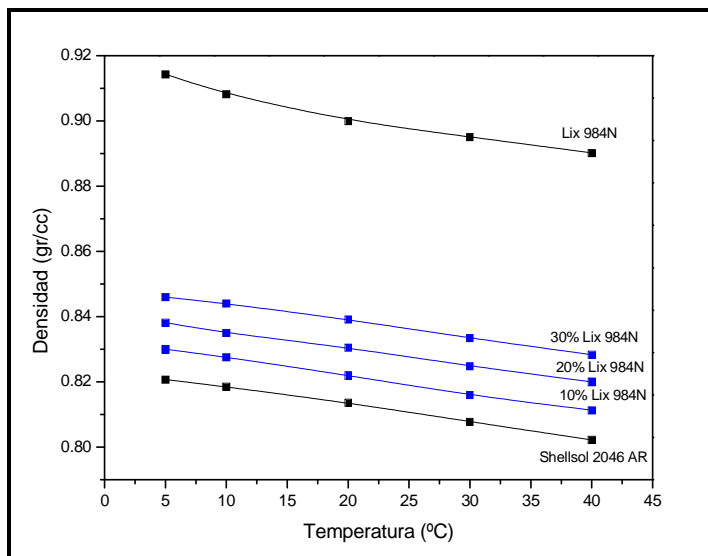


Figura 4.7 Densidad fase orgánica a distintas concentraciones de extractante Lix 984N

En la figura 4.7, se muestra el efecto de la temperatura sobre la densidad; se observa que para la solución que tiene 10% v/v de extractante, a una temperatura de 5°C, la densidad es de 0,830 g/cc; y al aumentar la temperatura a 40°C, la densidad es 0,816 g/cc, en general en el rango de estudio, las densidades de la fase orgánica varían muy poco con la temperatura lo cual permite determinar que la densidad no es sensible a cambios de temperatura y mantiene su tendencia lineal ante este parámetro.

Se observa, que para una misma temperatura y aumentando el porcentaje del extractante, la densidad aumenta muy levemente, la densidad obtenida a 5 °C, para el orgánico con 10% v/v de extractante es de 0,830 g/cc; para el que tiene 20% v/v la densidad obtenida es de 0,839 g/cc, en cambio al aumentar a 30% v/v de extractante la densidad es de 0,848 g/cc.

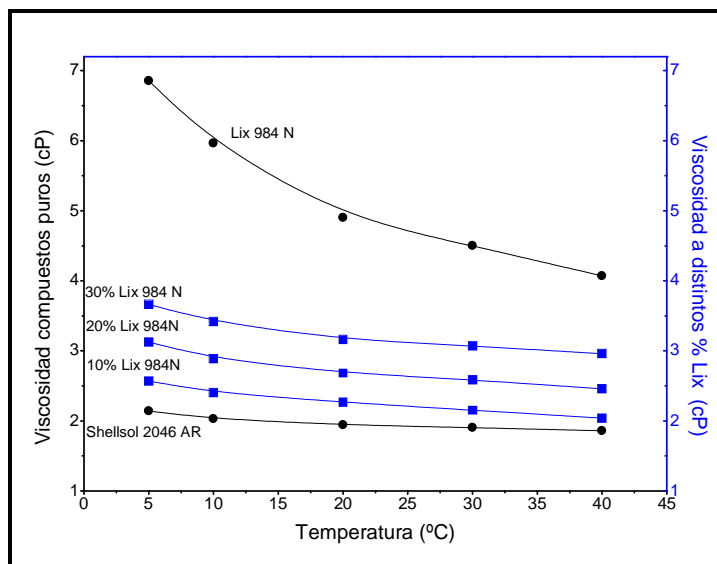


Figura 4.8 Viscosidad fase orgánica a distintas concentraciones de extractante Lix 984N

En la figura 4.8, se muestra los resultados obtenidos de las pruebas de medición de viscosidad para la fase orgánica con distintos porcentajes de extractante, se aprecia claramente que con mayor porcentaje de extractante se obtiene la viscosidad más alta; por ejemplo, para 40°C el orgánico que contiene 10% v/v de extractante presenta una viscosidad de 2.10 cP, el que contiene 20% v/v de extractante la viscosidad es de 2.70 cP, en cambio el que tiene 30% v/v de extractante presenta una viscosidad de 3.10 cP.

En el rango de estudio, la viscosidad varía con la temperatura, al analizar la fase orgánica con 20% de extractante, se observa a los 5°C que su viscosidad es de 3.10 cP, al aumentar a 40°C, la viscosidad disminuye a 2.70 cP.

Como se mencionó anteriormente, el diluyente Shellsol 2046 AR es usado para reducir la viscosidad de la fase orgánica, permitiendo una buena fluidez de la mezcla y también para reducir la concentración de dicho extractante que entra en contacto con el contenido metálico de la solución proveniente de la lixiviación.

Se puede esperar en una planta de extracción por solventes, que al trabajar con un porcentaje de extractante mayor en la fase orgánica, lo cual se da cuando la concentración de cobre (II) en el PLS es elevado, esta fase se haga más viscosa, siendo poco importante el cambio de la densidad.

En muchas plantas la concentración de este reactivo oscile dentro de un rango que va desde el 10% hasta un 30%, obviamente esto va a relacionado directamente con la concentración de cobre en la solución PLS (Ver Tabla 4.1).

Tabla 4.1 Plantas hidrometalúrgicas en Chile (Minería Chilena Set 2004, N° 279, pp 66-72).

Cía. Minera	Tipo Extractante	Solvente	% Extractante
Quebrada blanca	LIX 984N	Orfom SX-12	10.5
Zaldivar	LIX 984NC	Orfom SX-12	14
El Abra	LIX 984NC	Shellsol AR-2046	17-18
Punta del Cobre	LIX 612N-LV	NI	11
Dos amigos	LIX 9790N	NI	18.5 – 19.5
El tesoro	LIX 84 IC	Escaid 103	20
Radomiro Tomic	M-5744 / 5640	Escaid 100	21.6 - 24.3
Minas Sur	LIX 860 NIC / 860 IC / 84 IC	Escaid 100	26
Cerro colorado	LIX 860 / 84 I	Shellsol 2046 AR	11
Lomas Baya	LIX 84 IC	Shellsol 2046 AR	27 – 28
Michilla	LIX 984 N	Escaid 103	18
Mantos Blancos	M-5640	Escaid 103	18.5 – 19
Collahuasi	M-5640	Escaid 100	30
Escondida	M-5640	ShellSol 2046 AR	NI

4.1.2 Caracterización de las propiedades físicas en el proceso de Extracción por solventes

4.1.2.1 Fase orgánica al 10% v/v

En las figuras siguientes se presentan los resultados de viscosidad, densidad y tensión interfacial en función a la concentración de cobre (II) en la fase orgánica, a diferentes temperaturas; la fase acuosa contactada con la fase orgánica en un caso contenía 3 g/l de cobre (II) y 5 g/l de ácido sulfúrico.

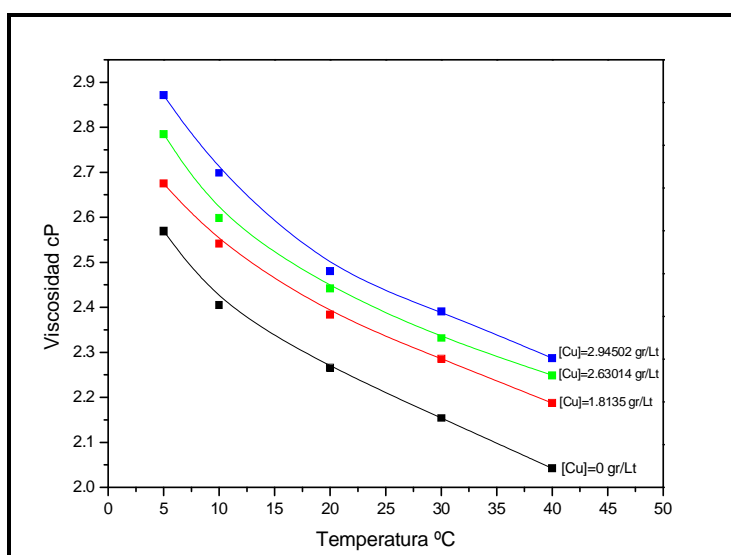


Figura 4.9 Viscosidad fase orgánica a distintas concentraciones de cobre

En la figura 4.9 se muestra los resultados obtenidos con las pruebas de carga de orgánico; se observa la variación de la viscosidad en función a la cantidad de cobre que contiene el orgánico, utilizando para la extracción la solución acuosa que contiene 3 g/l de cobre (II) y 5 g/l de ácido sulfúrico, el gráfico indica que a medida que el orgánico se fue cargando con cobre, la viscosidad del orgánico aumentó

progresivamente, también se aprecia el efecto de la temperatura sobre la viscosidad. Por ejemplo, para una concentración de cobre (II) de 2,63014 g/l, a una temperatura de 5°C, se obtuvo una viscosidad de 2,78 cP, en cambio al aumentar la temperatura a 20 °C, la viscosidad disminuye a 2,45 cP, si se sigue aumentando la temperatura, a 40°C la viscosidad disminuye a 2,3 cP, con lo que se puede apreciar que la viscosidad disminuye en un 17% aproximadamente de su valor inicial medido.

Para una misma temperatura, como por ejemplo a 40°C, con una concentración de cobre (II) de 1,8135 g/l, la viscosidad es de 2,2 cP; si aumenta la concentración de cobre (II) en la fase orgánica a 2.63014 g/l, la viscosidad aumenta a 2,30 cP; al aumentar nuevamente la concentración de cobre a 2.94502 g/l, la viscosidad aumenta a 2,35 cP; en el rango de estudio, la viscosidad aumenta a medida que aumenta la concentración de cobre en la fase orgánica.

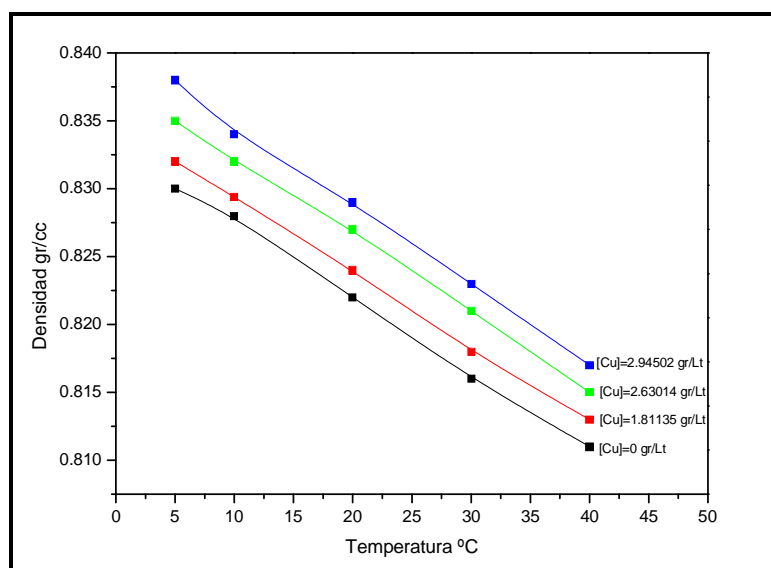


Figura 4.10 Densidad de la fase orgánica a distintas concentraciones de cobre

En la figura 4.10, se puede apreciar el efecto del incremento de la densidad a medida que el orgánico se fue enriqueciendo en su contenido de cobre; por ejemplo a 5°C la densidad de la fase orgánica con un contenido de cobre de 1.81135 g/l es de 0.8320 gr/cc, incrementando a 40°C se obtiene una densidad de 0.8130 gr/cc, claramente se ve la diferencia de densidad a medida que hay un aumento en la temperatura en la fase orgánica. Adicionalmente, en el rango de estudio la densidad aumenta con el incremento de la concentración de cobre (II) en la fase orgánica.

A diferencia de lo visto en la viscosidad, la variación de la densidad se da de manera lineal pudiendo observarse una ligera variación con respecto a la temperatura indicándonos de manera directa que dicho parámetro no es sensible a variaciones de temperatura.

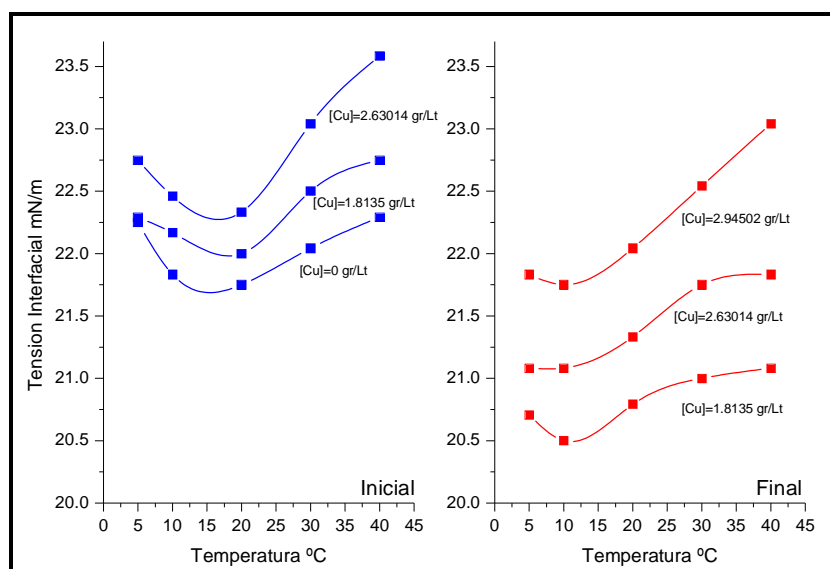


Figura 4.11 Tensión interfacial de la fase orgánica a distintas concentraciones de cobre

En la figura 4.11 se muestra los resultados obtenidos con las pruebas de carga de orgánico; se observa la variación de la tensión interfacial en función a la cantidad de cobre que contiene el orgánico, utilizando para la extracción la solución acuosa que contiene 3 g/l de cobre (II) y 5 g/l de ácido sulfúrico, el gráfico indica que a medida que el orgánico se fue cargando con cobre, la tensión interfacial del orgánico aumentó progresivamente, también se puede apreciar el efecto de la temperatura sobre la tensión interfacial.

Cabe señalar que se muestran 2 gráficos, los cuales representan la medición de la tensión interfacial inicial y en equilibrio (posterior a la prueba). El primero sindicado como inicial muestra la tensión interfacial entre la fase orgánica y la fase acuosa fresca antes de iniciar el mezclado entre ambas fases, mientras que el gráfico sindicado como final muestra la tensión interfacial entre el orgánico cargado y el refino obtenido posterior al mezclado. Por ejemplo, en el primer gráfico (inicial) para una concentración de cobre (II) de 2,63014 g/l, a una temperatura de 5°C se obtuvo una tensión interfacial inicial de 22.75 mN/m, para una concentración de cobre (II) de 1.8135 g/l se obtuvo una tensión interfacial de 22.25 mN/m, mientras que en el segundo gráfico (Final) se obtienen 21.1 y 20.4 mN/m, respectivamente. En general, a medida que se incrementa el contenido de cobre (II) en la fase orgánica se observa que mayor es la energía requerida para incrementar el área de contacto entre ambas fases.

Adicionalmente, se puede apreciar un punto de inflexión mínimo a temperatura ambiente la cual puede ser explicada de la siguiente manera, de acuerdo a la

literatura a bajas temperaturas la fase orgánica posee una alta viscosidad, lo que hace que la interfaz líquido-líquido tenga mayor contenido de fase acuosa, por lo que a medida que la temperatura se incrementa el contenido de fase orgánica en la interfaz disminuye, generando una disminución de la tensión interfacial hasta un punto donde la proporción de fase acuosa y orgánica es de 1:1 que es el punto de su mínima tensión interfacial medida, produciendo a partir de allí un fenómeno conocido como inversión de fase.

4.1.2.2 Fase orgánica al 20% v/v

En las figuras siguientes se presentan los resultados de viscosidad, densidad y tensión interfacial de la fase orgánica, utilizando 20% v/v de extractante Lix 984N, a diferentes temperaturas. La fase acuosa que se contactó con el orgánico contenía 8 g/l de cobre (II) y 5 g/l de ácido sulfúrico.

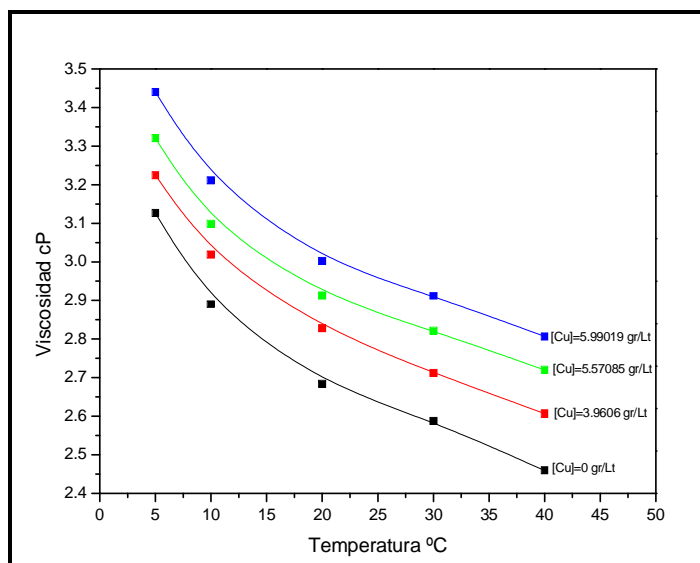


Figura 4.12 Viscosidad de la fase orgánica a distintas concentraciones de cobre

En la figura 4.12 se muestra las curvas obtenidas con las pruebas de carga de orgánico; se observa la variación de la viscosidad en función a la cantidad de cobre que contiene el orgánico, utilizando para la extracción la solución acuosa que contiene 8 g/l de cobre (II) y 5 g/l de ácido sulfúrico, el gráfico indica que a medida que el orgánico se fue cargando con cobre, la viscosidad del orgánico aumentó progresivamente. Por ejemplo, para una concentración de cobre (II) de 5.57085 g/l a una temperatura de 5°C, se obtuvo una viscosidad de 3.33 cP, en cambio al aumentar la temperatura a 20 °C, la viscosidad disminuye a 2.92 cP, si se sigue aumentando la temperatura a 40°C, la viscosidad disminuye a 2.74 cP, con lo que se puede apreciar que la viscosidad disminuyo en un 17% aproximadamente de su valor inicial medido.

Para una misma temperatura, como por ejemplo a 40°C, con una concentración de cobre (II) de 3.9606 g/l, la viscosidad es de 2.63 cp; si aumenta la concentración de cobre (II) en la fase orgánica a 5.57085 g/l, la viscosidad aumenta a 2.74 cP; al aumentar nuevamente la concentración de cobre (II) a 5.99019 g/l, la viscosidad aumenta a 2.82 cP; en el rango de estudio, la viscosidad aumenta a medida que aumenta la concentración de cobre en la fase orgánica, siendo que la viscosidad no debe aumentar demasiado, ya que un aumento provoca un incremento en los arrastres de acuoso en orgánico (A/O).

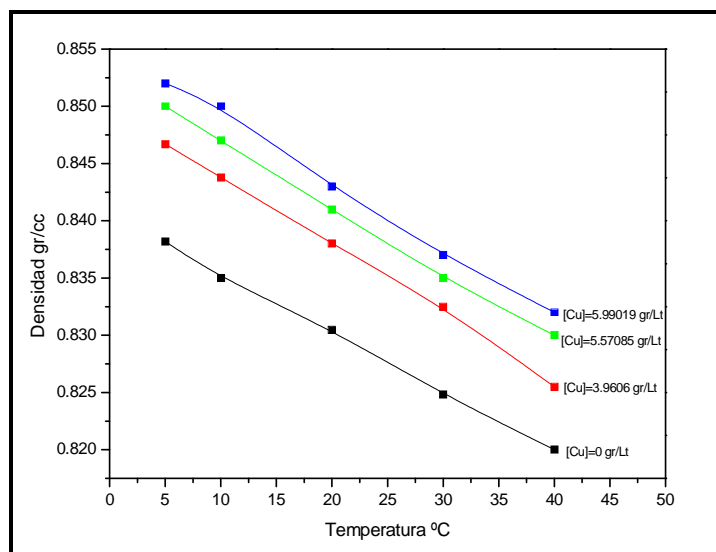


Figura 4.13 Densidad de la fase orgánica a distintas concentraciones de cobre

En la figura 4.13, se puede apreciar el aumento de la densidad a medida que el orgánico se fue enriqueciendo en su contenido de cobre (II); por ejemplo a 5°C la densidad de la fase orgánica con un contenido de cobre (II) de 5.57085 g/l es de 0.850 gr/cc, incrementando a 40°C se obtiene una densidad de 0.830 gr/cc, claramente se ve la diferencia de densidad a medida que hay un aumento en la concentración de cobre en la fase orgánica. Para una concentración de cobre (II) de 3.9606 g/l a una temperatura de 5°C su densidad es de 0,846 g/cc; al aumentar la concentración de cobre a 5.9902 g/cc, la densidad aumenta levemente a 0,852 g/cc. En general, en el rango de estudio la densidad disminuye con el aumento de la temperatura.

A diferencia de lo visto en la viscosidad, la variación de la densidad se da de manera lineal pudiendo observarse una ligera variación con respecto a la temperatura

indicándonos de manera directa que dicho parámetro no es sensible a variaciones de temperatura.

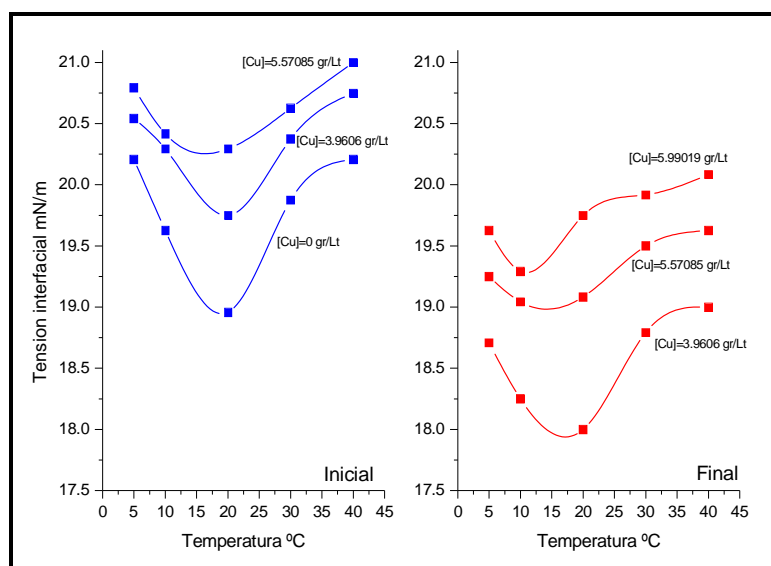


Figura 4.14 Tensión interfacial de la fase orgánica a distintas concentraciones de cobre

En la figura 4.14 se muestra las curvas obtenidas con las pruebas de carga de orgánico; se observa la variación de la tensión interfacial en función a la cantidad de cobre que contiene el orgánico, utilizando para la extracción la solución acuosa que contiene 8 g/l de cobre (II) y 5 g/l de ácido sulfúrico, el gráfico indica que a medida que el orgánico se fue cargando con cobre, la tensión interfacial del orgánico aumentó progresivamente, también se puede apreciar el efecto de la temperatura sobre la tensión interfacial.

Cabe señalar que se observan 2 gráficos los cuales representan la medición de la tensión interfacial inicial y la medición de la tensión interfacial en equilibrio

posterior al mezclado. El primero sindicado como inicial muestra la tensión interfacial entre la fase orgánica y la fase acuosa fresca, mientras que el grafico sindicado como final muestra la tensión interfacial entre el orgánico cargado y el refino. Por ejemplo, en el primer grafico (inicial) para una concentración de cobre (II) de 5.57085 g/l, a una temperatura de 5°C se obtuvo una tensión interfacial inicial de 20.80 mN/m, para una concentración de cobre de 3.9606 gr/cc se obtuvo una tensión interfacial de 20.55 mN/m, mientras que en el segundo grafico (Final) se obtienen 18.75 y 19.70 mN/m respectivamente.

Adicionalmente, se puede apreciar un punto de inflexión mínimo a temperatura ambiente la cual puede ser explicada de la siguiente forma, de acuerdo a la literatura a bajas temperaturas la fase orgánica posee una baja viscosidad, lo que hace que la interfaz líquido-líquido tenga mayor contenido de fase acuosa por lo que a medida que la temperatura se incrementa el contenido de fase orgánica en esa en la interfaz generando una disminución de la tensión interfacial hasta un punto donde la proporción de fase acuosa y orgánica es de 1:1 que es el punto de su mínima tensión interfacial medida, produciendo a partir de allí un fenómeno conocido como inversión de fase.

4.1.2.3 Fase orgánica al 30% v/v

En las figuras siguientes se presentan los resultados de viscosidad, densidad y tensión interfacial de la fase orgánica, utilizando 30% v/v de extractante Lix 984N; las fases acuosas que se contactaron tenían 8 g/l de cobre (II) y 10 g/l de ácido sulfúrico.

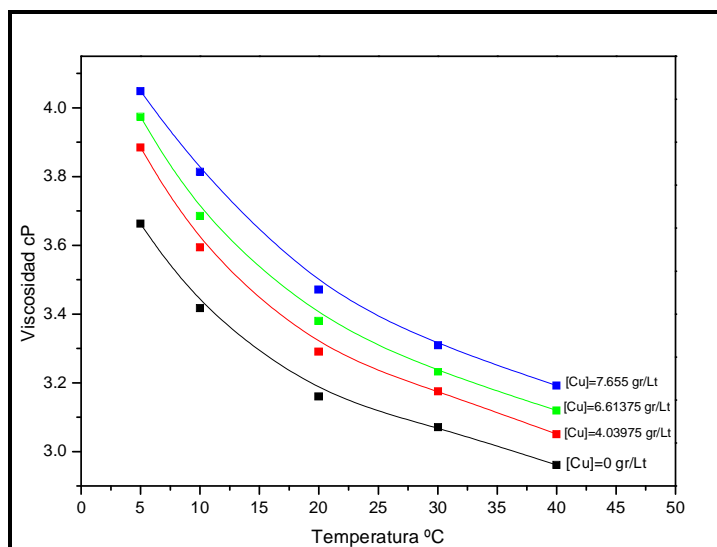


Figura 4.15 Viscosidad de la fase orgánica a distintas concentraciones de cobre

En la figura 4.15 se muestra las curvas obtenidas con las pruebas de carga de orgánico; se observa la variación de la viscosidad en función a la cantidad de cobre que contiene el orgánico, utilizando para la extracción la solución acuosa que contiene 8 g/l de cobre (II) y 10 g/l de ácido sulfúrico, el gráfico indica que a medida que el orgánico se fue cargando con cobre, la viscosidad del orgánico aumentó progresivamente, también se aprecia el efecto de la temperatura sobre la viscosidad. Por ejemplo, para una concentración de cobre (II) de 6.61375 g/l, a una temperatura de 5°C, se obtuvo una viscosidad de 3.98 cP, en cambio al aumentar la temperatura a 20 °C, la viscosidad disminuye a 3.38 cP, si se sigue aumentando la temperatura a 40°C, la viscosidad disminuye a 3.14 cP, con lo que se puede apreciar que la viscosidad disminuyó en un 19% aproximadamente de su valor inicial medido.

Para una misma temperatura, como por ejemplo a 40°C, con una concentración de cobre (II) de 4.03978 g/l, la viscosidad es de 3.08 cP; si aumenta la concentración de cobre en la fase orgánica a 6.61375 g/l, la viscosidad aumenta a 3.14 cp; al aumentar

nuevamente la concentración de cobre a 7.665 g/l, la viscosidad aumenta a 3.24 cP; en el rango de estudio, la viscosidad aumenta a medida que aumenta la concentración de cobre en la fase orgánica, siendo que la viscosidad es un parámetro que incide directamente en el aumento en los arrastres de acuoso en orgánico.

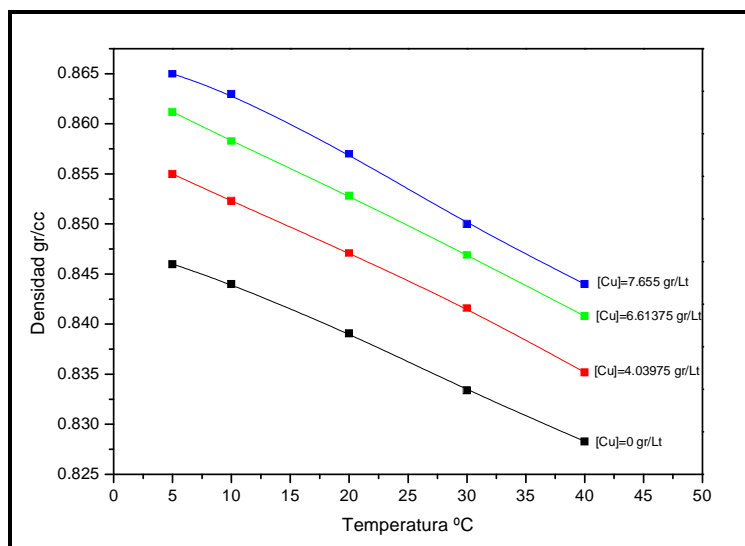


Figura 4.16 Densidad de la fase orgánica a distintas concentraciones de cobre

En la figura 4.16, se puede apreciar el aumento de la densidad a medida que el orgánico se fue enriqueciendo en su contenido de cobre; por ejemplo a 5°C la densidad de la fase orgánica con un contenido de cobre de 6.61375 g/l es de 0.8610 gr/cc, incrementando a 40°C se obtiene una densidad de 0.8420 gr/cc, claramente se ve la diferencia de densidad a medida que hay un aumento en la concentración de cobre en la fase orgánica. Para una concentración de cobre de 4.03975 g/l, a una temperatura de 5°C su densidad es de 0,8550 g/cc; al aumentar la concentración de cobre a 6.61375 g/l, la densidad aumenta levemente a 0.8610 g/cc. En general, en el rango de estudio la densidad disminuye con el aumento de la temperatura.

A diferencia de lo visto en la viscosidad, la variación de la densidad se da de manera lineal pudiendo observarse una ligera variación con respecto a la temperatura indicándonos de manera directa que dicho parámetro no presenta sensible a las variaciones de temperatura.

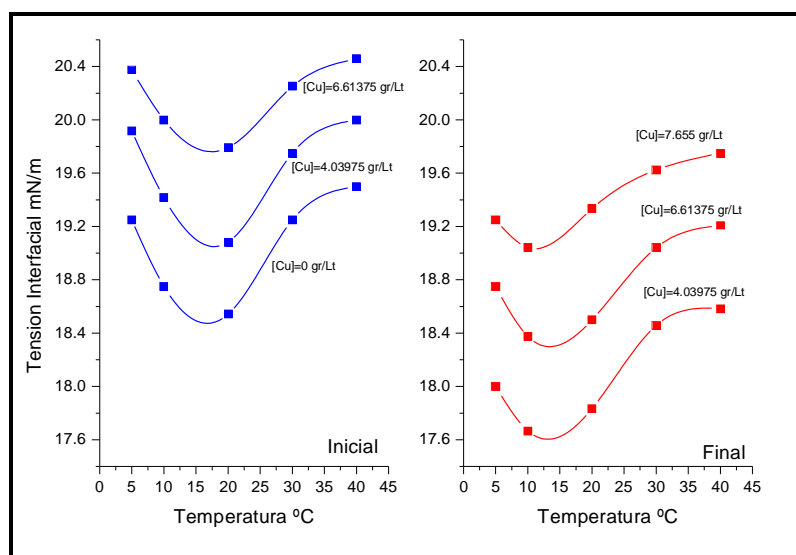


Figura 4.17 Tensión interfacial de la fase orgánica a distintas concentraciones de cobre

En la figura 4.17 se muestra las curvas obtenidas con las pruebas de carga de orgánico; se observa la variación de la tensión interfacial en función a la cantidad de cobre que contiene el orgánico, utilizando para la extracción la solución acuosa que contiene 8 g/l de cobre (II) y 5 g/l de ácido sulfúrico, el gráfico indica que a medida que el orgánico se fue cargando con cobre, la tensión interfacial del orgánico aumentó progresivamente, también se puede apreciar el efecto de la temperatura sobre la tensión interfacial.

Cabe señalar que se observan 2 gráficos los cuales representan la medición de la tensión interfacial inicial y la medición de la tensión interfacial en equilibrio posterior al mezclado. El primero sindicado como inicial muestra la tensión interfacial entre la fase orgánica y la fase acuosa fresca, mientras que el gráfico sindicado como final muestra la tensión interfacial entre el orgánico cargado y el refino. Por ejemplo, en el primer gráfico (inicial) para una concentración de cobre (II) de 6.61375 g/l, a una temperatura de 5°C se obtuvo una tensión interfacial inicial de 20.40 mN/m, para una concentración de cobre de 4.03975 g/l se obtuvo una tensión interfacial de 19.90 mN/m, mientras que en el segundo gráfico (Final) se obtienen 18.00 y 18.80 mN/m respectivamente.

Adicionalmente, se puede apreciar un punto de inflexión mínimo a temperatura ambiente la cual puede ser explicada de la siguiente forma, de acuerdo a la literatura a bajas temperaturas la fase orgánica posee una baja viscosidad, lo que hace que la interfaz líquido-líquido tenga mayor contenido de fase acuosa por lo que a medida que la temperatura se incrementa el contenido de fase orgánica en esa en la interfaz generando una disminución de la tensión interfacial hasta un punto donde la proporción de fase acuosa y orgánica es de 1:1 que es el punto de su mínima tensión interfacial medida, produciéndose a partir de allí un fenómeno conocido como inversión de fase.

4.2 Estudio del efecto de las propiedades físicas en la velocidad de coalescencia

4.2.1 Influencia del % de extractante en la velocidad de coalescencia de la fase dispersa

La velocidad de coalescencia es definida como la velocidad con la que la fase dispersada se separa de la fase continua posterior a un mezclado entre ambas y que es obtenida de manera experimental al medir la pendiente de la curva que describe como se puede observar en la figura 4.18.

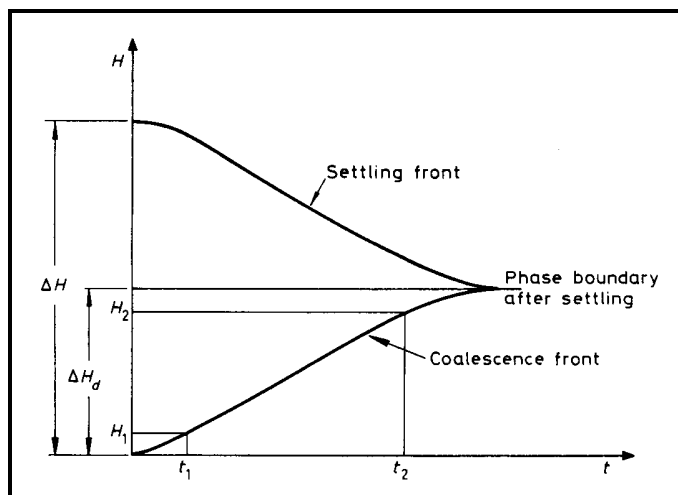


Figura 4.18 Perfil de separación batch (fase dispersada más densa).

La velocidad de coalescencia está directamente relacionado con ciertos parámetros, los cuales influyen en la velocidad de coalescencia, siendo uno de los más importantes la concentración de cobre existente en la fase orgánica la cual genera un aumento paulatino del tiempo de separación de fases generando entre otros un mayor arrastre de fases y aumentando paulatinamente las impurezas dentro la fase orgánica.

4.2.1.1 Efecto a 10% Lix 984N

Como puede verse en la figura 4.19, a medida que se incrementa el contenido de cobre en la fase orgánica, la velocidad de coalescencia disminuye; por ejemplo, en el grafico puede observarse a una concentración de cobre (II) de 1.811 g/l la velocidad de coalescencia calculada es de 0.148 cm/s, mientras que a una concentración de cobre (II) de 2.630 g/l la velocidad de coalescencia calculada es de 0.140 cm/s y si incrementamos la concentración de cobre (II) de 2.945 g/l se obtiene una velocidad de coalescencia de 0.138 cm/s.

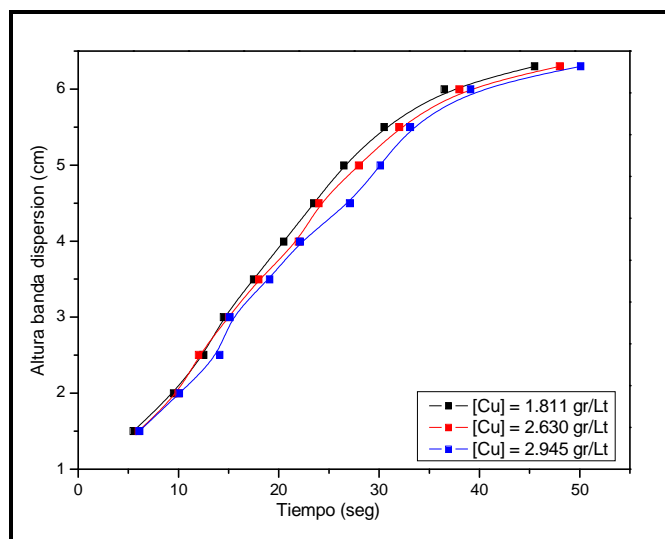


Figura 4.19 Perfil de coalescencia de la fase dispersada a 10% Lix 984N

A continuación se muestra la tabla 4.2, donde se tiene la velocidad de coalescencia obtenida de manera experimental y el contenido de cobre.

Tabla 4.2 Tabla resumen velocidad de coalescencia a 10% Lix 984N

% Lix	[Cu] g/l	V_d ($\times 10^{-3}$ m/s)
10	1.811	1.4803
	2.630	1.4063
	2.945	1.2699

Se puede observar que a medida que la concentración de cobre aumenta se observa que la velocidad de coalescencia disminuye por lo que se puede deducir que el contenido de cobre afecta de manera directa la separación y por ende aumenta el tiempo de separación de fases.

4.2.1.2 Efecto a 20% Lix 984N

Como puede verse en la figura 4.20, a medida que se incrementa el contenido de cobre en la fase orgánica, la velocidad de coalescencia disminuye; por ejemplo, en el grafico puede observarse a una concentración de cobre (II) de 3.961 g/l la velocidad de coalescencia calculada es de 0.092 cm/s, mientras que a una concentración de cobre (II) de 5.571 g/l con una velocidad de coalescencia calculada de 0.089 cm/s y si incrementamos la concentración de cobre (II) de 5.990 g/l se obtiene una velocidad de coalescencia de 0.080 cm/s.

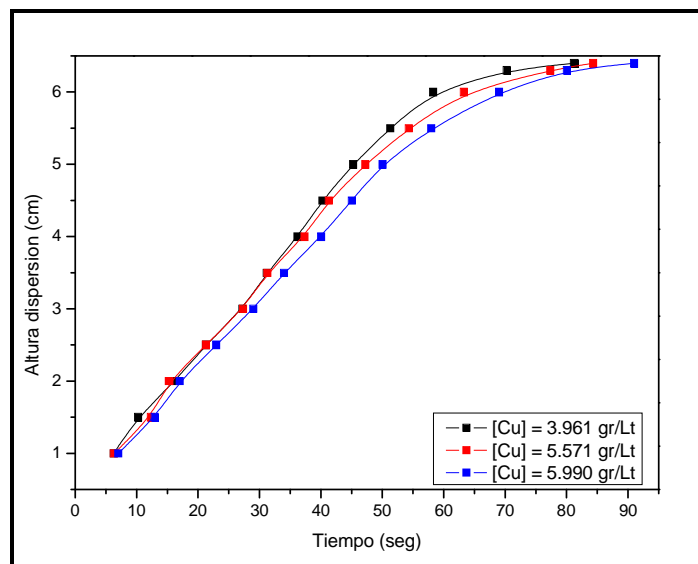


Figura 4.20 Perfil de coalescencia de la fase dispersada a 20% Lix 984N

A continuación se muestra la tabla 4.3, donde se tiene la velocidad de coalescencia obtenida de manera experimental y el contenido de cobre.

Tabla 4.3 Tabla resumen velocidad de coalescencia a 20% Lix 984N

% Lix	[Cu] g/l	V_d ($\times 10^{-3}$ m/s)
20	3.961	0.926
	5.571	0.893
	5.990	0.806

Se puede observar que a medida que la concentración de cobre aumenta se observa que la velocidad de coalescencia disminuye por lo que se puede deducir que el contenido de cobre afecta de manera directa la separación y por ende aumenta el tiempo de separación de fases.

4.2.1.3 Efecto a 30% Lix 984N

Como puede observarse en la figura 4.21, a medida que se incrementa el contenido de cobre en la fase orgánica, la velocidad de coalescencia disminuye; por ejemplo, en el grafico puede observarse a una concentración de cobre (II) de 4.040 g/l la velocidad de coalescencia calculada es de 0.068 cm/s, mientras que a una concentración de cobre (II) de 6.614 g/l con una velocidad de coalescencia calculada de 0.060 cm/s y si incrementamos la concentración de cobre (II) de 7.655 g/l se tiene una velocidad de coalescencia de 0.057 cm/s.

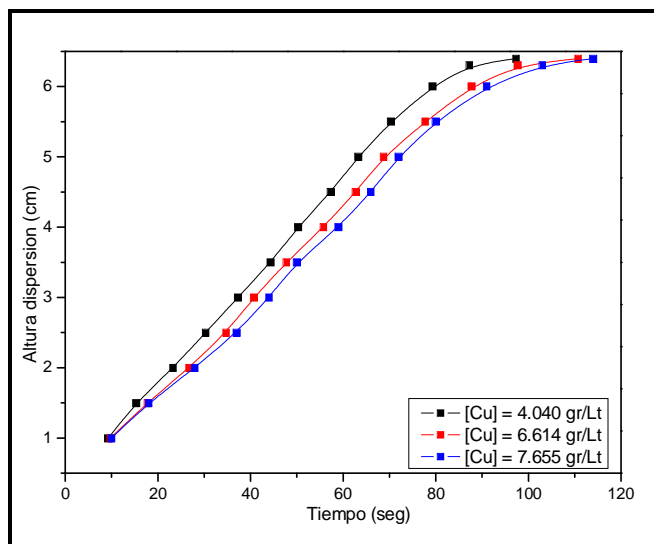


Figura 4.21 Perfil de coalescencia de la fase dispersada a 30% Lix 984N

A continuación se muestra la tabla 4.4, donde se tiene la velocidad de coalescencia obtenida de manera experimental y el contenido de cobre.

Tabla 4.4 Tabla resumen velocidad de coalescencia a 30% Lix 984N

% Lix	[Cu] g/l	V_d ($\times 10^{-3}$ m/s)
30	4.040	0.675
	6.614	0.606
	7.655	0.573

Se puede observar que a medida que la concentración de cobre aumenta se observa que la velocidad de coalescencia disminuye por lo que se puede deducir que el contenido de cobre afecta de manera directa la separación y por consiguiente aumenta el tiempo de separación de fases.

4.2.2 Correlación entre Propiedades físicas y Velocidad de coalescencia

De acuerdo a la literatura revisada, se tomaron varios solventes orgánicos, los cuales fueron escogidos para cubrir un amplio rango de propiedades físicas, con los cuales se pudo analizar las velocidades de coalescencia para los 19 sistemas agua/solvente dados en la tabla 4.5, los cuales fueron medidos experimentalmente y se sugiere que para el agua dentro de una continuidad orgánica bajo las condiciones mencionadas, la velocidad de coalescencia es dependiente de las propiedades siguientes de las fases mutuamente saturadas:

$$v_d \cong f(\mu_c, \mu_d, \rho_c, \Delta\rho, \gamma, \gamma_r) \dots\dots\dots (4.1)$$

Como puede verse la correlación establecida esta en función a las propiedades físicas medidas inicialmente donde se puede observar que las más importantes son la viscosidad de la fase acuosa y orgánica, la densidad de ambas fases y la tensión interfacial inicial entre ambos líquidos. Las pruebas iniciales fueron realizados en 9 sistemas agua/solvente mutuamente saturadas y bajo las mismas condiciones

específicas a fin de poder obtener una correlación satisfactoria a las expectativas. Se puede observar en la tabla 4.5 las propiedades físicas tomadas en cuenta y donde a partir del cual se pudo determinar la correlación existente entre las propiedades físicas y la velocidad de coalescencia de la fase dispersada.

Tabla 4.5 Velocidades de coalescencia batch y propiedades físicas de 19 sistemas agua/solvente Orgánico mutuamente saturados (J. Golob and R. Modic, 1977.
Coalescence of liquid/liquid dispersions in gravity settlers)

Solvent	Coalescence rate v_d ($\text{m s}^{-1} \times 10^{-3}$)	Interfacial tension γ ($\text{Nm}^{-1} \times 10^{-3}$)	Organic phase viscosity μ_c ($\text{Nsm}^{-2} \times 10^{-3}$)	Aqueous phase viscosity μ_a ($\text{Nsm}^{-2} \times 10^{-3}$)	Organic phase density ρ_c (kg m^{-3})	Density difference $\Delta\rho$ (kg m^{-3})
Ethylacetate	1.11	2.9	0.498	1.216	904.8	92.6
Butylacetate	1.60	4.5	0.714	1.002	875.1	123.9
Amylacetate	2.09	9.2	0.809	1.036	875.0	112.0
n-Hexane	5.43	51.0	0.313	1.012	655.8	342.6
n-Heptane	5.04	51.7	0.451	0.984	707.3	290.6
Iso-octane	4.77	50.8	0.522	0.998	692.0	304.3
n-Decane	4.20	50.2	0.886	1.016	726.0	271.9
Shell Sol K	3.15	49.3	1.865	1.005	794.7	203.3
Butylalcohol	2.16	1.6	3.185	1.414	838.9	147.9
Amylalcohol	1.93	5.2	4.025	1.112	822.5	170.7
Benzene	2.63	35.0	0.635	1.006	880.3	118.1
Toluene	3.04	36.0	0.627	1.003	866.9	134.1
Aniline	1.30	5.8	4.334	1.064	1021.8	23.7
Xylene	3.03	37.5	0.640	1.004	872.4	126.6
Diethyl Carbonate	1.17	13.8	0.794	1.043	973.3	24.1
Methyl Isobutyl Ketone	2.69	10.2	0.615	1.060	806.2	187.4
Cyclohexanone	0.95	4.1	2.475	1.262	950.5	46.8
Carbon tetrachloride	4.60	45.5	1.012	0.999	1595.0	594.1
Diethylether	3.24	10.7	0.259	1.118	722.9	267.6

Trabajos anteriores establecieron una correlación entre las propiedades físicas y la velocidad de coalescencia en pruebas tipo batch. Las pruebas iniciales fueron realizados en 9 sistemas agua/solvente como se puede observar en la Figura 4.22, donde se puede apreciar la existencia de una correlación entre las propiedades físicas y las velocidad de coalescencia experimentalmente medida.

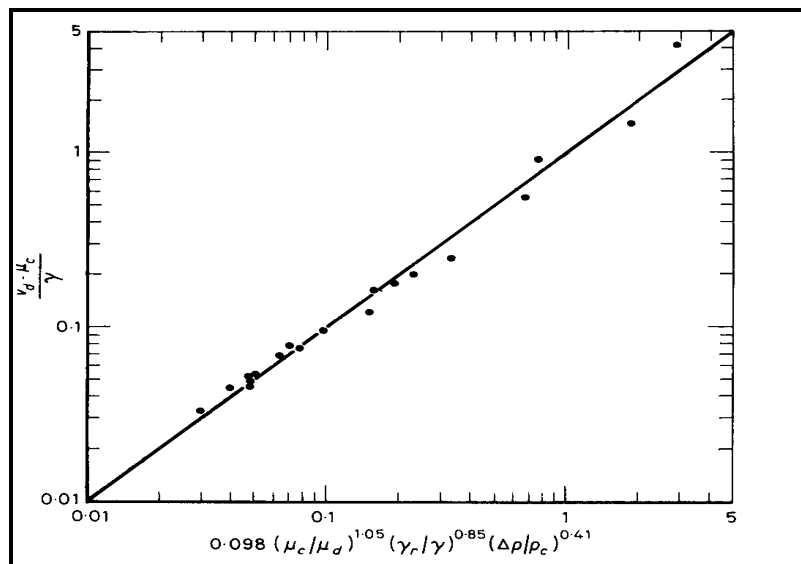


Figura 4.22 Velocidad de coalescencia batch como una función de las propiedades físicas para Líquidos puros

En base a los trabajos anteriormente realizados es que se muestra la siguiente tabla 4.6 obtenido de 9 sistemas fase acuosa/fase orgánica, estableciendo como premisa que cada fase orgánica es considerada un solvente distinto por tener diferentes concentraciones de cobre y extractante así como las propiedades físicas varían entre uno y otro, así mismo cada fase acuosa es considerada constante ya que cada fase orgánica se contacto con una fase acuosa fresca no alterando las propiedades físicas los que bajo las condiciones mencionadas manifiestan una velocidad de coalescencia dependiente sobre las propiedades físicas de ambas fases.

Tabla 4.6 Velocidades de coalescencia batch y propiedades físicas de 9 sistemas fase Acuosa / fase Orgánica mutuamente saturados

% Lix 984N	[Cu] gr/Lt	[Cu] / [Cu] ₀	μ _c / μ _d	Δρ / ρ _c	γ _r / γ	μ _c / γ	V _d meas (x10 ³ m/s)
10%	1.81	0.60	2.15	0.226	3.34	0.1004	1.4790
	2.63	0.88	2.21	0.222	3.31	0.1019	1.4054
	2.95	0.98	2.24	0.221	3.26	0.1021	1.3782
20%	3.96	0.50	2.65	0.221	3.84	0.1453	0.9438
	5.57	0.70	2.67	0.216	3.68	0.1408	0.8921
	5.99	0.75	2.70	0.214	3.59	0.1386	0.8085
30%	4.04	0.50	2.97	0.215	3.92	0.1780	0.6721
	6.61	0.83	3.10	0.207	3.81	0.1803	0.5904
	7.66	0.96	3.21	0.202	3.68	0.1804	0.5859

Para efectos de cálculo y a partir de estudios anteriores es que la formula general de la correlación entre las propiedades físicas y la velocidad de coalescencia es propuesta de la siguiente forma:

$$\frac{V_d \times \mu_c}{\gamma} \cong C \times \left(\frac{\mu_d}{\mu_c}\right)^{-a} \times \left(\frac{\gamma_r}{\gamma}\right)^b \times \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_c}\right)^d \dots\dots\dots (4.2)$$

Teniendo los datos de las propiedades físicas y la velocidad de coalescencia medidos experimentalmente podemos correlacionar nuestros datos con los obtenidos obteniendo la tabla 4.7, donde se muestran las constantes C, a b y d.

Tabla 4.7 Constantes obtenidas por regresión múltiple lineal

Cte	Valor
C	1.632
a	-0.60
b	0.33
d	1.57

Teniendo como resultado la siguiente correlación experimental:

$$\frac{V_d \cdot \mu_c}{\gamma} = 1.632 \times \left(\frac{\mu_d}{\mu_c}\right)^{-0.60} \left(\frac{\gamma_r}{\gamma}\right)^{0.33} \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_c}\right)^{1.57} \dots\dots\dots (4.3)$$

Donde se puede apreciar la correlación existente entre dichas propiedades físicas y la velocidad de coalescencia medida experimentalmente, como lo prueba la figura 4.23 mostrado a continuación.

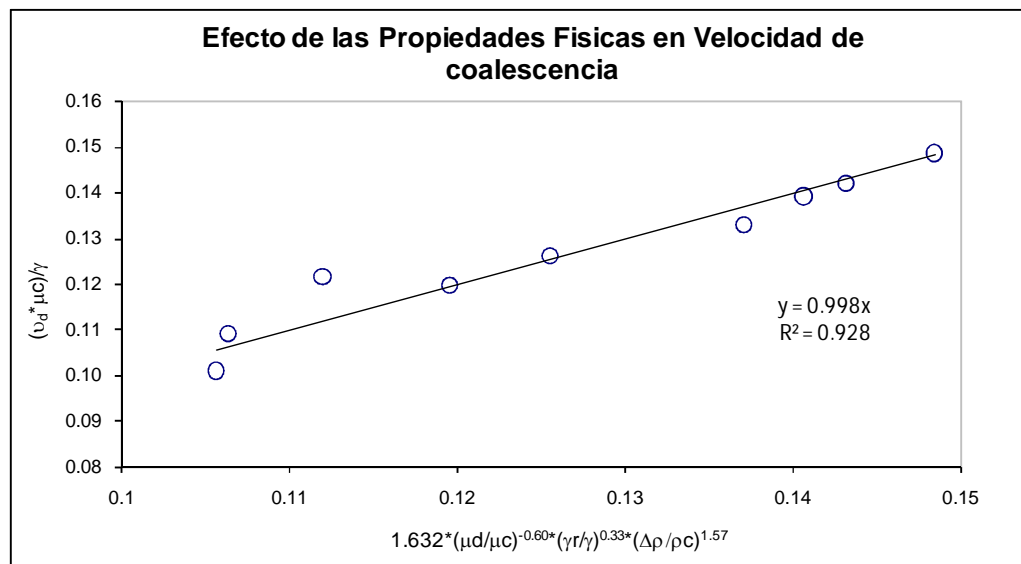


Figura 4.23 Velocidad de coalescencia de las fase dispersa en función de las propiedades físicas para líquidos puros ($T=20^{\circ}\text{C}$, $\phi = 0.50$, continuidad orgánica).

Con lo obtenido experimentalmente y siendo la correlación altamente exacta se puede determinar que existe correlación entre las propiedades físicas y la velocidad de coalescencia por lo que se puede obtener la velocidad de coalescencia a partir de las propiedades físicas con una aproximación del 96% de correlación entre los datos experimentalmente obtenidos.

4.2.3 Influencia del % de extractante en el tiempo de ruptura primaria

A partir de la determinación experimental de la velocidad de coalescencia se puede determinar de manera teórica el tiempo de separación de fases para poder predecir el tiempo óptimo con el cual las fases van a generar un tiempo de ruptura primario.

4.2.3.1 Efecto a 10% Lix 984N

Como puede observarse en la figura 4.24, a medida que se incrementa el contenido de cobre en la fase orgánica, la velocidad de coalescencia disminuye; por ejemplo, en el grafico puede observarse a una concentración de cobre (II) de 1.811 g/l el tiempo de ruptura primaria calculada es de 51.7 segundos, mientras que a una concentración de cobre (II) de 2.630 g/l el tiempo de ruptura primaria es de 53.9 segundos y si incrementamos la concentración de cobre (II) de 2.945 g/l se tiene un tiempo de separación de fases de 77.6 segundos. Por consiguiente se puede deducir que una disminución de la velocidad de coalescencia aumenta el tiempo de coalescencia.

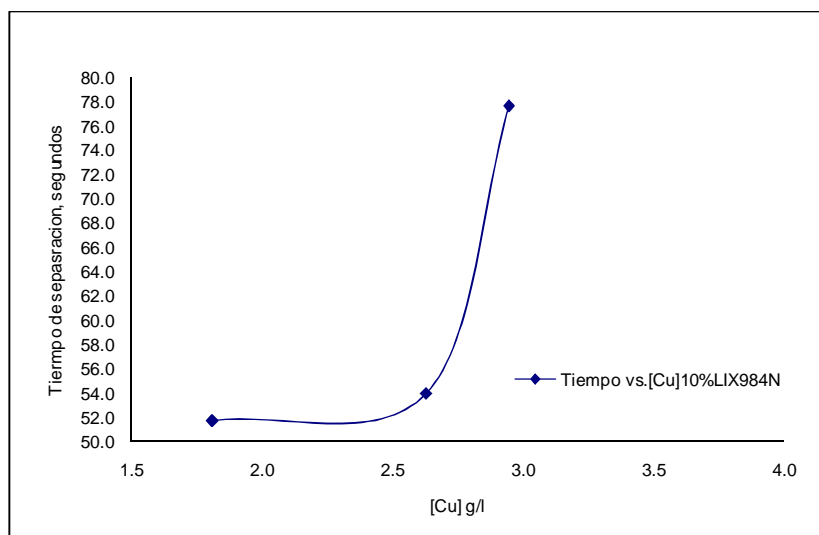


Figura 4.24 Tiempo de separación de fases a 10% Lix 984N

A continuación se muestra la tabla 4.8, donde se tiene la velocidad de coalescencia obtenida de manera experimental, el contenido de cobre y el tiempo de separación de fases calculado, de donde se puede deducir que un incremento de cobre influye de manera directa en un incremento en el tiempo de separación de fases.

Tabla 4.8 Tiempo de separación de fases a 10% Lix 984N

% Lix	[Cu] g/l	Vel Coalesc cm/s	TSF seg
10	1.811	0.173	51.7
10	2.630	0.157	53.9
10	2.945	0.142	77.6

Como se puede apreciar se pudo determinar el tiempo de separación de manera teórica y en comparación con los tiempos obtenidos de manera experimental se puede establecer la tabla 4.9 donde se puede comparar el tiempo de coalescencia.

Tabla 4.9 Tabla comparativa entre tiempo inicial y de separación de fases

Tiempo coalescencia 10% Lix 984N		
Tiempo Total, seg	Tiempo Total = TSF + To	
	To, seg	TSF, seg
62.7	11.0	51.7
66.1	12.1	53.9
91.5	13.9	77.6

A partir de la tabla 4.9 se puede deducir que la determinación del tiempo tiene cierta similitud con el determinado experimentalmente, siendo la desviación entre ambos datos por la utilización de los equipos y las dificultades existentes en la medición del tiempo de separación de fases.

4.2.3.2 Efecto a 20% Lix 984N

Como puede observarse en la figura 4.25, a medida que se incrementa el contenido de cobre en la fase orgánica, la velocidad de coalescencia disminuye; por ejemplo, en el grafico puede observarse a una concentración de cobre (II) de 3.961 g/l el tiempo de separación de fases calculado es de 99.1 segundos, mientras que a una concentración de cobre (II) de 5.571 g/l el tiempo de separación de fases es de 101.0 segundos y si incrementamos la concentración de cobre (II) de 5.99 g/l se tiene un tiempo de separación de fases de 104.1 segundos.

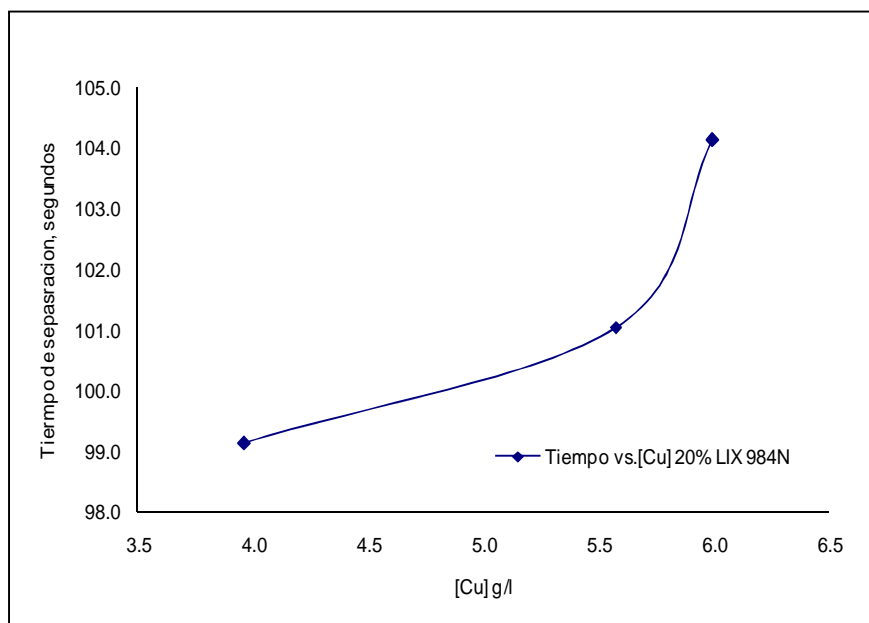


Figura 4.25 Tiempo de separación de fases a 20% Lix 984N

A continuación se muestra la tabla 4.10, donde se tiene la velocidad de coalescencia obtenida de manera experimental, el contenido de cobre y el tiempo de separación de fases calculado, de donde se puede deducir que un incremento de cobre influye de manera directa en un incremento en el tiempo de separación de fases.

Tabla 4.10 Tiempo de separación de fases a 20% Lix 984N

% Lix	[Cu] g/l	Vel Coalesec cm/s	TSF seg
20	3.961	0.944	99.1
20	5.571	0.892	101.0
20	5.990	0.809	104.1

Como se puede apreciar se pudo determinar el tiempo de separación de manera teórica y en comparación con los tiempos obtenidos de manera experimental se puede establecer la tabla 4.11 donde se puede comparar los tiempos de coalescencia.

Tabla 4.11 Tabla comparativa entre tiempo inicial y de separación de fases

Tiempo coalescencia 20% Lix 984N		
Tiempo Total, seg	Tiempo Total = TSF + To	
	To, seg	TSF, seg
128.8	29.7	99.1
134.7	33.7	101.0
149.1	45.0	104.1

A partir de la tabla se puede deducir que la determinación del tiempo tiene cierta similitud con el determinado experimentalmente, siendo la desviación entre ambos datos por la utilización de los equipos y las dificultades existentes dados en la medición del tiempo de separación de fases.

4.2.3.3 Efecto a 30% Lix 984N

Como puede observarse en la figura 4.26, a medida que se incrementa el contenido de cobre en la fase orgánica, la velocidad de coalescencia disminuye; por ejemplo, en el grafico puede observarse a una concentración de cobre (II) de 4.04 g/l el tiempo de

separación de fases calculado es de 160.7 segundos, mientras que a una concentración de cobre (II) de 6.614 g/l el tiempo de separación de fases es de 285.1 segundos y si incrementamos la concentración de cobre (II) de 7.655 g/l se tiene un tiempo de separación de fases de 375.5 segundos.

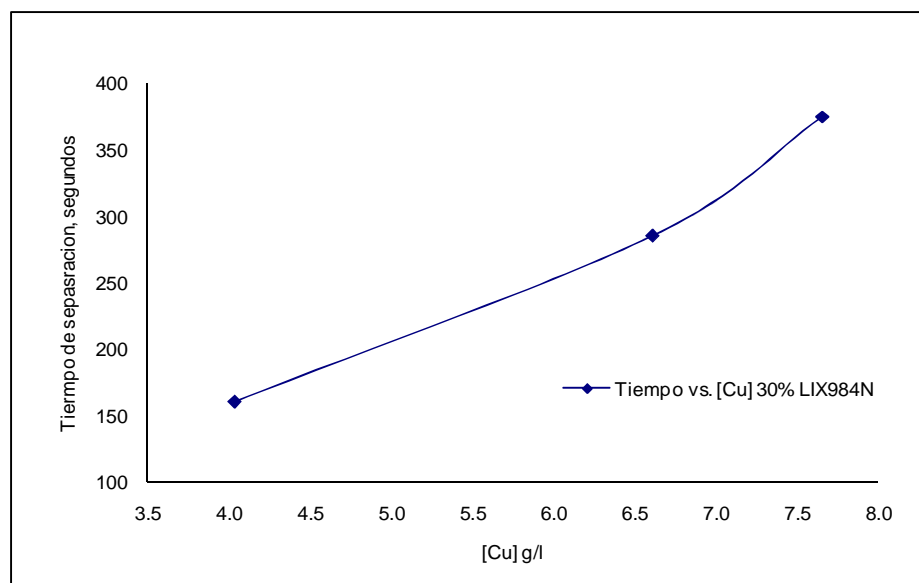


Figura 4.26 Tiempo de separación de fases a 30% Lix 984N

A continuación se muestra la tabla 4.12, donde se tiene la velocidad de coalescencia obtenida de manera experimental, el contenido de cobre y el tiempo de separación de fases calculado, de donde se puede deducir que un incremento de cobre influye de manera directa en un incremento en el tiempo de separación de fases.

Tabla 4.12 Tiempo de separación de fases a 30% Lix 984N

% Lix	[Cu] g/l	Vel Coalesec cm/s	TSF seg
30	4.040	0.672	160.7
30	6.614	0.590	285.1
30	7.655	0.586	375.5

Como se puede apreciar se pudo determinar el tiempo de separación de manera teórica y en comparación con los tiempos obtenidos de manera experimental se puede establecer la tabla 4.13 donde se puede comparar los tiempos de coalescencia.

Tabla 4.13 Tabla comparativa entre tiempo inicial y de separación de fases

Tiempo coalescencia 30% Lix 984N		
Tiempo total, seg	Tiempo total = TSF + To	
	To. seg	TSF, seg
190.5	29.8	160.7
316.2	31.2	285.1
421.5	46.0	375.5

A partir de la tabla se puede deducir que la determinación del tiempo tiene cierta similitud con el determinado experimentalmente, siendo la desviación entre ambos datos por la utilización de los equipos y las dificultades existentes dados en la medición del tiempo de separación de fases.

4.2.4 Efecto del % de extractante en la separación de fases

Uno de los parámetros estudiados está relacionado con la influencia del porcentaje de extractante dentro de la fase orgánica, para lo cual variamos el porcentaje dentro de un rango apropiado el cual fue determinado en función a datos operacionales obtenidos de diversos complejos metalúrgicos, los cuales nos permitieron determinar el rango dentro del cual se mueven los mencionados valores.

Como puede apreciarse en la figura 4.27, se aprecia el efecto que produce el aumento en el %v/v de extractante, en la medición del tiempo de ruptura primaria ya que a

medida que nosotros incrementamos el porcentaje de extractante dentro de la fase orgánica podemos determinar su influencia en el proceso de extracción por solventes.

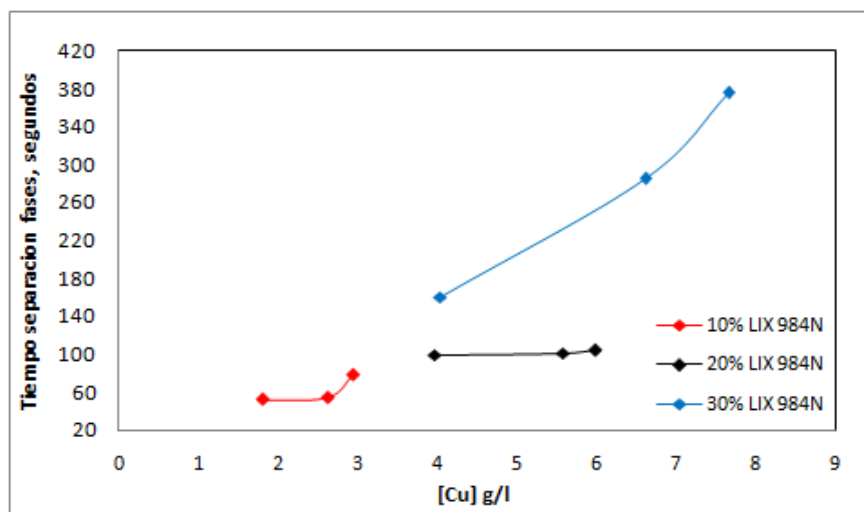


Figura 4.27 Efecto del porcentaje de extractante en el tiempo de separación de fases

Por ejemplo, se realizaron 3 cargas consecutivas con cada fase orgánica a fin de analizar su influencia en el tiempo de separación de fases y se obtuvo que con 10% v/v de extractante a 1.811 g/l de cobre (II), el tiempo de ruptura calculado es de 51.7 segundos, si se aumenta la concentración a 2.63 g/l de cobre(II), el tiempo de separación de fases calculado aumenta a 53.9 segundos y si al aumentar la concentración a 2.945 g/l de cobre (II), el tiempo de ruptura primaria calculada es 77.6 segundos.

Si analizamos la segunda carga se observa que con 20% v/v de extractante a 3.961 g/l de cobre (II), el tiempo de ruptura es 99.1 segundos, al aumentar la concentración

a 5.571 g/l, el tiempo de ruptura es de 101.0 segundos en la separación de fases. Finalmente para 5.99 g/l de cobre (II), el tiempo de ruptura es de 104.1 segundos.

Finalmente la tercera carga se observa que con 30% v/v de extractante a 4.04 g/l de cobre (II), el tiempo de ruptura es 160.7 segundos, al aumentar la concentración a 6.614 g/l de cobre (II), el tiempo de ruptura es de 285.1 segundos en la separación de fases. Finalmente para 7.655 g/l de cobre (II), el tiempo de ruptura es de 375.5 segundos.

A partir de lo descrito se puede observar también que a medida que nosotros incrementamos el porcentaje de extractante los tiempos de ruptura primaria se incrementan siendo notorio en 30% v/v, donde en comparación con 10% v/v se observa que el tiempo de separación de fases se incremento en casi 100% por lo que este parámetro es importante a la hora de dimensionar los sedimentadores.

4.3 Efecto de la temperatura en la separación de fases

4.3.1 Influencia de las propiedades físicas en la velocidad de coalescencia

Las propiedades físicas son dependientes de la temperatura por lo que un incremento de las mismas o su disminución afectan de manera directa a las propiedades objeto del estudio. De acuerdo a lo obtenido se pudo correlacionar las propiedades físicas con la velocidad de coalescencia a fin de obtener una ecuación la cual nos permita poder predecir el comportamiento del mismo en función a las propiedades físicas. El cálculo de la velocidad de coalescencia en función a la temperatura con la cual se

trabaja es posible teniendo como base los valores medidos de las propiedades físicas involucradas directamente en dicho cálculo.

4.3.2 Efecto a 10% Lix 984N

En el caso de 10% Lix 984N se pudo observar que a medida que se incrementaba la temperatura las propiedades físicas tales como viscosidad, densidad y tensión interfacial disminuían y en otros casos aumentaban por encima a la temperatura del medio ambiente ($> 20^{\circ}\text{C}$). A continuación la tabla 4.14 muestra el efecto causado por efecto de la temperatura.

Tabla 4.14 Tabla resumen de las propiedades físicas en función a la temperatura a 10% Lix 984N

% Lix	[Cu]	Viscosidad (cp)		Densidad (Kg/m^3)		Tension Interfacial	Temperatura $^{\circ}\text{C}$	Vel coalesc. cm/seg
		Orgánico	Acuoso	Orgánico	Acuoso			
10	1.8135	2.57	1.08	830.00	1011.50	22.25	5	0.121
10	1.8135	2.41	1.04	827.58	1011.00	21.83	10	0.130
10	1.8135	2.27	1.02	822.00	1010.00	21.75	20	0.148
10	1.8135	2.15	1.02	815.88	1007.67	22.04	30	0.167
10	1.8135	2.04	1.01	811.33	1005.00	22.29	40	0.187
10	2.6301	2.67	1.08	832.00	1011.50	22.29	5	0.111
10	2.6301	2.54	1.04	829.50	1011.00	22.17	10	0.125
10	2.6301	2.38	1.02	824.00	1010.00	22.00	20	0.141
10	2.6301	2.29	1.02	817.75	1007.67	22.50	30	0.162
10	2.6301	2.19	1.01	813.25	1005.00	22.75	40	0.176
10	2.945	2.67	1.08	832.00	1011.50	22.29	5	0.105
10	2.945	2.54	1.04	829.50	1011.00	22.17	10	0.114
10	2.945	2.38	1.02	824.00	1010.00	22.00	20	0.127
10	2.945	2.29	1.02	817.75	1007.67	22.50	30	0.152
10	2.945	2.19	1.01	813.25	1005.00	22.75	40	0.171

Como puede observarse las propiedades físicas varían en función a la temperatura en el caso del orgánico ya que el incremento de cobre en la fase permite una variación de las propiedades inicialmente medidas. En el caso del acuoso téngase presente que es la misma que es contactada con la fase orgánica por lo que sus propiedades físicas son repetidas.

4.3.2.1 Efecto a 20% Lix 984N

En el caso de 20% Lix 984N se pudo observar que a medida que se incrementaba la temperatura las propiedades físicas tales como viscosidad, densidad y tensión interfacial disminuían y en otros casos aumentaban por encima a la temperatura del medio ambiente ($> 20^{\circ}\text{C}$). A continuación se muestra en la tabla 4.15.

Tabla 4.15 Tabla resumen de las propiedades físicas en función a la temperatura a 20% Lix 984N

% Lix	[Cu ⁺²]	Viscosidad (cp)		Densidad (Kg/m ³)		Tension Interfacial	Temperatura °C	Vel coalesc. cm/seg
		Orgánico	Acuoso	Orgánico	Acuoso			
20	3.9606	3.13	1.15	838.17	1022.50	20.21	5	0.072
20	3.9606	2.89	1.10	835.00	1022.00	19.63	10	0.082
20	3.9606	2.68	1.04	830.50	1020.50	18.96	20	0.093
20	3.9606	2.59	1.03	824.75	1018.33	19.88	30	0.104
20	3.9606	2.46	1.01	820.00	1015.50	20.21	40	0.118
20	5.5708	3.22	1.15	846.67	1022.50	20.54	5	0.072
20	5.5708	3.02	1.10	843.83	1022.00	20.29	10	0.081
20	5.5708	2.83	1.04	838.00	1020.50	19.75	20	0.089
20	5.5708	2.71	1.03	832.50	1018.33	20.38	30	0.101
20	5.5708	2.61	1.01	825.50	1015.50	20.75	40	0.111
20	5.9901	3.32	1.15	850.17	1022.50	20.38	5	0.071
20	5.9901	3.10	1.10	847.17	1022.00	20.00	10	0.077
20	5.9901	2.91	1.04	841.25	1020.50	19.79	20	0.0806
20	5.9901	2.82	1.03	835.38	1018.33	20.25	30	0.097
20	5.9901	2.72	1.01	829.67	1015.50	20.46	40	0.105

Como puede observarse las propiedades físicas varían en función a la temperatura en el caso del orgánico ya que el incremento de cobre en la fase permite una variación de las propiedades inicialmente medidas. En el caso del acuoso téngase presente que es la misma que es contactada con la fase orgánica por lo que sus propiedades físicas (densidad y viscosidad) son repetidas.

4.3.2.2 Efecto a 30% Lix 984N

En el caso de 30% Lix 984N se pudo observar que a medida que se incrementaba la temperatura las propiedades físicas tales como viscosidad, densidad y tensión

interfacial disminuían y en otros casos aumentaban por encima a la temperatura del medio ambiente ($> 20^{\circ}\text{C}$). A continuación se muestra la tabla 4.16 donde se puede apreciar ese efecto causado por efecto de la temperatura.

Tabla 4.16 Tabla resumen de las propiedades físicas en función a la temperatura a 30% Lix 984N

% Lix	[Cu ⁺²]	Viscosidad (cp)		Densidad (Kg/m ³)		Tension Interfacial	Temperatura °C	Vel coalesc. cm/seg
		Orgánico	Acuoso	Orgánico	Acuoso			
30	4.0397	3.66	1.15	846.00	1022.50	19.25	5	0.051
30	4.0397	3.42	1.10	844.00	1022.00	18.75	10	0.056
30	4.0397	3.16	1.04	839.13	1020.50	18.54	20	0.067
30	4.0397	3.07	1.03	833.38	1018.33	19.25	30	0.075
30	4.0397	2.96	1.01	828.33	1015.50	19.50	40	0.082
30	6.6137	3.89	1.15	855.00	1022.50	19.92	5	0.045
30	6.6137	3.59	1.10	852.33	1022.00	19.42	10	0.049
30	6.6137	3.29	1.04	847.13	1020.50	19.08	20	0.061
30	6.6137	3.18	1.03	841.63	1018.33	19.75	30	0.067
30	6.6137	3.05	1.01	835.17	1015.50	20.00	40	0.075
30	7.655	3.97	1.15	861.17	1022.50	20.38	5	0.041
30	7.655	3.69	1.10	858.33	1022.00	20.00	10	0.044
30	7.655	3.38	1.04	852.75	1020.50	19.79	20	0.057
30	7.655	3.23	1.03	846.88	1018.33	20.25	30	0.060
30	7.655	3.12	1.01	840.83	1015.50	20.46	40	0.066

Como puede observarse las propiedades físicas varían en función a la temperatura en el caso del orgánico ya que el incremento de cobre en la fase permite una variación de las propiedades inicialmente medidas. En el caso del acuoso téngase presente que es la misma que es contactada con la fase orgánica por lo que sus propiedades físicas (densidad y viscosidad) son repetidas.

4.3.3 Influencia de la temperatura en la velocidad de coalescencia

A partir de lo mostrado, podemos partir teniendo como premisa la correlación entre la velocidad de coalescencia y las propiedades físicas, como se puede apreciar a continuación:

$$\frac{v_d \cdot \mu_c}{\gamma} = 1.632 \times \left(\frac{\mu_d}{\mu_c} \right)^{-0.60} \left(\frac{\gamma_r}{\gamma} \right)^{0.33} \left(\frac{\Delta \rho}{\rho_c} \right)^{1.57} \dots\dots\dots (4.4)$$

Por lo que si las propiedades físicas son afectadas directamente por la temperatura y habiéndose determinado las propiedades físicas a diversas temperaturas, entonces podemos determinar un valor aproximado de la velocidad de coalescencia en función a ella, a continuación se hace un análisis a cada porcentaje de extractante para ver el desenvolvimiento de la velocidad en función a la temperatura y el porcentaje.

4.3.3.1 Efecto a 10 % Lix 984N

Se puede determinar de acuerdo a lo mostrado en la tabla 4.17 que a medida que la temperatura se incrementa la velocidad de coalescencia es incrementada.

Tabla 4.17 Velocidades de coalescencia para 10% Lix 984N

% Lix	[Cu ⁺²]	Temperatura °C	Vel coalesc. cm/s
10	1.8135	5	0.12
10	1.8135	10	0.13
10	1.8135	20	0.15
10	1.8135	30	0.17
10	1.8135	40	0.19
10	2.6301	5	0.11
10	2.6301	10	0.12
10	2.6301	20	0.14
10	2.6301	30	0.16
10	2.6301	40	0.18
10	2.945	5	0.10
10	2.945	10	0.11
10	2.945	20	0.13
10	2.945	30	0.15
10	2.945	40	0.17

Existe la observación de que el incremento de cobre en la fase orgánica genera una disminución paulatina de dichos valores como se puede apreciar en la figura 4.28

donde se hace un comparativo entre los valores de la velocidad de coalescencia obtenidas a partir de la correlación obtenida paginas arriba, con lo cual una vez mas se corrobora que el contenido de cobre en la fase orgánica incide de manera directa en la fase de separación de fases indistinta a un incremento o no de la temperatura.

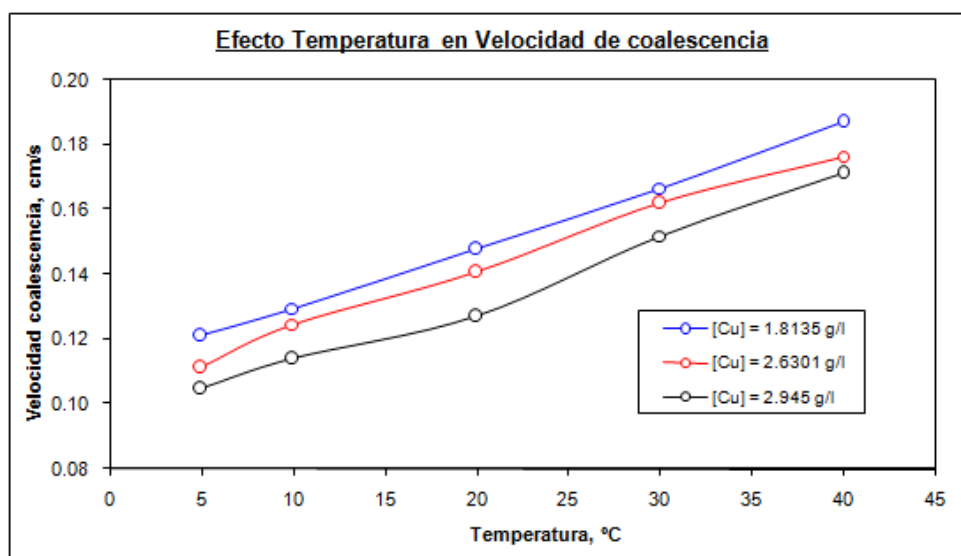


Figura 4.28 Efecto de la temperatura en la velocidad de coalescencia calculada

De acuerdo a lo observado se puede deducir que a mayor temperatura se da una mayor separación de fases pero obviamente se debe tener en cuenta que a mayores temperaturas el efecto que puede incidir de manera directa en su disminución de su capacidad extractante y variación de densidades.

4.3.3.2 Efecto a 20 % Lix 984N

Se puede determinar de acuerdo a lo mostrado en la tabla 4.17 que a medida que la temperatura se incrementa la velocidad de coalescencia es incrementada.

Tabla 4.18 Velocidades de coalescencia para 20% Lix 984N

% Lix	[Cu]	Temperatura °C	Vel coalesc. cm/s
20	3.9606	5	0.072
20	3.9606	10	0.082
20	3.9606	20	0.093
20	3.9606	30	0.104
20	3.9606	40	0.118
20	5.5708	5	0.072
20	5.5708	10	0.081
20	5.5708	20	0.089
20	5.5708	30	0.101
20	5.5708	40	0.111
20	5.9901	5	0.071
20	5.9901	10	0.077
20	5.9901	20	0.081
20	5.9901	30	0.097
20	5.9901	40	0.105

A primera vista se nota que el incremento de cobre en la fase orgánica genera una disminución paulatina de dichos valores como se puede apreciar en la figura 4.29 donde se hace un comparativo entre los valores de la velocidad de coalescencia obtenidas a partir de la correlación obtenida paginas arriba, con lo cual una vez mas se corrobora que el contenido de cobre en la fase orgánica incide de manera directa en la fase de separación de fases indistinta a un incremento o no de la temperatura.

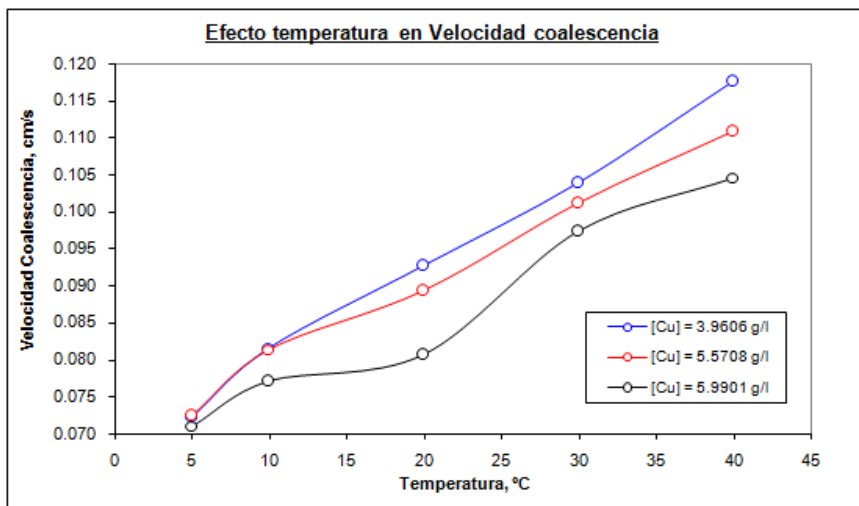


Figura 4.29 Efecto de la temperatura en la velocidad de coalescencia calculada

De acuerdo a lo observado se puede deducir que a mayor temperatura se da una mayor separación de fases pero obviamente se debe tener en cuenta que a mayores temperaturas el efecto que se puede dar entorno a los reactivos orgánicos puede incidir de manera directa en su descomposición.

4.3.3.3 Efecto a 30 % Lix 984N

Se puede determinar de acuerdo a lo mostrado en la tabla 4.18 que a medida que la temperatura se incrementa la velocidad de coalescencia es incrementada.

Tabla 4.19 Velocidades de coalescencia para 30% Lix 984N

% Lix	[Cu ⁺²]	Temperatura °C	Vel coalesc. cm/s
30	4.0397	5	0.051
30	4.0397	10	0.056
30	4.0397	20	0.067
30	4.0397	30	0.075
30	4.0397	40	0.082
30	6.6137	5	0.045
30	6.6137	10	0.049
30	6.6137	20	0.061
30	6.6137	30	0.067
30	6.6137	40	0.075
30	7.655	5	0.041
30	7.655	10	0.044
30	7.655	20	0.057
30	7.655	30	0.060
30	7.655	40	0.066

A primera vista se nota que el incremento de cobre en la fase orgánica genera una disminución paulatina de dichos valores como se puede apreciar en la figura 4.30 donde se hace un comparativo entre los valores de la velocidad de coalescencia obtenidas a partir de la correlación obtenida paginas arriba, con lo cual una vez mas se corrobora que el contenido de cobre en la fase orgánica no incide de manera directa en la fase de separación de fases a diferencia de la temperatura.

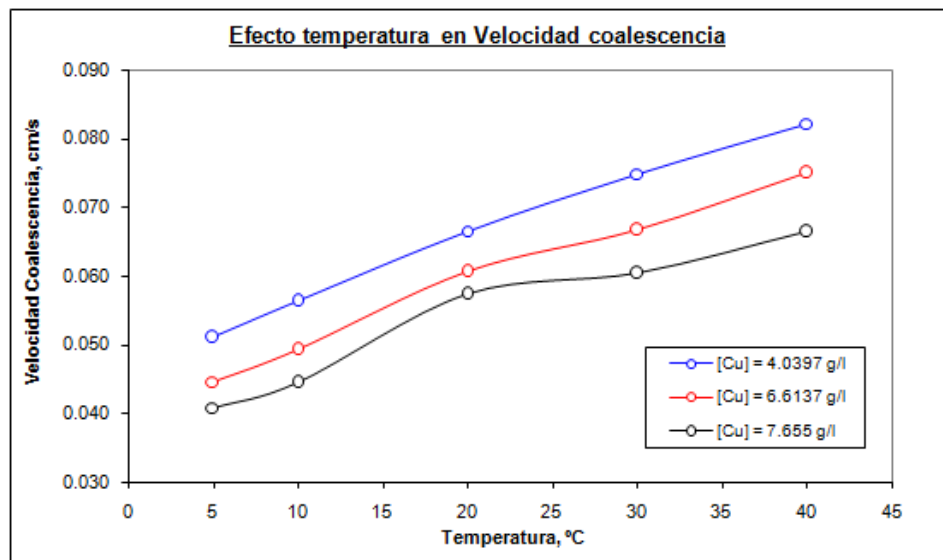


Figura 4.30 Efecto de la temperatura en la velocidad de coalescencia calculada

De acuerdo a lo observado se puede deducir que a mayor temperatura se da una mayor separación de fases no siendo muy claro ya el efecto de la concentración de cobre en el orgánico.

4.4 Estudios del efecto del % de extractante en la generación de arrastres A/O

4.4.1 Influencia de la concentración de cobre y porcentaje de extractante (% v/v) en la fase orgánica

A continuación, en la figura 4.31, se observa el arrastre A/O (acuoso en orgánico), en función de la concentración de cobre en el orgánico, la fase orgánica que se contactó contenía 10, 20 y 30% v/v de extractante Lix 984N.

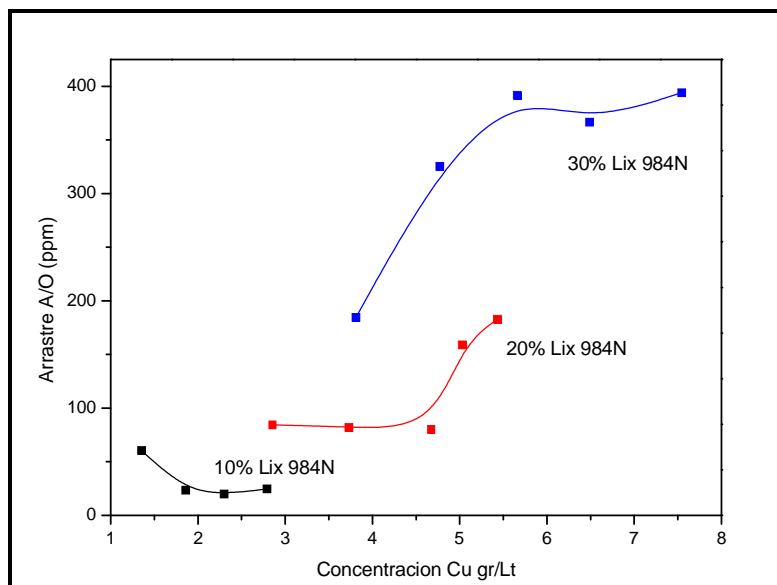


Figura 4.31 Efecto del % de extractantes y concentración de cobre en el arrastre A/O

A primera vista se observa un aumento notorio del arrastre de acuoso en orgánico a mayores concentraciones de cobre (II) así como con el porcentaje de extractante; por ejemplo, para 10% v/v de extractante y una concentración de 2.30 g/l de cobre (II), el arrastre de A/O es de 19.88 ppm; a diferencia que para 20% v/v de extractante y una concentración de 4.67 g/l de cobre (II), el arrastre de A/O aumenta a 80.29 ppm. Finalmente para 30% v/v de extractante y una concentración de 7.54 g/l de cobre (II), el arrastre de A/O aumento a 393.919 ppm.

Al comparar las curvas obtenidas, se observa que el arrastre de acuoso en orgánico es mayor cuando se trabajó a 30% v/v de extractante y obviamente una mayor concentración de cobre en el sistema.

Las curvas obtenidas no son lineales pero muestran una tendencia a incrementar su valor a medida que se incrementa la concentración de cobre (II) en la fase orgánica además que el incremento del porcentaje de extractante también influye de manera directa.

4.4.2 Influencia de la velocidad de coalescencia

A continuación, en la figura 4.32, se observa el arrastre de A/O en función de la velocidad de coalescencia, la fase orgánica que se contactó contiene 10, 20 y 30% v/v de extractante Lix 984N.

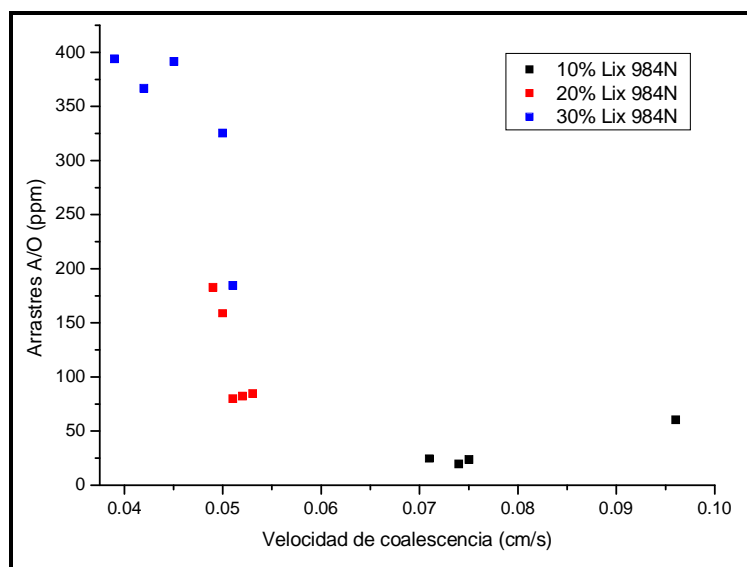


Figura 4.32 Efecto de la velocidad de coalescencia en el arrastre de O/A

Al igual que en la figura anterior, se observa claramente el aumento del arrastre de A/O a medida que aumenta la concentración de cobre en el orgánico; por ejemplo para 10% v/v de extractante y una concentración de 2.30 g/l cobre (II), el arrastre de A/O es 19.88 ppm y la velocidad de coalescencia es de 0.096 cm/s; si aumentamos a

20% v/v de extractante y una concentración de cobre (II) de 4.67 g/l; el arrastre aumenta notoriamente a 80.29 ppm y la velocidad de coalescencia disminuye a 0.049 cm/s. Finalmente, a 30% v/v de extractante y una concentración de cobre (II) de 7.54 g/l; el arrastre aumenta notoriamente a 393.919 ppm y la velocidad de coalescencia disminuye a 0.04 cm/s.

4.4.3 Influencia del tiempo de separación de fases (ruptura primaria)

A partir de los resultados obtenidos podemos determinar la incidencia del tiempo de separación de fases en la generación de arrastres ya el incremento del tiempo de ruptura se incrementa y la generación de arrastres A/O también aumenta de acuerdo a la figura 4.33.

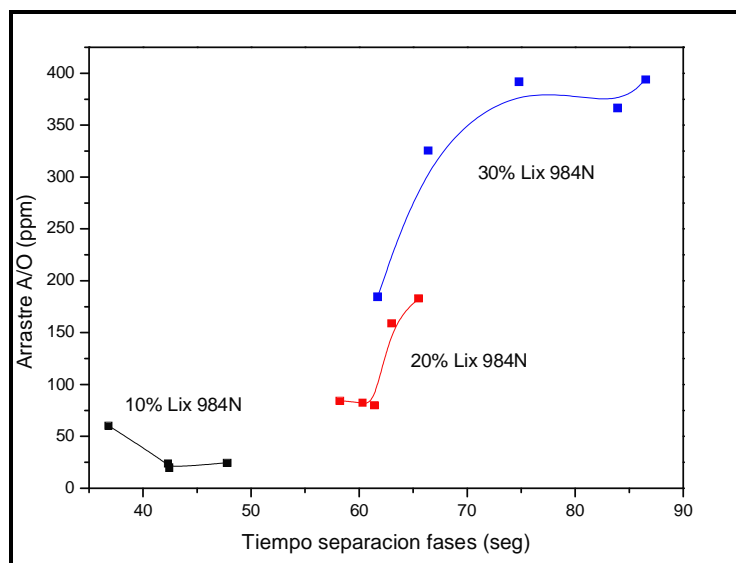


Figura 4.33 Efecto del tiempo de separación en la generación de arrastre A/O

En la Figura 4.33, se observa claramente el aumento del arrastre de A/O a medida que aumenta el tiempo de separación de fases; por ejemplo para 10% v/v de

extractante y una concentración de 2.30 g/l cobre (II), el tiempo de separación de fases fue de 42.4 segundos; si aumentamos a 20% v/v de extractante y una concentración de cobre (II) de 4.67 g/l; el tiempo de separación de fases fue de 61.4 segundos. Finalmente, a 30% v/v de extractante y una concentración de cobre (II) de 7.54 g/l; el tiempo de separación de fases fue de 86.5 segundos.

4.4.4 Influencia de las propiedades físicas

Como se mencionó al inicio, las propiedades físicas tienen un efecto directo en el desenvolvimiento del proceso de extracción por solventes, como se pudo mostrar páginas arriba, las propiedades físicas que inciden en el proceso son la viscosidad, densidad y la tensión interfacial entre ambos líquidos. En esta parte se analizará de manera directa la incidencia de las propiedades físicas con la generación de arrastres A/O a fin de poder entender y poder generar una correlación entre las propiedades físicas y los arrastres que se generan a partir de las pruebas realizadas.

4.4.4.1 Efecto de la viscosidad

Como se puede apreciar en la figura 4.34, a medida que nosotros incrementamos el contenido de cobre (II) en la fase orgánica, mayor será la viscosidad de dicha fase y obviamente un incremento en la generación de arrastres A/O es obtenida. Se puede deducir que a primera vista que en ocasiones ocurren problemas de solubilidad del complejo extraído en la fase orgánica a medida que el metal o complejo metálico es capturado y extraído por el reactivo orgánico fresco, el cual al irse cargando introduce una molécula mucho más grande al sistema constituido por la fase orgánica.

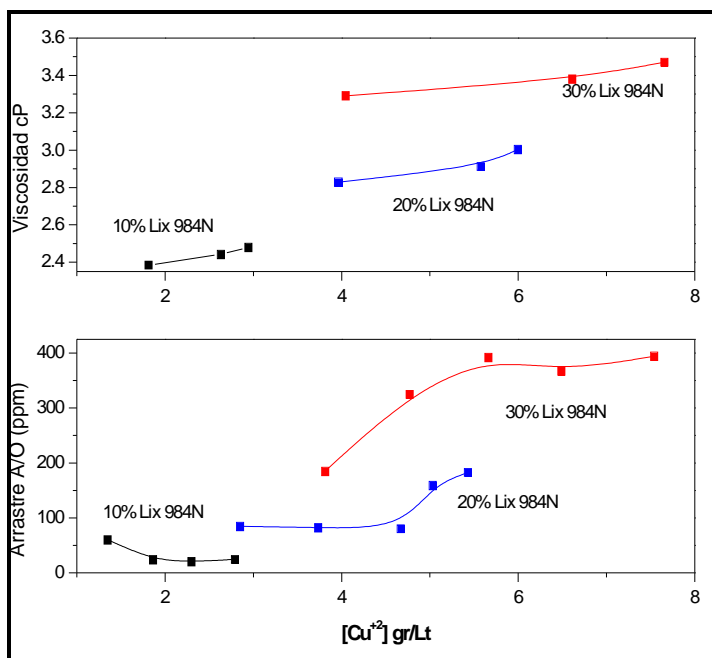


Figura 4.34 Grafico comparativo entre viscosidad y arrastre A/O ppm

Esto se refleja en un aumento de la viscosidad de la fase orgánica ya que este complejo no es fácilmente disuelto en la fase orgánica y a veces, a causa de este problema de solubilidad ocurren saturaciones que provocan la formación de una tercera fase indeseada y conflictiva en el sistema SX, influyendo de manera directa sobre la generación de arrastres en incremento de las mismas dentro del sistema.

4.4.4.2 Efecto de la densidad

Como se puede apreciar en la figura 4.35, a medida que incrementamos el contenido de cobre (II) en la fase orgánica, mayor será la densidad de dicha fase y obviamente la generación de arrastres A/O se incrementa.

Un postulado ampliamente aceptado es que las diferencias de gravedad entre las fases son de primordial importancia para la velocidad de separación de fases y en el extremo de los casos, cuando es muy pequeño, problemas severos de separación de fases pueden ser encontrados. Para todos los otros parámetros constantes, la velocidad de separación de fases se incrementaría con un aumento en la diferencia en gravedad específica entre las fases.

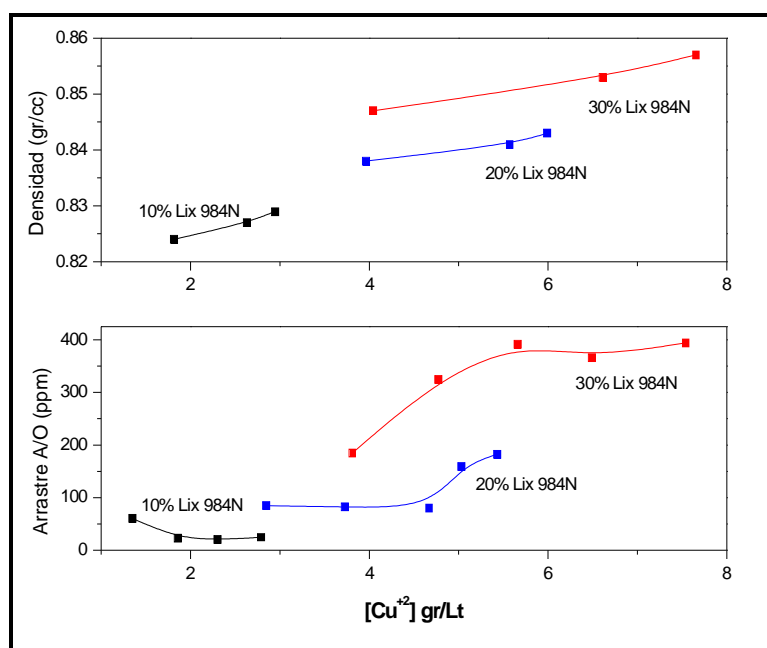


Figura 4.35 Grafico comparativo entre densidad y arrastre A/O ppm

En el caso concreto de la densidad, se pudo apreciar que la sensibilidad de la densidad en el proceso de extracción por solventes no era muy alta por lo que se podía concluir a primera vista que su variación con un incremento de la concentración de cobre (II) y la temperatura no era tan marcado como en el caso de la viscosidad donde se podía apreciar variación final por encima del 30% en función

a su valor inicial. La velocidad de separación de fases depende simultáneamente de la coalescencia y los procesos de sedimentación. En el caso extremo, las fuerzas repulsivas pueden ser lo suficientemente fuertes para hacer estable una emulsión de fases con una alta diferencia de gravedad específica, como ellos pueden actuar contrariamente a las fuerzas de gravedad y prevenir que las gotas estén más juntas y se produzca la coalescencia.

4.4.4.3 Efecto de la tensión interfacial

Como se puede apreciar en la figura 4.36, a medida que incrementamos el contenido de cobre (II) en la fase orgánica, mayor será la tensión interfacial inicial obtenida entre ambas fases y obviamente la generación de arrastres A/O será mayor a medida que dicho valor aumente.

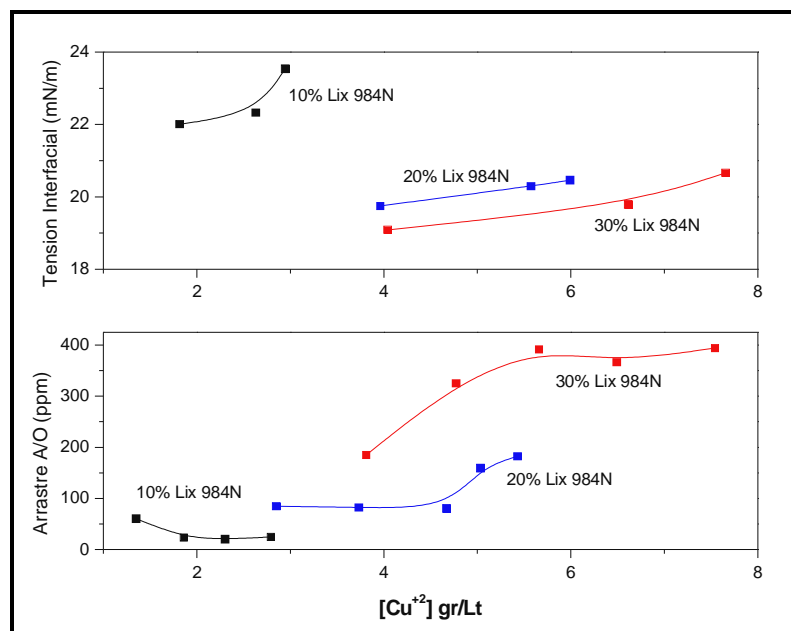


Figura 4.36 Grafico comparativo entre tensión interfacial y arrastre A/O ppm

Se puede apreciar que a medida que nosotros incrementamos el porcentaje de extractante disminuye la tensión interfacial, la explicación puede estar dada ya que debido a que se incrementa el porcentaje de extractante, el poder del mismo aumenta por lo que la fuerza necesaria para incrementar el área de contacto disminuye, provocando una mayor rápida la ruptura y por ende un mayor incremento del área de contacto que se genera por el incremento del extractante.

CONCLUSIONES

El efecto de las propiedades físicas en el arrastre de fases en el proceso de extracción por solventes fue investigado, siendo el objetivo principal de este estudio el de tener un mejor entendimiento sobre la influencia de las propiedades físicas en la velocidad de separación de fases en el proceso.

Esto fue direccionado en:

- 1- La revisión de artículos e información relacionada a la extracción por solventes
- 2- Determinar las variables que afectan el proceso de extracción por solventes.
- 3- Identificar las variables que dentro del sistema son más sensibles al cambio de la temperatura.
- 4- Generar datos suficientes que nos permitan el poder analizar las variables involucradas en el proceso de separación de fases.
- 5- Contribuir a un mejor entendimiento del proceso de extracción por solventes así como las variables que influyen directamente en la separación de fases (velocidad de coalescencia).

Los resultados obtenidos del presente informe se pueden resumir en las siguientes conclusiones:

- Las propiedades físicas tienen un efecto directo en el desenvolvimiento del proceso de extracción por solventes, se encontró una correlación entre las propiedades físicas y la velocidad de coalescencia que determinó que dichas propiedades inciden en la lentitud o rapidez en el proceso de separación de fases.
- Las propiedades físicas son afectadas directamente por parámetros tales como temperatura, concentración de cobre en el caso de las soluciones acuosas y el porcentaje de extractante en el caso de la solución orgánica.
- Un incremento notorio de las propiedades físicas se da directamente en la fase orgánica por:
 - El incremento del porcentaje de extractante en la fase orgánica
 - Una disminución de la temperatura
 - El incremento de la concentración de cobre en orgánico
- Se puede observar un fenómeno presente en la tensión interfacial en función a la temperatura conocida como “Inversión de fase”, la cual esta en relación directa a la viscosidad de la fase orgánica que es sensible a la temperatura.
- Se analizó el efecto de la temperatura durante la medición colocando en contacto las soluciones a una misma temperatura antes de su agitación y se observó un descenso en la medición de la tensión interfacial a temperatura ambiente (22 °C) dentro de un rango de medición entre 5 °C y 40 °C, la cual es debido a que a bajas temperaturas la fase orgánica posee una baja

solubilidad debido a su alta viscosidad, lo que permite que la interfaz liquido-liquido tenga un mayor contenido de solución acuosa que a medida que la temperatura se incrementa mayor contenido de fase orgánica esta presente en la interfaz produciendo un fenómeno conocido como inversión de fase lo cual su punto mínimo es observado aproximadamente a la temperatura ambiente donde la proporción entre la fase acuosa y orgánica es de aproximadamente 1.

- En el perfil de coalescencia de la fase dispersa (acuoso) se puede observar que un incremento del contenido de cobre y porcentaje de extractante los tiempos de coalescencia se ven incrementados.
- Por ejemplo, a 10% Lix 984N en el primer contacto se obtuvo una concentración de cobre de 1.811 g/l y una velocidad de coalescencia de 0.148 cm/s, si incrementamos a 20% Lix 984N, en el primer contacto se obtuvo una concentración de cobre de 3.961 g/l y una velocidad de coalescencia de 0.926 cm/s, finalmente a 30% Lix 984N en un primer contacto se obtuvo una concentración de cobre de 4.04 g/l y una velocidad de coalescencia de 0.068 cm/s.
- La problemática mencionada antes influye directamente en la velocidad de coalescencia de la fase dispersada y el incremento de las propiedades físicas, lo cual confluye en una correlación matemática entre ambas.
- En el caso de arrastres de A/O y separación de fases se observa la influencia de parámetros tales como el porcentaje de extractante y el contenido de cobre en la fase orgánica, ya que un incremento en ambos casos permite el incremento de arrastre de acuoso en el orgánico disminuyendo en consecuencia la velocidad de coalescencia de dicha fase.

- Para el caso específico de la concentración de cobre, se ha observado que a mayor concentración el arrastre A/O generado es mayor por lo que se puede deducir que esto está íntegramente ligado al tamaño de molécula organo-metálica y a la velocidad de coalescencia, la cual al ser de mayor diámetro que la molécula original genera un problema de solubilidad el cual al ser de mayor tamaño incrementa los tiempos de separación y los arrastres de acuoso dentro de la fase orgánica.
- A medida que el valor de las propiedades físicas se incrementa, mayor será la generación de arrastres, lo cual nos da una idea de la incidencia de las propiedades físicas antes mencionadas. Es por lo tanto, que dichas propiedades deben ser controladas inicialmente antes de dar paso al proceso en sí para poder disminuir los arrastres que se generan y así poder minimizar los arrastres y reducir la contaminación por un incremento paulatino de las impurezas generadas en el proceso de lixiviación.

BIBLIOGRAFIA

1. J. Golob and R. Modic. 1977. Coalescence of liquid/liquid dispersions in gravity settlers - Trans I ChemE, Vol 55, pp 208.
2. S.A.K. Jeelani and S. Hartland.1998. Effect of Dispersion Properties on the Separation of Batch liquid-liquid Dispersions - Ind. Eng. Chem. Res, Vol. 37, 547-554
3. Corinne Nadiv and Raphael Semiat. 1995. Batch settling of liquid-liquid, Ind. Eng. Chem. Res., Vol. 34, 2427-2435
4. K. Staszak, K. Prochaska. 2004. Interfacial activity of copper (II) complexes with chelating ligand and individual hydrophobic extractants in model extraction system, Journal of Colloid and Interface Science. Vol. 80, N°1, pp. 184-191.
5. Y. Hoh, et al. 1986. Interfacial tension studies on the extraction of Lanthanum by D2EHPA. Hydrometallurgy, Vol. 15, N° 3, pp. 381-390.
6. H. Kim and D. Burges. 2001. Prediction of interfacial tension between oil mixtures and water, Journal of colloid and interface Science”, Vol. 241, N°2, pp. 509-513.
7. Z. Liand Y. Lu. 2002. Prediction of interfacial tension between organic solvent and aqueous solutions of mixed electrolytes, Fluid Phase Equilibrium, Vol. 200, N°2, pp. 239-250.
8. P. Navarro. 2001. Extracción por Solventes de Cobre, Universidad de Santiago de Chile, pp. 22-25.

9. Andrés Reghezza. 1987. Fundamentos y aplicaciones de Extracción por Solventes, Universidad de Concepción.
10. Andrés Reghezza. 1987. Teoría y práctica de Extracción por Solventes, Universidad de Concepción.
11. Esteban Domic, 2001. Hidrometalurgia fundamentos, procesos y aplicaciones – 1ra Edición, pp. 445 – 521.
12. P. Navarro, G. Cifuentes. 2001. Extracción por Solventes y Electrometalurgia del Cobre, Universidad de Santiago, pp. 22-23.