

Efecto de la concentración de cobalto sobre el tiempo de residencia en la etapa de purificación caliente de la Refinería Electrolítica de Zinc de San Luis potosí

Luis Falcón, Heberto Ortiz-Vazquez

Departamento de Metalurgia, Refinería Electrolítica de Zinc, Grupo México Minería calle oro 555 Fraccionamiento Morales San Luis Potosí, S.L.P.

Instituto de Metalurgia UASLP. Av. Sierra Leona 550, Lomas de San Luis, 78210 San Luis, S.L.P.

*hberto.ortiz@mmgmexico.com

RESUMEN.

El presente estudio fue elaborado con el objetivo de estimar el incremento en el tiempo de residencia de soluciones de la etapa de purificación caliente en la Refinería Electrolítica de Zinc (REZ) de San Luis potosí, con alto contenido de cobalto. Para esto se determinó la cinética de cementación de cobalto por medio del método integral, en soluciones del proceso de purificación en 3 diferentes concentraciones de cobalto 50, 80 y 150 ppm, se utilizó polvo de zinc en presencia de trióxido de arsénico y cobre para reducir la concentración de cobalto a un máximo de 0.2 ppm. Se determinó el aumento en el consumo de trióxido de arsénico y polvo de zinc a medida que se incrementó la concentración de cobalto en la solución. El estudio cinético demostró un rápido descenso en la concentración de cobalto en los primeros 20 minutos de reacción independiente a la concentración inicial de cobalto. Las cinéticas de los experimentos con 50 y 80 ppm se ajustaron a una reacción de orden 1, mientras que para las corridas a 150 ppm se ajustaron al orden 2. El tiempo de residencia se mantuvo en 2 horas para concentraciones 50 y 80 ppm, para concentraciones 150 ppm aumento hasta 3 horas, lo que indica que se requiere adicionar 2 tanques de reacción de 80 m³, si se pretende operar con concentraciones por encima de 80 ppm.

PALABRAS CLAVE: Cobalto; Cementación; Cinética

ANTECEDENTES

Industrial Minera México, S.A de C.V. (IMMSA) es una empresa subsidiaria de Southern Copper y ha operado la Refinería Electrolítica de Zinc (REZ) desde que inició operaciones en 1982. La REZ procesó en el año 2023 204000 toneladas métricas secas de concentrados de zinc provenientes de diferentes instalaciones mineras propiedad de IMMSA y otros proveedores externos al grupo, con una producción de 100 802 toneladas métricas de zinc de diferentes.

La REZ opera con un proceso de Tostación-Lixiviación-Electrodeposición (RLE), como se muestra en el diagrama de bloques de la [Figura 1](#). Los concentrados procesados provenientes de las unidades mineras son una mezcla de minerales [Tabla 1](#), donde el zinc se encuentra principalmente en forma de sulfuro de zinc, el cual es sometido al proceso de tostado para oxidarlo [Ec.1](#), y posteriormente lixiviarlo con ácido sulfúrico [Ec.2](#). Durante la lixiviación del concentrado tostado o calcina, al mismo tiempo que se extrae el zinc se libera una gama de componentes considerados impurezas en el proceso RLE, como es el caso del hierro, cobre, cadmio, cobalto, níquel entre otros [Ec.3](#). (Nelson, Wang, Demopoulos, & Houlachi, 2000).

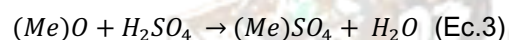
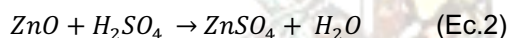
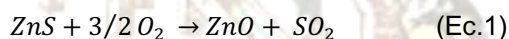


Tabla 1. Valores promedio, obtenido de concentrados de unidades IMMSA recibidos en la REZ en 2023

Unidad	Zn	Fe	Pb	Cu	Ag	Co	Ins.	S
	(%)	(%)	(%)	(%)	Kg/T	(%)	(%)	(%)
Charcas	52.19	6.68	0.69	1.83	0.021	0.018	3.16	31.26
Sta. Barbara	52.62	7.53	1.24	1.30	0.012	0.017	3.37	31.30
San Martin	42.24	17.25	0.47	1.70	0.019	0.002	3.39	31.48

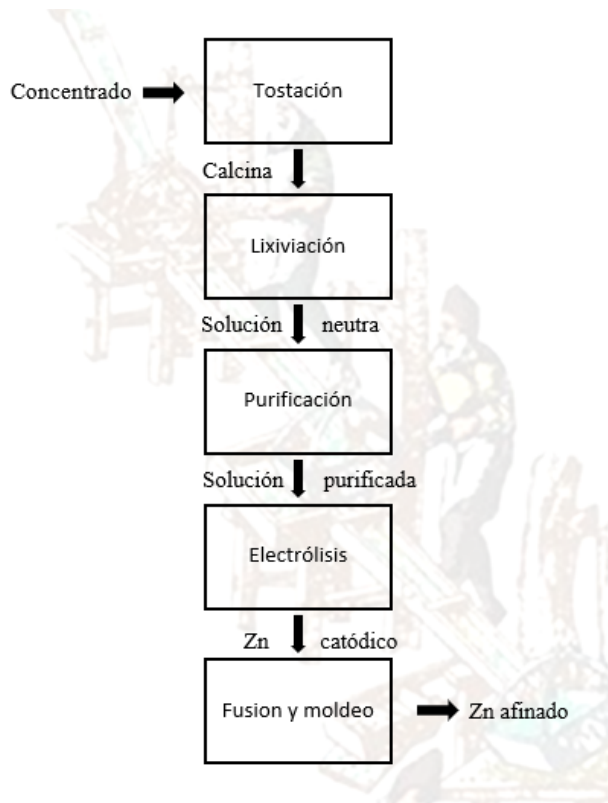
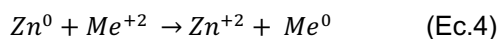


Figura 1. Diagrama de bloques del circuito RLE de la REZ

La presencia de estas impurezas en la solución neutra genera una serie de problemas en la etapa de electrodeposición, ya que éstas actúan como catalizadores de la reacción de evolución del hidrógeno, lo que impacta de forma negativa en la eficiencia de corriente del proceso de electrodeposición, o bien co-depositan con el zinc y disminuyen la pureza del producto final (Dreher, Nelson, Demopoulos, & Filippou, 2001). Por lo que es de suma importancia la adecuada eliminación de impurezas de la solución neutra de sulfato de zinc.

Cementación

La reacción de cementación utilizando zinc metálico, es el tipo de reacción empleado típicamente para la purificación de la solución neutra proveniente de la lixiviación, son reacciones electroquímicas heterogéneas que implican el desplazamiento de un elemento metálico disuelto por otro metal sólido más reactivo, para precipitar al más noble en forma del denominado cemento, en detrimento de la concentración este último en la solución, de acuerdo a la Ec.4 (Sinclair, 2005). El proceso engloba a un gran número de reacciones simultáneas que tienen lugar sobre el sólido al producirse multitud de microceldas electrolíticas, el resultado es que el zinc se disuelve anódicamente y el ión metálico se descarga catódicamente.



La cementación del cobalto se considera la más complicada en la purificación de la solución neutra, está demostrado que, en una solución de sulfato de zinc se favorece las reacciones de evolución del hidrogeno sobre la cementación del Co, lo que promueve la formación de hidróxido de zinc que puede precipitar en la superficie de la partícula de Zn metálico, limitando considerablemente la cementación del cobalto (Yunus, Capel-Boute, & Decroly, 1965) [Figura2](#). Es necesario utilizar activadores que promuevan la reacción cementación del Co sobre las reacciones de evolución de hidrógeno. En la industria actual lo más común es el uso del trióxido de arsénico y el trióxido de antimonio (Abbasi, Shayesteh, Vahidfard, & Hosseini, 2020), sin embargo, a pesar de la probada efectividad de dichos compuestos para promover la cementación del Co, no inhibe por completo reacción de evolución de hidrógeno y está aún consume una porción considerable del zinc suministrado a la reacción. (Liang, Zhang, & Li, 2021).

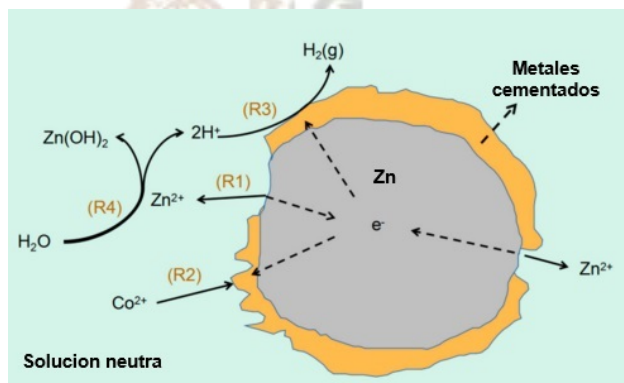


Figura 2. Representación de la cementación del cobalto con zinc metálico, en competencia a la reacción de evolución del Hidrogeno y la hidrolisis del ion Zn^{+2} en una solución de sulfato de zinc, propuesta por Liang y col. 2021.

La remoción del cobalto se lleva a cabo en la etapa de purificación caliente, en la REZ esta etapa cuenta con 4 tanques de reacción con agitación, sumado a 1 tanque de bombeo con 80m^3 de volumen cada uno. La etapa opera a 90°C y el control de pH se mantiene en un rango entre 4.5/4.8, se emplea polvo zinc PW y trióxido de arsénico en solución, con una concentración media de Cu de 2000 ppm y tiempo de residencia de 2 horas donde se procesa solución neutra con contenidos promedio de cobalto entre 20 y 30 ppm, y 2000 ppm de cobre, con el objetivo de disminuir dichos valores a un máximo de 0.2 ppm de cobalto.

A inicios del 2024 se contempló la posibilidad de comenzar a procesar concentrados, provenientes de la unidad de Buena vista del zinc en Sonora (BVZ) para mediados de año, con la visión que esta llegue a cubrir un aproximado de 33% de la demanda de concentrados de las REZ. La [Tabla 2.0](#) ilustra valores reportados por la unidad de pruebas preliminares efectuadas en septiembre del 2023, se observa que los valores de cobalto contenido en dicho concentrado son cerca de 7 veces más elevado al contenido promedio que se suele procesar de las otras 3 unidades [Tabla 1.0](#), lo que generó incertidumbre acerca del

efecto que tendrá procesar dichos contenidos de cobalto sobre el tiempo de residencia en la etapa de purificación caliente, requerido para lograr el objetivo de 0.2 ppm de contenido de Co.

Tabla 2. Valores reportados por la unidad BVZ, de pruebas preliminares de concentrados de septiembre del 2023

Unidad	Zn	Fe	Pb	Cu	Ag	Co	Ins.	S
	(%)	(%)	(%)	(%)	Kg/T	(%)	(%)	(%)
BVZ	53.89	4.62	0.2	1.63	0.078	0.083	4.33	26.07

Debido a lo mencionado previamente, en el presente trabajo se planteó evaluar la cinética de cementación del cobalto en la solución neutra de la etapa de purificación caliente, a concentraciones de Co de 50, 80 y 150 ppm.

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Reactivos

El polvo de zinc industrial fue suministrado por el departamento de fusión y moldeo de la misma planta con una pureza 98.63% de zinc, y granulometría con un 90% de retención en la malla -100.

La solución neutra fue proporcionada por el departamento de lixiviación, el análisis de valores se presenta en la Tabla 3. Finalmente se utilizó trióxido de arsénico grado industrial con 99% de pureza, suministrado por la empresa TZ Group Inc., sulfato de cobalto hexahidratado de la marca Merck y electrolito agotado con acidez de 170 gr/L proveniente de la casa de celdas de la REZ.

Tabla 3. Concentración en solución neutra

Elemento	Contenido	Unidades
Zinc	147	g/L
Cobre	1925	ppm
Fierro	6.36	ppm
Níquel	1.76	ppm
Cobalto	18.4	ppm

Preparación de mezclas

Partiendo de una misma muestra de solución neutra, se elaboraron 3 diferentes soluciones enriquecidas con sulfato de cobalto hexahidratado, para elevar la concentración de Co, se calentaron lotes de 1 L de

solución neutra a 60 °C con agitación continua a 320 rpm, se agregó la cantidad de sulfato de cobalto requerida para obtener concentraciones de 50 ppm, 80 ppm y 150 ppm de Co.

Se preparo una solución de trióxido de arsénico con 20 g/L en un vaso de precipitado de 2 L calentando 1 L de agua a 60 °C posteriormente se agregaron los 20 g de As_2O_3 , se homogenizó por un tiempo de 20 minutos a 320 rpm.

Se realizaron pruebas de solubilidad de trióxido de arsénico en soluciones de hidróxido de sodio. Para esto, en 250 mL de agua se adicionaron diferentes cantidades de NaOH al 50% en el rango entre 10 a 140 mL. La solución se calentó a 60°C y se le adicionó As_2O_3 hasta el punto de saturación, se registraron los pesos de As_2O_3 adicionados en cada corrida.

Experimentos de cementación

En las pruebas de cementación se utilizó solución neutra enriquecida a 50, 80 y 150 ppm de Co en solución. Se planteo como meta disminuir estas concentraciones a un máximo de 0.2 ppm de Co en solución.

En un vaso de precipitados de 2 L se colocó 1 L de solución y se elevó la temperatura a 90 °C. Se ajustó el pH de la solución a 4.5 con electrolito agotado., se agrega la solución de trióxido de arsénico más el polvo de zinc, de acuerdo con la formulación correspondiente Tabla 4. Se tomaron muestras cada 10 minutos, durante los primeros 30 minutos, posteriormente, el muestreo se hizo cada 30 minutos durante 2 horas. Las muestras se filtraron y etiquetaron para análisis de laboratorio, por medio de la técnica de espectroscopia de plasma con acoplamiento inductivo.

Tabla 4. Formulaciones

Cobalto (ppm)	Zinc(g)	As2O3 (g)
50.0	5.0	1.0
50.0	5.2	1.0
80.0	7.5	1.2
80.0	6.5	1.2
150.0	8.5	1.8
150.0	9.0	1.8

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cinética de la reacción

Se determino la cinética de reacción para concentraciones de cobalto a 50 ppm Tabla 5 utilizando 5.2 g de polvo de zinc, 80 ppm Tabla 6 utilizando 5.2 g de polvo de zinc y 150 ppm Tabla 7 utilizando e método

integral buscando la función apropiada de la concentración que corresponde a una ley de velocidad específica que sea lineal con respecto al tiempo. I

A continuación, se presenta el modelo utilizado para obtener los parámetros cinéticos partiendo de un balance de materia para un reactor en batch:

$$\mathbf{E-S+r_i = A \text{ (Ec.1)}}$$

$$\mathbf{F_i, o-F_i+r_i * v = \frac{dN_i}{dt} \text{ (Ec.2)}}$$

$$\mathbf{F_i, o-F_i+r_i = \frac{dN_i}{v*dt} \text{ (Ec.3)}}$$

$$\mathbf{Sabemos: \frac{dN_i}{v} = dC_i}$$

$$\mathbf{-(-r_a) = \frac{dC_A}{dt} \text{ (Ec.4)}}$$

$$\mathbf{Sabemos: -r_a = k * c_A^\alpha}$$

$$\mathbf{k * c_A^\alpha = -\frac{dC_A}{dt} \text{ (Ec.5)}}$$

$$\mathbf{k * dt = -\frac{dC_A}{c_A^\alpha} \text{ (Ec.6)}}$$

Integrando:

$$\mathbf{-\int_{c_{A_0}}^{c_A} \frac{dC_A}{c_A^\alpha} = k \int_{t_0}^t dt \text{ (Ec.7)}}$$

$$\mathbf{-\int_{c_{A_0}}^{c_A} c_A^{-\alpha} * dC_A = k \int_{t_0}^t dt \text{ (Ec.8)}}$$

$$\mathbf{-\int_{c_{A_0}}^{c_A} \frac{c_A^{-\alpha+1} * dC_A}{-\alpha+1} = k \int_{t_0}^t dt \text{ (Ec.9)}}$$

$$\mathbf{-\left[\frac{c_A^{-\alpha+1}}{-\alpha+1}\right] \left\{ \begin{array}{l} C_A \\ C_{A_0} \end{array} \right. = k * t, \text{ sabemos } t_0 = 0 \text{ (Ec.10)}}$$

$$\mathbf{(11) \left[\frac{c_{A_0}^{-\alpha+1}}{-\alpha+1}\right] - \left[\frac{c_A^{-\alpha+1}}{-\alpha+1}\right] = k * t \text{ (Ec.11)}}$$

$$\mathbf{y = mx}$$

Esto permite hacer predicciones de la concentración de cobalto a un tiempo y comparar los resultados experimentales con los teóricos.

Tabla 5. Cinética a una concentración inicial de 50 ppm de cobalto.

Orden	K (L ^{0.7} /mol ^{0.7} *min)	R ²
1.7	94.47	0.9978
Tiempo (min)	Laboratorio	Teórico
	Co (ppm)	Co (ppm)
0	50	50
100	0.21	0.199
120	0.14	0.154
150	0.12	0.124
160	0.10	0.103

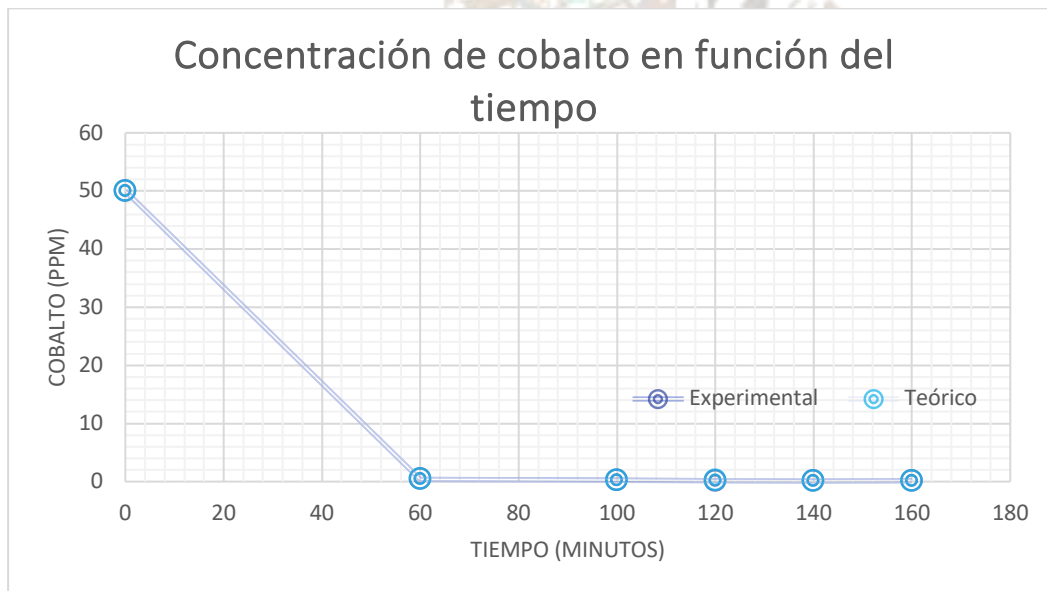


Figura 3. Cobalto en función del tiempo 50 ppm de cobalto inicial

Tabla 6. Cinética a una concentración inicial de 80 ppm de cobalto.

Orden	K (L ^{0.25} /mol ^{0.25} *min)	R ²
1.25	0.6475	0.9919
Tiempo (min)	Laboratorio	Teórico
	Co (ppm)	Co (ppm)
0	80	80
30	7.88	5.75
60	0.96	1.18
90	0.43	0.39
120	0.11	0.16
150	0.1	0.065
180	0.08	0.043

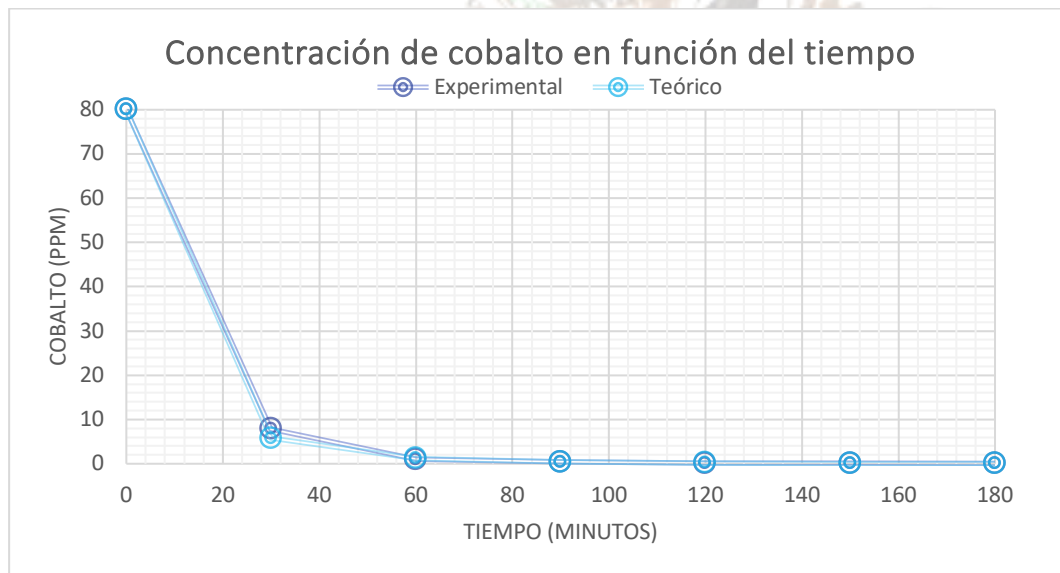


Figura 4. Cobalto en función del tiempo 80 ppm de cobalto inicial

Tabla 7. Cinética a una concentración inicial de 150 ppm de cobalto.

Orden	K (L ^{1.17} /mol ^{1.17} *min)	R ²
2.17	17043	0.9985
Tiempo (min)	Laboratorio	Teórico
	Co (ppm)	Co (ppm)
0	150	150
30	0.850	0.690
60	0.360	0.376
90	0.250	0.266
120	0.210	0.208
150	0.190	0.183
180	0.150	0.147

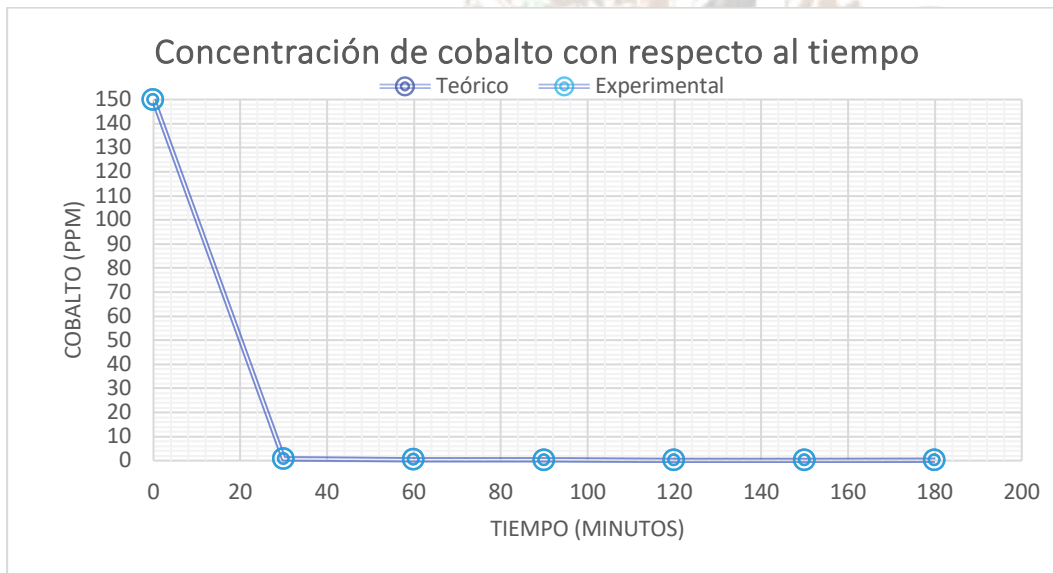


Figura 5. Cobalto en función del tiempo 80 ppm de cobalto inicial

El nivel de confianza está por arriba del 99% presentado como ' $R^{2'}$ ' y la constante de velocidad está representada con la letra 'K'.

En las reacciones con concentraciones de 50 y 80 ppm de cobalto se muestra que son de primer orden mientras que para la reacción con cobalto inicial de 150 ppm es de segundo orden. La cinética de reacción por el método integral se evaluó a los mismos tiempos que se tomaron las muestras haciendo una comparación de estos y evaluar que tanto difieren.

Se evalúa la precisión de la aproximación de la cinética con respecto a los resultados de laboratorio, se puede observar que la ecuación de velocidad presenta resultados muy cercanos a lo experimental obteniendo que para la prueba a 50 ppm de cobalto en la solución neutra utilizando 7 g de polvo de zinc con 1 g de As_2O_3 teniendo un error relativo promedio de 0.66%, en la prueba a 80 ppm de cobalto utilizando 6.5 g de polvo de zinc con 1.2 g de As_2O_3 el error relativo promedio es de -7.03 % y por último para las pruebas de 150 ppm de cobalto utilizando 9 g de polvo de zinc con 1.8 g de As_2O_3 se tiene un error relativo promedio de -2.08%. Esto ayuda a predecir a partir de una serie de datos la concentración a diferentes tiempos o ver en qué punto la reacción se agota.

Efecto de la concentración de cobalto.

La tasa de cementación para una concentración inicial de 50 ppm cobalto en la solución neutra varía por la adición de polvo de zinc como se aprecia en la Figura 6 reflejándose en el tiempo.

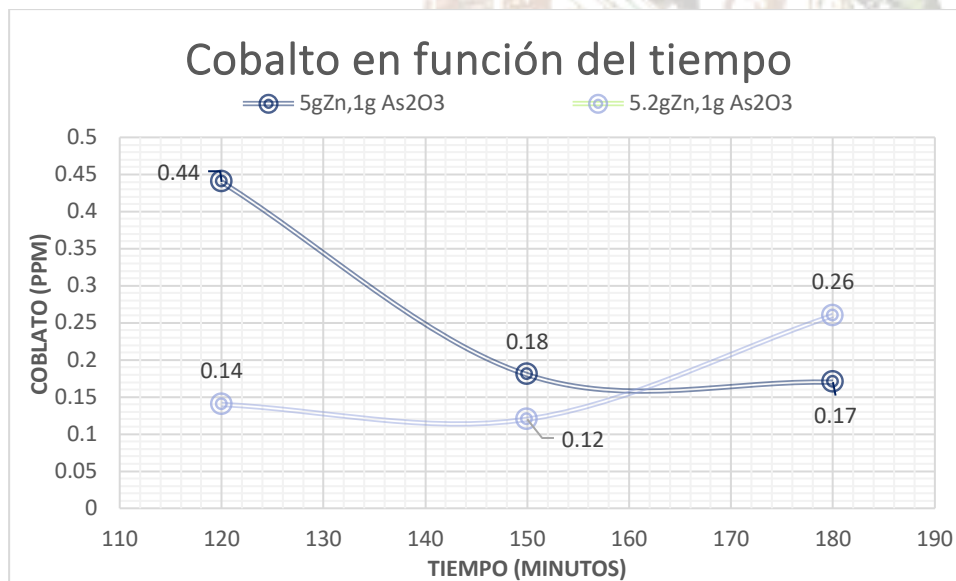


Figura 6. Cobalto en función del tiempo 50 ppm de cobalto inicial

La concentración de cobalto objetivo utilizando 5.2 g de polvo de zinc con 1 g de As_2O_3 se logra obtener 0.14 ppm de cobalto en un tiempo de 2 h por otro lado utilizando 5 g de polvo de zinc y la misma cantidad del activador se aprecia un aumento en el tiempo para llegar dentro del rango del objetivo a las 2:30 h. El aumento del polvo de zinc logra una precipitación más rápida, pero también habría de controlar el tiempo de residencia para evitar redisolución del cobalto precipitado. (Krause & Sandenbergh, 2015)

Si se desea utilizar la menor cantidad de polvo el tiempo de residencia aumenta lo cual para la operación en planta requerirá aumentar un tanque de reacción extra en la etapa de purificación caliente.

A continuación, se presenta la cantidad a utilizar en planta de polvo de zinc y trióxido de arsénico en base a estos dos experimentos para procesar diferentes flujos de solución neutra.

Tabla 8. Reactivos en planta en base a 5 g de zinc

Flujo (m ³ /h)	Zinc (kg/h)	As ₂ O ₃ (kg/h)
100	500	100
150	750	150

Tabla 9. Reactivos en planta en base a 5.2 g de zinc

Flujo (m ³ /h)	Zinc (kg/h)	As ₂ O ₃ (kg/h)
100	520	100
150	780	150

La velocidad de cementación para una concentración inicial de 80 ppm de cobalto se muestra en la Figura 7 utilizando diferentes concentraciones de polvo de zinc y manteniendo constante el trióxido de arsénico durante un tiempo de reacción de 3 horas.

Cementando con 6.5 g de polvo de zinc y 1.2 g de trióxido de arsénico se obtiene que en un tiempo de 2 horas la concentración de cobalto es de 0.11 ppm estando dentro del objetivo. Considerando lo expuesto se puede efectuar un ajuste del polvo de zinc disminuyéndolo, pero en base a lo anterior el tiempo de residencia aumentará lo cual para la planta requerirá la adición de otros tanques de proceso o no se cumpla con llegar dentro de la concentración objetivo. Por otro lado, usando 7.5 g de polvo de zinc y la misma cantidad de trióxido de arsénico se aprecia que esta cantidad en exceso ralentiza la reacción, pero aun así se logra estar dentro de la concentración objetivo en un tiempo de 2 h. Es evidente que no es factible

económicamente emplear una mayor cantidad de polvo de zinc lo que resulta óptimo es utilizar 6.5 g de polvo de zinc para procesar 80 ppm de cobalto en la solución neutra.

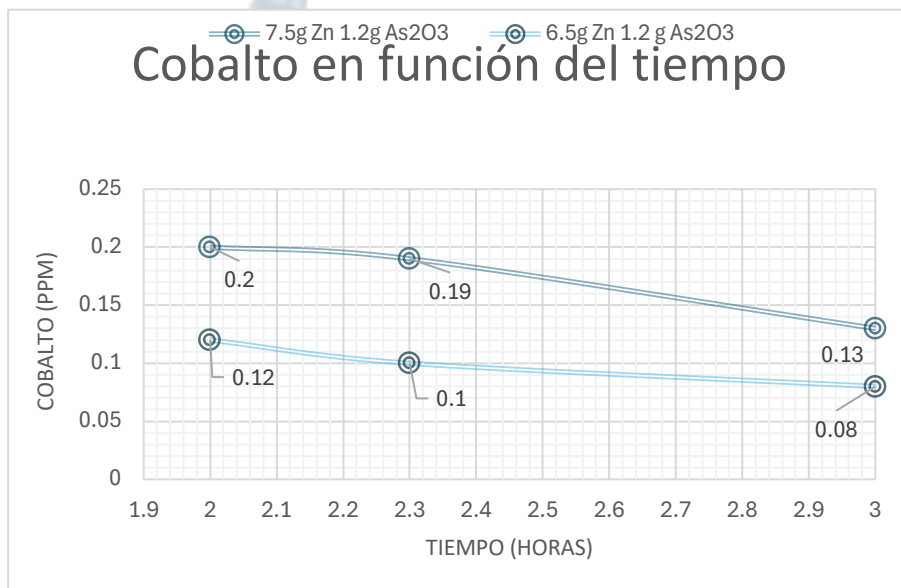


Figura 7. Cobalto en función del tiempo 80 ppm de cobalto inicial

A continuación, se presenta la cantidad a utilizar en planta de polvo de zinc y trióxido de arsénico en base a 6.5 g de polvo de zinc para procesar diferentes flujos de solución neutra.

Tabla 10. Reactivos en planta en base a 6.5 g de zinc

Flujo(m ³ /h)	Zinc (kg/h)	As ₂ O ₃ (kg/h)
100	650	120
150	975	180

Por último, con respecto a una concentración inicial de 150 ppm de cobalto en la solución neutra la tasa de cementación se aprecia en la Figura 8 variando la cantidad de polvo de zinc y manteniendo constante el trióxido de arsénico durante un tiempo de 3 h.

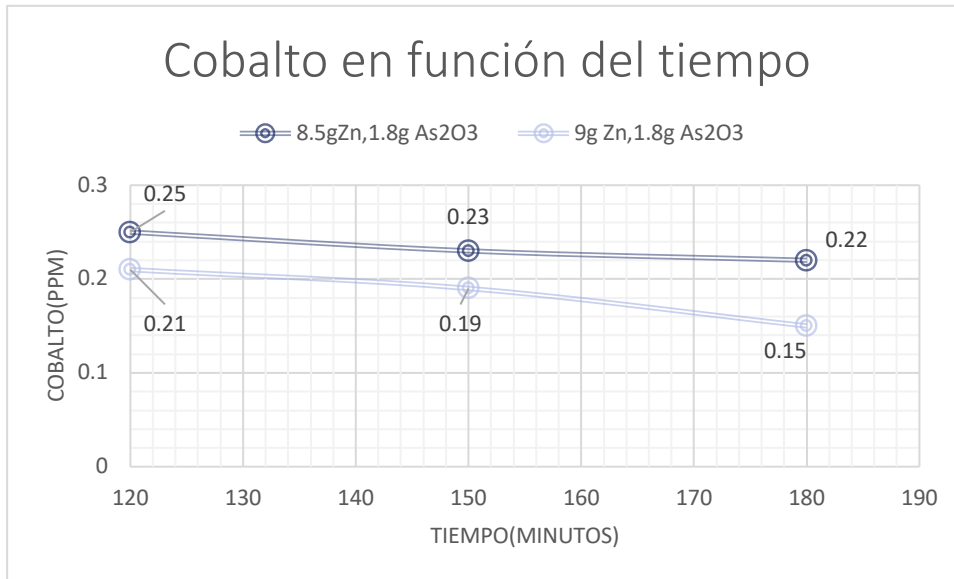


Figura 8. Cobalto en función del tiempo 150 ppm de cobalto inicial

Al emplear 8.5 g de polvo de zinc con 1.8 g de trióxido de arsénico se aprecia que al tiempo de 120 minutos no se llega al objetivo y desde ese momento hasta un tiempo de 180 minutos ya la reacción no progresa apreciando que el polvo de zinc se consumió en su totalidad agotando la reacción siendo de utilidad esta información para realizar un ajuste y administrar una mayor cantidad de polvo de zinc para poder llegar a la concentración objetivo.

Por otro lado, al hacer uso de 0.5 g más de polvo de zinc y manteniendo la misma cantidad de trióxido de arsénico se observa que la reacción de cementación avanza y al tiempo de 150 minutos logra llegar dentro del rango objetivo de cobalto, con este incremento de tiempo es necesario agregar 2 tanques de 80 m³ de reacción en la etapa de purificación caliente para procesar una solución neutra con 150 ppm de cobalto.

A continuación, se presenta la cantidad a utilizar en planta de polvo de zinc con trióxido de arsénico en base a los 9 g de polvo de zinc y 1.8 g de trióxido de arsénico.

Tabla 11. Reactivos en planta en base a 9 g de zinc

Flujo (m ³ /h)	Zinc (kg/h)	As ₂ O ₃ (kg/h)
100	900	180
150	1350	270

Solubilidad del arseniato de sodio

A continuación, se presentan los resultados en la Tabla 12 de la solubilidad del trióxido de arsénico usando hidróxido de sodio al 50% manteniendo constante el agua a 250 mL y una temperatura de 60°C.

Tabla 12. Solubilidad del arseniato de sodio.

NaOH50%(mL)	As2O3(g)	%Disolución	Solubilidad(g/L)
30.00	50.00	96.82	178.6
40.00	100.00	98.07	344.8
50.00	130.00	94.63	433.3
60.00	157.00	97.06	506.5
70.00	170.00	96.72	531.3
80.00	170.00	97.56	515.2
90.00	180.00	98.04	529.4
100.00	210.00	96.85	600.0
120.00	260.00	98.65	702.7
140.00	300.00	95.94	769.2

Se obtiene que utilizando hidróxido de sodio aumenta la solubilidad en una proporción considerable y estos valores se comparan con la referencia que se usa en proceso siendo la solubilidad del trióxido de arsénico en agua de 20 g/L.

Al aumentar la solubilidad del trióxido de arsénico se tiene un impacto positivo para la planta ya que se debe de dosificar una menor cantidad de este activador en las reacciones debido a concentraciones mayores con respecto a la de proceso.

Se obtiene el punto máximo a disolver de As₂O₃ con NaOH siendo la cantidad de 140 mL de NaOH si se agregan más mililitros de NaOH los gramos de trióxido de arsénico disueltos no aumentan.

Reacción de cementación usando arseniato de sodio como activador

En base a datos, el proceso de purificación caliente procesara una solución neutra con 42 ppm de cobalto, dado esto se toma como referencia el experimento s 50 ppm de cobalto en la solución neutra, pero haciendo uso de arseniato de sodio como activador.

Dado esto se debe de utilizar en base a lo anterior una concentración de reactivo de polvo de zinc de 5.2 g y 1.0 g de trióxido de arsénico por cada litro de solución neutra a procesar, pero se toma como referencia la cantidad de arsénico que se ocupa para procesar un flujo de solución neutra promedio en planta de 150 m³/h siendo de 150 kg/h de As₂O₃, para esto se trasladan los datos de la Tabla 12 a esta concentración manteniendo el % de disolución y tomando en cuenta el precio del hidróxido de sodio por litro de 5.76 \$ mx se determina el costo de esa cantidad de hidróxido de sodio. Los resultados se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13. Reactivos para utilizar con arseniato de sodio para procesar una solución neutra con 50 ppm de cobalto a 150 m³/h de solución neutra.

As ₂ O ₃ (kg)	H ₂ O (L/h)	NaOH 50% (L/h)	Costo (MXN)	Solubilidad(g/L)
150.0	750.0	90.0	\$ 518.40	178.6
150.0	375.0	60.0	\$ 345.60	344.8
150.0	289.0	57.8	\$ 332.93	433.3
150.0	239.0	57.4	\$ 330.39	506.5
150.0	221.0	61.9	\$ 356.43	531.3
150.0	220.6	70.6	\$ 406.61	515.2
150.0	208.7	75.1	\$ 432.76	529.4
150.0	178.9	71.6	\$ 412.19	600.0
150.0	144.5	69.4	\$ 399.51	702.7
150.0	125.0	70.0	\$ 403.20	769.2

Se determina la cantidad optima de NaOH a usar para el flujo de 150 L/h de solución neutra tomando en cuenta los costos que estos representan, se aprecia que con una menor cantidad de hidróxido de sodio se disuelve una menor cantidad de trióxido de arsénico en consecuencia en proceso se ocupa una mayor cantidad de sosa, por otro lado al usar una mayor cantidad de sosa disuelve una mayor cantidad de trióxido de arsénico por lo que se ocupara menor cantidad del arseniato de sodio pero se debe de tomar en cuenta que la cantidad optima de NaOH que disuelve los 150 kg de As₂O₃ es de 57.4 L/h y esto lo

podemos corroborar con el costo, si se usa una mayor cantidad de sosa no tendrá impacto ya que se le estaría agregando en exceso para disolver los 150 kg implicando un aumento de costo y esto se ve reflejado en la Tabla 13.

A continuación, se muestra en la Figura 9 la cementación con arseniato de sodio utilizando 5.2 de polvo de zinc y 1 g de arseniato de sodio:

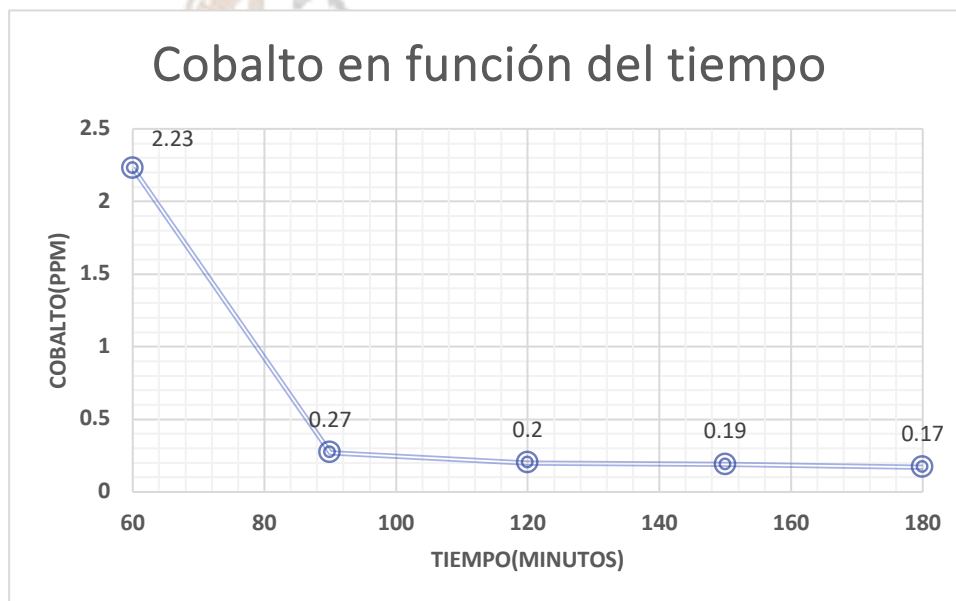


Figura 9. Cobalto en función del tiempo usando arseniato de sodio

CONCLUSIONES

En las pruebas con cobalto a 50, 80 y 150 ppm la velocidad de cementación del cobalto sobre el zinc se produce en una etapa inicialmente rápida seguida de una etapa más lenta. El polvo de zinc influyo en el tiempo de de-cobaltación, se puede reducir el consumo de zinc teniendo como consecuencia un aumento el tiempo de residencia.

Las condiciones óptimas en las pruebas con 50 ppm de cobalto en la solución neutra es utilizar 5 g de polvo de zinc, pero el tiempo de residencia aumentaría 30 minutos requiriendo un tanque extra dentro de proceso, pero para asegurar la operatividad de la planta se prefiere utilizar 5.2 g de polvo de zinc y mantener un tiempo de residencia de 2 h.

Para las pruebas de 80 ppm se determina que la cantidad a utilizar en proceso es de 6.5 g de polvo de zinc ya se asegura llegar dentro del objetivo en un tiempo de 2 h de modo que la etapa de purificación caliente puede procesar una solución neutra de hasta 80 ppm sin realizar cambios en el proceso.

En las pruebas con 150 ppm de cobalto se cumple el objetivo con la cantidad de 9 g polvo de zinc, pero el tiempo de residencia aumenta hasta 3:00 h lo cual implica un aumento de 2 tanques de 80 m³ de reacción en la etapa de purificación caliente.

La cinética descrita es satisfactoria ya que al hacer la comparación de los valores teóricos contra los experimentales de las pruebas a 50, 80 y 150 ppm de cobalto el error relativo más alto que se obtuvo fue de -7.03% teniendo un margen de error aceptable por la mayoría de los investigadores, estos valores permiten evaluar la exactitud y poder predecir las concentraciones cuando se requiera a nivel operacional.

La solubilidad del trióxido de arsénico aumenta agregando hidróxido de sodio al 50% hasta un valor de 769.2 g/L siendo mayor en comparación a como se usa en el proceso actual de 33 g/L, esto permite que al estar más concentrado, una mejor solubilidad, una menor cantidad de preparación de tanques, reducción de la cantidad de agua, menor exposición del operador al As₂O₃, mejor calidad de solución de As₂O₃, reducción de purgas, evita taponamiento de tuberías por lo tanto una reducción de paros y disminución de actividades del operador.

El uso del arseniato de sodio no implica un cambio en la reacción de cementación y logra el objetivo en 2:00 h por lo que el uso de este implica un impacto positivo en la operación y la continuidad del proceso.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Ing. Sergio Arturo Castro Larragoitia gerente de la Refinería Electrolítica de Zinc y al Ing. Heberto Ortiz Vazquez super intendente de Metalurgia de la misma planta por su invaluable guía y apoyo constante de este proceso. Sus aportes y sugerencias han sido fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

REFERENCIAS

Jianming, Lu., Dreinsinger, D., & Rees, K. (2020). Simultaneous removal of Co, Cu, Cd and Ni from zinc sulfate solution by zinc. *Elsevier* 197,105-479.

Krause, B., & Sandenbergh, R. F. (2015). Optimization of cobalt removal from an aqueous sulfate zinc leach solution for zinc electrowinning. *Elsevier* 155,132-140.

Polcaro, A., Palmas, S., & Dernini, S. (1995). Kinetics of Cobalt Cementation on Zinc Powder. *General research* 34,3090-3095.