

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA Y METALÚRGICA



DISPOSICION FINAL DEL CATALIZADOR PENTÓXIDO DE VANADIO  
POR FIJACIÓN EN UNA ESCORIA METALÚRGICA

TESIS

PARA OPTAR EL GRADO ACADEMICO DE MAESTRO EN CIENCIAS  
CON MENCIÓN EN MINERIA Y MEDIO AMBIENTE

ELABORADO POR:

LUIS ANTONIO GONZALES PAREDES

ASESOR

M.Sc. JULIO BONELLI ARENAS

LIMA – PERÚ

2012

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo va dedicado a este grupo de personas muy especiales que siempre han estado a mi lado apoyándome y dando lo mejor de sí para que siga progresando personal y profesionalmente.

### **Con amor y gratitud:**

- A mi esposa **Uberlinda Silvia** y a mis hijos **Luis Antonio** y **Ximena Silvia**.
- A mis padres **Antonio** y **Romualda**, y a mis hermanos **Víctor**, **Oscar**, **Otilia**, **Rosario** y **Eduardo**.

## PRESENTACION

Cumpliendo con el Reglamento de Grados de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica de la Universidad Nacional de Ingeniería, y con la finalidad de optar el grado académico de Maestro en Ciencias con mención en Minería y Medio Ambiente, pongo el presente trabajo de Tesis en consideración de los Señores Miembros del Jurado para su respectiva evaluación.

Este trabajo teórico – experimental propone una alternativa que podría fácilmente implementarse en el Perú para la disposición final del residuo peligroso denominado *pentóxido de vanadio agotado*, el cual se genera en las plantas metalúrgicas que producen ácido sulfúrico como subproducto. Esta alternativa de tratamiento es económicamente viable y ambientalmente sustentable en el tiempo ya que cumple requerimientos técnicos, ambientales, sanitarios y económicos.

Con este aporte se busca contribuir al desarrollo del país promoviendo el empleo de tecnología que permita el crecimiento industrial preservando el medio ambiente para el bienestar de las generaciones presentes y futuras.

## RESUMEN

El cumplimiento de los Programas de Adecuación y Manejo Ambiental (PAMA) exigidos por la normativa ambiental peruana ha permitido que las grandes fundiciones no ferrosas como la Fundición de Cobre de Ilo y el Complejo Metalúrgico de La Oroya, capturen sus emisiones gaseosas de dióxido de azufre y las transformen en ácido sulfúrico comercial en lugar de descargarlas directamente a la atmósfera e impactar negativamente el medio ambiente.

En una de las etapas de la producción de ácido sulfúrico se emplea el *pentóxido de vanadio* como catalizador, el cual acelera la reacción química entre el dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y el oxígeno ( $\text{O}_2$ ) para formar trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ). Por la naturaleza propia de la operación, el pentóxido de vanadio pierde gradualmente sus propiedades catalíticas, debiendo ser reemplazado por catalizador fresco. El catalizador “*agotado*” presenta características tóxicas, por lo que debe ser manejado como residuo peligroso, siendo actualmente dispuesto en el Perú en rellenos de seguridad siguiendo estrictos procedimientos para evitar daños a la salud de las personas y al entorno.

El presente trabajo propone como alternativa el tratamiento del *catalizador agotado de pentóxido de vanadio* por pirometalurgia, fijando la mayor proporción del vanadio en la escoria producida en un horno de fusión de cobre. Para comprobar esta hipótesis, se efectuaron una serie de pruebas a nivel laboratorio e industrial adicionando en forma dosificada el catalizador agotado a la carga de un horno reverbero de cobre, evidenciándose que más del 97,9 % del vanadio se desplaza hacia la fase escoria.

La escoria así obtenida fue sometida a pruebas geoquímicas y de estabilidad química, cuyos resultados indicaron que no presenta potencial de generar

acidez ni de lixiviación en forma natural, por lo que su almacenamiento a la intemperie no afectaría las aguas superficiales ni subterráneas aledañas.

Se concluye que el *catalizador agotado de pentóxido de vanadio* generado en las plantas de ácido sulfúrico puede ser manejado económicamente en forma estable y ambientalmente sustentable en el tiempo mediante su fijación en escorias fayalíticas de fundiciones de cobre.

## ABSTRACT

The Peruvian environmental regulations has obligated major nonferrous smelters, like the Copper Smelter in Ilo and the Metallurgical Complex of La Oroya, capture their sulfur dioxide emissions and convert them into commercial sulfuric acid instead of discharging directly to the atmosphere, avoiding pollution the surrounding environment.

During the manufacture of sulfuric acid, vanadium pentoxide is used to catalyze the conversion of sulfur dioxide ( $\text{SO}_2$ ) to sulfur trioxide ( $\text{SO}_3$ ). Gradually, the vanadium pentoxide loses its catalytic activities and must be replaced by fresh catalyst. The spent catalyst has toxic properties, so it must be disposed as hazardous waste in a safe and legal manner in Peru (e.g. secure landfills) to prevent damage to health and ecosystems.

This paper proposes a method of processing spent vanadium pentoxide – containing catalyst by incorporation into fayalite slag of copper smelting. To test this hypothesis, we conducted laboratory and industrial tests by adding the spent catalyst to the reverberatory furnace charge. The results showed that vanadium is mainly present in the slag phase.

This slag does not generate acidic water nor is it leached out by water under normal environmental conditions of temperature, acidity, alkalinity etc., so it could be disposed in slag dumps without causing surface water or groundwater contamination.

We concluded the spent vanadium pentoxide – containing catalyst could be disposed with economic and environmental benefits by fixation into fayalite slag of copper smelting.

## TABLA DE CONTENIDO

Título	
Dedicatoria	
Presentación	
Resumen	
Abstract	
Tabla de Contenido	
Índice de Figuras y Gráficos	
Índice de Tablas	
<b>CAPITULO I: INTRODUCCION</b>	<b>11</b>
1.1 Exposición del Problema	11
1.2 Justificación del Estudio	14
1.2.1 Justificación Ambiental	15
1.2.2 Justificación Social	17
1.2.3 Justificación Económica	18
1.3 Formulación de Objetivos de la Investigación	19
1.3.1 Objetivo General	19
1.3.2 Objetivos Específicos	19
1.4 Formulación de la Hipótesis	20
1.5 Alcance de la Investigación	20
1.6 Organización de la Tesis	20
<b>CAPITULO II: DIAGNOSTICO DE LA SITUACION ACTUAL</b>	<b>22</b>
2.1 Plantas de Ácido Sulfúrico	22
2.1.1. Fabricación de Ácido Sulfúrico en la Industria Metalúrgica	22
2.1.1.1 Materia Prima	22
2.1.1.2 Generación de Dióxido de Azufre (SO <sub>2</sub> )	23
2.1.1.3 Obtención de Ácido Sulfúrico	25

2.1.2	Impactos Ambientales.....	26
2.1.2.1	Consumos Energéticos.....	27
2.1.2.2	Consumo de agua.....	27
2.1.2.3	Emisiones gaseosas.....	27
2.1.2.4	Descargas de agua.....	28
2.1.2.5	Residuos sólidos.....	29
2.1.2.6	Contaminación accidental.....	29
2.2	Marco Legal Aplicable a las Plantas de Ácido Sulfúrico.....	30
2.2.1	Aire.....	30
2.2.2	Aguas.....	31
2.2.3	Residuos Sólidos y Residuos Sólidos Peligrosos.....	33
2.3	Producción de Ácido Sulfúrico en el Perú.....	33
2.4	Uso del Pentóxido de Vanadio como Catalizador.....	34
2.4.1	Catalizadores.....	34
2.4.2	Mecanismo de Catalización.....	35
2.4.2.1	Formas del Catalizador Pentóxido de Vanadio.....	38
2.4.2.2	Actividad del catalizador Pentóxido de Vanadio.....	40
2.4.2.3	Color del catalizador Pentóxido de Vanadio.....	40
2.5	Riesgos Ambientales y a la Salud de las Personas.....	41
2.5.1	Comportamiento en el Medio Ambiente.....	41
2.5.2	Riesgos a la Salud de las Personas.....	42
2.6	Manejo de Catalizadores Agotados.....	43
2.6.1	Reciclado del Catalizador Pentóxido de Vanadio agotado.....	44
2.6.2	Recuperación del Vanadio.....	44
2.6.2.1	Hidrometalurgia.....	45
2.6.2.2	Pirometalurgia.....	46
2.6.3	Disposición en Depósitos de Seguridad.....	46
2.6.3.1	Estabilización – Solidificación.....	47
2.6.3.2	Depósito directo en Relleno de Seguridad .....	49
	<b>CAPITULO III: MARCO TEORICO DE REFERENCIA.....</b>	<b>52</b>
3.1	Aspectos Teóricos de Formación de Escorias Fayalíticas.....	52
3.1.1	Descripción del proceso de Fusión.....	52
3.1.2	Principales reacciones químicas en el proceso de fusión.....	53
3.2	Formación de la Mata.....	55



3.3	Equilibrio Mata – Escoria.....	59
3.4	Escorias.....	60
3.4.1	Importancia de la calidad de las escorias.....	62
3.5	Caracterización de las Escorias Industriales de Cobre.....	64
3.5.1	Sistemas Ternarios.....	64
3.5.2	Propiedades Físicas.....	64
3.5.3	Comportamiento del Pentóxido de Vanadio en las escorias.....	66
3.5.4	Consideraciones Cinéticas.....	67
3.5.4	Balances de Materiales en el Horno Oxy-fuel.....	67
<b>CAPITULO IV: DESARROLLO DE INVESTIGACION EXPERIMENTAL.....</b>		<b>71</b>
4.1	Objetivos del Desarrollo Experimental.....	71
4.1.1	Objetivo General.....	71
4.1.2	Objetivos Específicos.....	71
4.2	Desarrollo de las Pruebas Experimentales.....	72
4.2.1	Variables del Proceso.....	73
4.2.2	Características de la Materia Prima .....	73
4.2.3	Desarrollo Experimental.....	74
4.2.3.1	Nivel Laboratorio – 1er.Set de Pruebas.....	75
4.2.3.2	Nivel Laboratorio – 2do. Set de Pruebas.....	76
4.2.3.3	Nivel Laboratorio – 3er. Set de Pruebas.....	78
4.2.3.4	Nivel Laboratorio – 4to. Set de Pruebas.....	80
4.2.3.5	Pruebas a Nivel Industrial.....	82
<b>CAPITULO V: ENSAYES AMBIENTALES COMPLEMENTARIOS.....</b>		<b>90</b>
5.1	Caracterización Geoquímica de las Escorias .....	90
5.1.1	Generación de Drenaje Acido de Roca (DAR).....	90
5.1.1.1	Objetivos.....	90
5.1.1.2	Metodología.....	91
5.1.1.3	pH Pasta.....	91
5.1.1.4	Test ABA.....	92
5.1.1.5	Caracterización Química de las Muestras .....	93
5.1.1.6	Discusión de resultados geoquímicos.....	93
5.1.1.7	Conclusiones de resultados geoquímicos.....	94
5.1.2	Test SPLP - 1312.....	95

5.1.2.1	Objetivo.....	96
5.1.2.2	Metodología.....	96
5.1.2.3	Discusión de Resultados.....	97
5.2	Determinación de Material Particulado Emitido por Chimeneas.....	98
5.21	Método 5 USEPA.....	98
5.1.2	Discusión de Resultados.....	99
5.3	Monitoreo de Agentes Químicos en Ambientes de Trabajo.....	99
5.3.1	Discusión de Resultados.....	100
 <b>CONFIRMACIÓN DE HIPÓTESIS.....</b>		<b>102</b>
<b>ANÁLISIS COSTO - BENEFICIO.....</b>		<b>103</b>
<b>CONCLUSIONES.....</b>		<b>106</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>		<b>108</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>		<b>110</b>
<b>ANEXOS.....</b>		<b>113</b>

## INDICE DE FIGURAS Y GRAFICOS

Figura	Título	Página
1.1	Vehículo para el transporte de Pentóxido de Vanadio agotado.	15
1.2	Instalación del geotextil de protección en la base y paredes laterales del depósito de seguridad.	16
2.1	Curvas de Equilibrio para 8% y 11% de SO <sub>2</sub> .	38
2.2	Pellets de Pentóxido de Vanadio.	39
2.3	Anillos de Pentóxido de Vanadio.	39
2.4	Estrellas de Pentóxido de Vanadio.	40
2.5	Pentóxido de Vanadio degradado	41
3.1	Proceso de Fusión de la calcina en un horno oxy-fuel.	53
3.2	Porción del ternario Cu-Fe-S semicuantitativo mostrando el equilibrio de fases y la isoterma de 1 200°C.	57
3.3	Diagrama cuasibinario Cu <sub>2</sub> S – FeS a 1 250°C.	58
3.4	Diagrama de equilibrio de fases de <i>liquidus</i> parcial (1200°C) para el sistema FeO - FeS - SiO <sub>2</sub> .	60
3.5	Superficie de la fase <i>liquidus</i> en el sistema FeO – Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> – SiO <sub>2</sub> a 1200 °C y 1250 °C.	61
3.6	Diagrama Ternario SiO <sub>2</sub> – CaO – FeO.	63
3.7	Diagrama de entradas y salidas en el horno	68
4.1	Horno Tubular de Laboratorio Carbolite	75
4.2	Horno Eléctrico de Laboratorio Carbolite	77
4.3	Vista isométrica del Horno con Quemadores Oxy-Fuel	84
5.2	Esquema práctico sobre procedimientos de test de lixiviación	95
6.1	<i>Diagrama</i> Eh-pH del sistema V-O-H. $\Sigma V = 10-10, 298.15K, 105 Pa.$	119

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla</b>	<b>Título</b>	<b>Página</b>
1.1	Generación de Pentóxido de Vanadio Agotado en el Perú	13
2.1	Emisiones gaseosas y sus causas	28
2.2	Producción Proyectada de Ácido Sulfúrico en el Perú	34
2.3	Análisis Típico para Catalizador Agotado	44
3.1	Análisis químico característico de las escorias de fusión de Cobre de La Oroya (%)	64
3.2	Resumen de los análisis de las entradas y salidas del Horno Oxy-Fuel	69
3.3	Balance de Materiales del Horno Oxy-Fuel Mes de mayo 2007	70
4.1	Condiciones de Trabajo a Nivel Laboratorio- 1er. Set de pruebas.	76
4.2	Condiciones de Trabajo 2do. Set de pruebas laboratorio	78
4.3	Balance Metalúrgico 3er. Set de pruebas laboratorio	79
4.4	Balance Metalúrgico 4to. Set de pruebas laboratorio	81
4.5	Análisis Químico de la Calcina de Cobre	85
4.6	Análisis Químico del Catalizador Agotado	86
4.7	Análisis Químico de la Mata de Cobre	86
4.8	Análisis Químico de la Escoria de Reverbero	87
4.9	Balance Metalúrgico - Pruebas Nivel Industrial	88
5.1	Categorización de materiales de acuerdo a la interpretación del test ABA	92
5.2	Resumen de los Resultados de Prueba ABA	94
5.3	Resultados del test SPLP – US EPA 1312 (mg/L)	95
5.7	Concentraciones de Material Particulado y Elementos Metálicos	97
5.8	Mediciones de Polvo en Ambiente de Trabajo	98
6.1	Propiedades del Vanadio	125

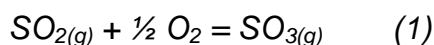
## CAPITULO I. INTRODUCCION

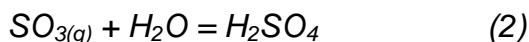
### 1.1 Exposición del Problema.

El cumplimiento de los Programas de Adecuación y Manejo Ambiental (PAMA) exigidos por la normativa ambiental peruana ha permitido que las grandes fundiciones no ferrosas como la Fundición de Cobre de Ilo y el Complejo Metalúrgico de La Oroya, capturen sus emisiones gaseosas de dióxido de azufre y las transformen en ácido sulfúrico comercial en lugar de descargarlas directamente a la atmósfera, lo cual impactaba negativamente el medio ambiente.

Durante las etapas de tostación y/o fusión de los concentrados sulfurados de cobre, plomo y zinc para la obtención de metales refinados, el azufre presente en la carga reacciona con el oxígeno del aire en los reactores y forma el dióxido de azufre gaseoso ( $SO_2$ ), el cual es convertido en ácido sulfúrico en plantas de conversión catalítica.

El proceso de producción de ácido sulfúrico a partir de los gases de fundición se divide en las siguientes etapas: enfriamiento y limpieza de gases, secado de gases, conversión del  $SO_2$  a  $SO_3$  y absorción del  $SO_3$  en agua en presencia de ácido sulfúrico. Las reacciones involucradas son:





A pesar que la reacción (1) es termodinámicamente favorable, su velocidad es demasiado lenta, por lo que a nivel industrial se promueve la conversión de  $\text{SO}_2$  a  $\text{SO}_3$  en presencia de un catalizador, siendo el más conocido el pentóxido de vanadio.

Durante la operación de las plantas de ácido sulfúrico, los cambios bruscos de temperatura o la presencia de humedad en los gases de conversión originan que el catalizador pentóxido de vanadio reduzca su tamaño y/o se cubra de capas de sulfato, restando drásticamente eficiencia al proceso de conversión de  $\text{SO}_2$  a  $\text{SO}_3$ . Por esta razón, el catalizador degradado debe ser periódicamente reemplazado, generándose un residuo conocido como *pentóxido de vanadio agotado*.

Debido a las características de toxicidad del *pentóxido de vanadio agotado*, es considerado como un residuo sólido peligroso, debiendo por lo tanto ser manejado según lo establecido en la Ley N° 27314 Ley General de Residuos Sólidos y su Reglamento, los cuales indican que su disposición sea sanitaria y ambientalmente adecuada con sujeción a los principios de minimización, prevención de riesgos ambientales y protección de la salud y el bienestar de la persona humana.

En el Perú actualmente operan dos plantas de ácido sulfúrico: la Refinería de Zinc ubicada en Cajamarquilla perteneciente a la empresa Votorantim Metais Cajamarquilla S.A., y la Fundición de Ilo de la empresa Southern Copper Corporation, las que generan aproximadamente 112,5 TM/año de *pentóxido de vanadio agotado*. El Complejo Metalúrgico de La Oroya cuenta con 3 plantas de ácido sulfúrico, dos de las cuales operaron con normalidad hasta junio del 2009, fecha en la cual Doe Run Perú S.A. suspendió sus actividades en La Oroya, mientras que la 3era. planta se encontraba en

pleno proceso de construcción. De reiniciarse las operaciones en La Oroya, se estima una generación adicional 18,2 TM/año, con lo que se proyecta generar a nivel nacional 130,7 TM/año de *pentóxido de vanadio agotado*.

**Tabla N° 1.1 Generación de Pentóxido de Vanadio Agotado en el Perú.**

	Refinería de Zinc de Cajamarquilla - Votorantim	Fundición de Ilo – Southern Copper Corp. (2 plantas)	Fundición de La Oroya – Doe Run Perú SRL		
			Circuito de Zinc	Circuito de Plomo	Circuito de Cobre (en construcción)
Capacidad Instalada de Producción de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 98,5%/año	614 752	1 144 000	63 000	115 000	220 000
TM de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 98,5%/año	499 239	962 984	58 000	115 000	220 000
kg V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> agotado/ TM de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0,035	0,099	0,12	0,04	0,03
TM V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> agotado / año	17,5	95,0	7,0	4,6	6,6

**Fuente:** Elaboración propia.

En nuestro medio, la disposición final de este residuo peligroso se efectúa exclusivamente en depósitos de seguridad, en los que se almacena en forma indefinida con una serie de controles de seguridad para evitar sus efectos nocivos sobre la salud humana y el medio ambiente.

La Fundición de Ilo confina el *pentóxido de vanadio agotado* en cilindros cerrados, los cuales son dispuestos en zonas de almacenamiento seguras debidamente señalizadas en los depósitos de escoria de fundición. A su vez, la Refinería de Cajamarquilla, a través de una EPS-RS, dispone el *pentóxido agotado* en el depósito de BEFESA PERU, el cual se ubica en Chilca, Lima, y cuenta con la respectiva autorización de la Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA) del Ministerio de Salud para el tratamiento y disposición

final de residuos industriales y peligrosos. En su debido momento, la Fundación de La Oroya utilizó también el depósito de BEFESA PERU.

A pesar que la normativa vigente ha considerado una serie de medidas para el control de los impactos ambientales asociados a este tipo de disposición final del catalizador agotado, existen algunos riesgos potenciales de alta criticidad que pueden afectar tanto al medio ambiente como a la salud humana, por lo que deben ser gestionados con medidas más estrictas que incrementan grandemente la inversión efectuada y los costos operativos de las plantas de producción. Algunos de estos riesgos son:

- Derrame del catalizador agotado durante el transporte desde el punto de generación hasta los depósitos de seguridad.
- Filtraciones de los lixiviados de los depósitos de seguridad, lo que podría impactar negativamente en la calidad de las aguas subterráneas.
- Reclamos de las comunidades del entorno de los rellenos de seguridad, ante el requerimiento cada vez mayor de terrenos para la construcción de nuevos depósitos.

Con la finalidad de eliminar los riesgos inherentes al transporte, manipuleo y almacenamiento de este residuo peligroso, se propone un cambio en la tecnología de disposición final del catalizador agotado, inertizando al *pentóxido de vanadio* por su incorporación a una escoria metalúrgica con alto contenido de sílice, alternativa que es ambientalmente sustentable y económicamente manejable en el tiempo.

## **1.2 Justificación del Estudio.**

La realización del presente estudio se justifica desde diversos puntos de vista, siendo todos de suma importancia: el primero es de tipo ambiental, el segundo de tipo social y finalmente de tipo económico.



### 1.2.1 Justificación Ambiental.

El presente estudio propone eliminar los riesgos inherentes al transporte, manipuleo y almacenamiento del residuo peligroso “*pentóxido de vanadio agotado*”, los cuales podrían afectar tanto al medio ambiente como a la salud humana.

- La Refinería de Cajamarquilla, tal como lo hizo en su debido momento el Complejo Metalúrgico de La Oroya, dispone el catalizador agotado en un depósito de seguridad ubicado al sur de Lima, debiendo transportarlo desde el punto de generación hasta su disposición final en vehículos especialmente acondicionados para este fin, los que emplean vías de transporte público que atraviesan centros poblados y ciudades.



Figura N° 1.1. Vehículo para el transporte de *Pentóxido de Vanadio agotado*.

A pesar que las mencionadas empresas cuentan con sus respectivos Planes de Manejo Ambiental para el Transporte de Residuos Peligrosos

y Planes de Contingencia para el Derrame de Sustancias Peligrosas, las probabilidades de accidentes durante el transporte son altas, pudiendo ocasionarse derrames de catalizador agotado que, dependiendo de su magnitud, podrían afectar el medio ambiente y la salud de las personas. El caso más crítico podría ser el derrame de este residuo a un curso de agua (por ejemplo, al río Rímac).

- Si bien es cierto que el Reglamento de la Ley General de Residuos Sólidos es muy expreso en cuanto a la necesidad de las instalaciones mínimas y complementarias que debe poseer un relleno de seguridad, como por ejemplo la impermeabilización del fondo y taludes del depósito, uso de geomembranas y geotextiles, etc., siempre existe el riesgo de filtraciones de los lixiviados al subsuelo y potencialmente, contaminar la napa freática de ser el caso.



**Figura N° 1.2. Instalación del geotextil de protección en la base y paredes laterales del depósito de seguridad.**

Estas filtraciones al subsuelo podrían darse por rotura o colapso de las capas impermeabilizantes, o bien por filtraciones muy lentas de los lixiviados a través de las capas de arcilla o geomembranas ya que, de una manera muy estricta, estos materiales no son 100% impermeables sino que poseen una muy baja permeabilidad en relación con otros materiales naturales que pueden ser usados para la contención de desechos líquidos o sólidos.

### **1.2.2 Justificación Social.**

El presente trabajo propone un cambio en la tecnología de disposición final del catalizador agotado, incorporando el *pentóxido de vanadio agotado* en una escoria metalúrgica con alto contenido de sílice, la misma que se almacenaría en los depósitos industriales de escorias; dejándose de usar, por lo tanto, los rellenos de seguridad.

De esta manera, se contribuiría también con la reducción de los conflictos sociales que podrían darse por la necesidad cada vez mayor de contar con terrenos para la construcción de depósitos de seguridad.

De acuerdo a la Ley General de Residuos Sólidos, es necesaria la aprobación de un Estudio de Impacto Ambiental (EIA) para la implementación de instalaciones de tratamiento, transferencia y relleno sanitario de residuos sólidos. El procedimiento de aprobación del EIA implica la participación informada de la ciudadanía a través de talleres informativos y audiencias públicas, espacios en los que la población de las áreas de influencia podrían manifestar su apoyo o rechazo al proyecto, definiendo de esta manera su viabilidad o no.

### 1.2.3 Justificación Económica.

Con la implementación del presente trabajo, se pretende reducir sustancialmente el costo que actualmente incurren las empresas generadoras de *pentóxido de vanadio agotado* referido a su transporte y disposición final en rellenos de seguridad particulares.

El transporte y disposición final del *pentóxido de vanadio agotado* en rellenos de seguridad implica un costo importante ya que es efectuado por empresas altamente especializadas, las mismas que deben cumplir requerimientos técnicos, sanitarios, de seguridad y ambientales, a saber:

- **De Calidad Técnica:** El transporte de los residuos peligrosos debe evitar la contaminación del medio ambiente, tomando las medidas de seguridad del caso, mientras que la disposición final deberá realizarse en celdas que eviten el contacto del residuo peligroso con el ambiente.
- **De Calidad Sanitaria:** El transporte y manipuleo de los residuos peligrosos debe realizarse con personal calificado y que use el equipo de seguridad apropiado a las características de dicho residuo para evitar daños a la salud de los trabajadores.
- **De Calidad Ambiental:** El transporte y manipuleo de los residuos peligrosos debe asegurar la protección adecuada de la napa freática, aguas superficiales, suelo y aire de acuerdo a criterios de calidad ambiental establecidos por los organismos correspondientes.

### **1.3 Formulación de objetivos de la investigación.**

#### **1.3.1 Objetivo General.**

Fijar la mayor cantidad posible de vanadio en una escoria metalúrgica, la misma que debe ser químicamente estable a la acción del intemperismo para no impactar negativamente la calidad de las aguas superficiales y subterráneas aledañas a los depósitos industriales de escorias.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos.**

- Determinar la proporción de catalizador agotado a ser dosificado en la carga al horno de fundición de cobre para obtener la mayor fijación de vanadio en la fase escoria.
- Verificar que la escoria metalúrgica obtenida no genere aguas ácidas mediante la aplicación de pruebas geoquímicas, tales como el conteo Ácido Base (ABA test).
- Verificar que la escoria metalúrgica obtenida sea químicamente estable a la acción de la lluvia ácida mediante la aplicación de pruebas de lixiviación bajo condiciones ambientales (test SPLP: método 1312 US EPA).
- Verificar que el cobre blíster obtenido en la fundición de cobre durante el tratamiento del *pentóxido de vanadio agotado* se mantenga dentro de los rangos de calidad química requeridos para su procesamiento posterior.
- Verificar que los niveles de vanadio en el material particulado no excedan los límites máximos permisibles (LMP) tanto de emisiones por chimeneas como en ambientes de trabajo para proteger el medio ambiente y la salud de los trabajadores.

#### **1.4 Formulación de la Hipótesis.**

El catalizador *pentóxido de vanadio agotado* generado como residuo en las plantas de ácido sulfúrico puede ser fijado en las escorias metalúrgicas de fundiciones de cobre, logrando un producto que sea químicamente estable en condiciones naturales.

#### **1.5 Alcance de la Investigación.**

Para el desarrollo del presente trabajo se efectuaron pruebas a nivel de laboratorio e industrial para determinar la proporción máxima de *pentóxido de vanadio agotado* que pueda adicionarse a la carga de un horno de fusión de cobre para obtener una escoria metalúrgica que sea químicamente estable en condiciones naturales.

#### **1.6 Organización de la Tesis.**

El presente trabajo está organizado en cinco capítulos:

En el primer capítulo se presenta una introducción con la definición del problema, la formulación de los objetivos y la hipótesis planteada, así como los alcances de la investigación.

En el segundo capítulo se hace un diagnóstico de la situación actual de las plantas de ácido sulfúrico en el Perú y de la normativa legal aplicable, así como los impactos ambientales asociados a su operación, incidiendo en la disposición final del residuo *pentóxido de vanadio agotado*.

En el tercer capítulo se presenta el marco teórico de formación de escorias metalúrgicas y los fundamentos del proceso propuesto, definiendo los mecanismos que gobiernan el mismo.

En el cuarto capítulo se desarrolla la parte experimental a nivel laboratorio e industrial de fijación de *pentóxido de vanadio agotado* en escorias, discutiéndose los resultados para definir la viabilidad técnica del proceso propuesto.

En el quinto capítulo se detallan las pruebas geoquímicas y de estabilidad química a las que se sometieron las escorias obtenidas para comprobar la sostenibilidad ambiental del proceso propuesto.

Finalmente, se presenta la confirmación de la hipótesis planteada inicialmente, las respectivas conclusiones y recomendaciones, así como las referencias bibliográficas.

## CAPITULO II. DIAGNOSTICO DE LA SITUACION ACTUAL

### 2.1 Plantas de Ácido Sulfúrico.

El Ácido Sulfúrico es un producto industrial fundamental, sus aplicaciones son numerosas y su consumo es extraordinario. Los usos del ácido sulfúrico son tan variados que el volumen de su producción proporciona un índice aproximado de la actividad general industrial. Por ejemplo, a principios de la década de 1970, la producción anual de ácido sulfúrico en Estados Unidos, el mayor productor, sobrepasaba los 29 millones de toneladas, que correspondían a una producción diaria de 1/3 kg por persona al año. Este ácido es un producto que directa o indirectamente está presente en toda industria, y su consumo es el termómetro de la industria de un país.

#### 2.1.1 Fabricación de Ácido Sulfúrico en la Industria Metalúrgica.

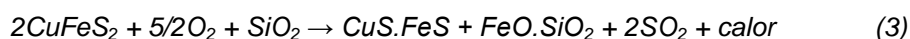
**2.1.1.1 Materia Prima.** Se refiere a los concentrados y minerales sulfurados de cobre, plomo y zinc que son procesados por vía pirometalúrgica para la obtención de metales refinados. El azufre generalmente está presente en forma de sulfuro de cobre (calcopirita  $\text{CuFeS}_2$ , calcosina  $\text{Cu}_2\text{S}$ ), sulfuro de plomo (galena  $\text{PbS}$ ) y sulfuro de zinc (blenda  $\text{ZnS}$ ), pudiendo presentarse también en forma de sulfuro de hierro (pirita  $\text{FeS}_2$ ), sulfatos, etc.



**2.1.1.2 Generación del Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>).** El proceso de obtención del SO<sub>2</sub> gaseoso depende del metal principal, a saber:

- **Metalurgia de Cobre.** En la actualidad, la mayoría de fundiciones de cobre emplean reactores de fusión instantánea, como el proceso Isasmelt, Outokumpu, Ausmelt, etc.

En términos generales, los concentrados finos se inyectan al interior de un reactor donde se queman con aire y oxígeno. La reacción de fusión puede representarse por la siguiente ecuación:



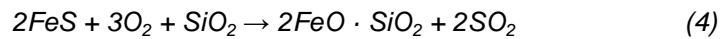
Dentro de las ventajas principales que presentan estas tecnologías, podemos citar el bajo consumo de combustibles (procesos autógenos) y la alta concentración de SO<sub>2</sub> en los gases que generan (>10%), lo cual facilita su tratamiento posterior.

La subsiguiente etapa de conversión del cobre consiste en la oxidación de la mata líquida proveniente de la fundición (CuS.FeS), la que se lleva a cabo en un convertidor horizontal cilíndrico Peirce-Smith revestido con refractario básico. La conversión elimina el hierro y el azufre de la mata, dando por resultado la producción de un cobre “*blister*” (cobre ampolloso) sin refinar (99% de Cu).

La conversión se lleva a cabo en dos etapas consecutivas, en las cuales se utiliza la inyección de aire hacia el interior de la fase del sulfuro fundida.

Estas son:

a) La etapa formadora de escoria o de eliminación del FeS, es decir:



b) La etapa formadora de cobre blíster:



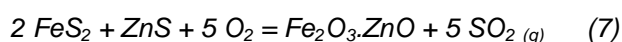
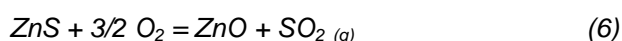
La concentración de  $\text{SO}_2$  en los gases del convertidor es moderadamente alta (> 5%) y puede ser eliminado eficientemente de los gases en forma de ácido sulfúrico.

- **Metalurgia de Plomo.** En el inicio del proceso convencional de fundición de plomo se tiene una máquina de sinterización, la que fija el azufre presente en los concentrados de plomo como  $\text{SO}_2$  a través de un proceso de tostación oxidante, obteniéndose un material aglomerado con características físicas apropiadas para ser tratado en el proceso de fusión – reducción en los hornos de manga.

Una de las desventajas de este proceso es que la totalidad del  $\text{SO}_2$  generado no puede ser convertido en ácido sulfúrico ya que la concentración de  $\text{SO}_2$  varía a lo largo de la máquina sinterizadora, presentando mayor concentración en las primeras cajas (zona de reacción, > 6%  $\text{SO}_2$ ) y disminuye gradualmente en las últimas cajas (zona de enfriamiento, < 4%  $\text{SO}_2$ ), por lo que solo se podría procesar el gas proveniente de la zona de reacción.

- **Metalurgia de Zinc.** La Tostación se efectúa generalmente en un tostador de cama turbulenta para oxidar los sulfuros, remover el 99% del

azufre contenido en los concentrados de zinc y obtener una calcina que es un producto intermedio en el proceso de refinación de zinc que contiene óxidos, y gases residuales conteniendo anhídrido sulfuroso (SO<sub>2</sub>). Las principales reacciones químicas que se producen en esta etapa son:



### 2.1.1.3 Obtención de Ácido Sulfúrico.

El método más común para fijar azufre a partir de los gases de SO<sub>2</sub> es la producción de ácido sulfúrico. Mientras los gases contengan 4% de SO<sub>2</sub> ó más, se pueden usar para obtener ácido sulfúrico por el proceso estándar de contacto.

El proceso de obtención de ácido consiste en cuatro etapas básicas:

**a. Purificación del gas.** Los polvos son removidos por precipitación electrostática y se elimina la humedad mediante un lavado con ácido sulfúrico diluido (150 °C).

**b. Conversión.** El SO<sub>2</sub> se oxida con el contacto de un catalizador, generalmente Pentóxido de Vanadio (V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), para dar SO<sub>3</sub> por reacción exotérmica:

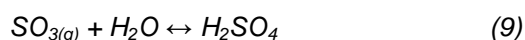


Esta reacción es caracterizada por la eficiencia de conversión, la cual es definida de la siguiente manera:

$$\text{Eficiencia de Conversión} = \frac{SO_2 \text{ ingreso} - SO_2 \text{ salida}}{SO_2 \text{ ingreso}} \times 100$$

Para maximizar la formación de  $SO_3$ , se toman en cuenta consideraciones termodinámicas y estequiométricas. De acuerdo al Principio de Le Chatelier-Braun, se puede variar la temperatura, presión o concentración de los reactantes para desplazar el equilibrio hacia la formación de productos.

**c. Absorción.** El  $SO_3$  es absorbido en  $H_2SO_4$  al 99% (el resto es agua) para producir  $H_2SO_4$  de 99,6%.



En un proceso de simple contacto, la conversión obtenida es aproximadamente del 98%, dependiendo del catalizador y del diseño, mientras que en un proceso de doble contacto se puede alcanzar una conversión hasta del 99,5%.

**d. Dilución.** El  $H_2SO_4$  de 99,6% de concentración es descargado del sistema de absorción y diluido con agua hasta un  $H_2SO_4$  de 98,5%, el cual es el producto usual del mercado. Otro producto comercial es el  $H_2SO_4$  de 93%.

### 2.1.2 Impactos ambientales.

Los principales impactos ambientales que se pueden dar de forma general en cualquier planta de producción de ácido sulfúrico son los que se detallan a continuación.

### 2.1.2.1 Consumos Energéticos.

Este impacto es positivo. Los procesos de oxidación del azufre, de  $\text{SO}_2$  a  $\text{SO}_3$ , y el proceso de absorción, son exotérmicos, por lo que la recuperación de calor en las plantas de producción de ácido sulfúrico es clave tanto económica como ambientalmente. Se estima que entre el 57% y 64% de la energía producida generará vapor que se empleará en otros puntos de la planta.

La producción de energía a partir de estos procesos tiene además la ventaja de que no forma  $\text{CO}_2$  como cuando se utiliza petróleo o gas natural.

### 2.1.2.2 Consumo de agua.

Este impacto es negativo. El agua se emplea en dos formas:

- **Agua de refrigeración.** La mayoría de las plantas tienen instalados sistemas en circuito cerrado para controlar el consumo de agua de refrigeración.
- **Agua de dilución,** para ajustar la concentración del ácido mediante la adición de agua en el sistema de absorción. El control de la adición de agua es importante para asegurar la correcta concentración en la torre de absorción y para prevenir nieblas ácidas en la chimenea.

### 2.1.2.3 Emisiones gaseosas.

Este impacto es negativo. En el proceso de fabricación de ácido sulfúrico se pueden producir emisiones a la atmósfera de  $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$  y  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .

Estas emisiones tienen diferentes orígenes en el proceso y existen diversas técnicas para minimizar su emisión, las que se detallan seguidamente:

**Tabla N° 2.1 Emisiones gaseosas y sus causas.**

Emisión	Causas	Técnicas de minimización
SO <sub>2</sub>	Baja eficiencia en la conversión de SO <sub>2</sub> a SO <sub>3</sub> .	En relación con los gases: Composición, velocidad a través del catalizador y de repartición, calidad de la refrigeración, presión de operación. Diseño del convertidor, número de lechos. En relación con el catalizador: calidad y cantidad.
SO <sub>3</sub>	Mala eficacia de absorción. Presión de vapor del ácido sulfúrico y Oleum.	Mejoras en la absorción: Diseño de la torre de absorción (velocidad), distribución del ácido, temperatura del ácido (presión de vapor).
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Diseño de la torre. Formación de nieblas. Presión de vapor.	Recogida del escurrido en la propia torre. Diseño de la torre de absorción. Separadores de gotas, o filtros de nieblas (internos). Control del proceso: eficacia de la torre de secado, temperatura de entrada del gas en la absorción, contenido de NOx en los gases, presión de vapor del ácido.

#### 2.1.2.4 Descargas de agua.

Este impacto es negativo. Se pueden tener las siguientes descargas de agua en una planta de producción de ácido sulfúrico:

- Drenaje de soluciones de ácido débil,
- Derrames accidentales.

Para controlar este impacto, se deben operar plantas de tratamiento de aguas, cuyas descargas deberán cumplir los Límites Máximos Permisibles

de Efluentes Líquidos Minero-Metalúrgicos establecidos en la normativa ambiental peruana<sup>1</sup>.

#### **2.1.2.5 Residuos sólidos.**

Durante la fabricación del ácido sulfúrico se pueden producir los siguientes residuos sólidos:

- **Catalizadores agotados.** Estos residuos podrían reciclarse para recuperar el contenido de vanadio (generalmente hecho por el propio fabricante) o deberán ser dispuestos *“en forma segura, sanitaria y ambientalmente adecuada”*<sup>2</sup> por ser un residuo peligroso.
- **Residuos de envases y embalajes.** De acuerdo a su contenido, estos residuos son considerados peligrosos y deben ser manejados como tales<sup>3</sup>.

#### **2.1.2.6 Contaminación Accidental.**

Siempre hay riesgo de contaminación accidental cuando se manejan productos químicos. En una planta de producción de ácido sulfúrico la etapa de mayor riesgo es el transporte del producto. Debido a este riesgo, el transporte de estos materiales está sometido a regulaciones específicas.

También existe riesgo de contaminación accidental en el almacenamiento del ácido sulfúrico, pero cada planta tiene diferentes sistemas para controlar los derrames. Se cuenta, además, con guías / reglamentos que se aplican al almacenamiento del ácido sulfúrico.

---

<sup>1</sup> R.M. 011-96-EM/VMM y D.S. 010-2010-MINAM.

<sup>2</sup> Artículo 25 de Reglamento de la Ley General de Residuos Sólidos.

<sup>3</sup> Artículo 24° de la Ley General de Residuos Sólidos.

## 2.2 Marco Legal Aplicable a las Plantas de Ácido Sulfúrico.

Los dispositivos legales aplicables a las plantas de ácido sulfúrico son:

### 2.2.1 Aire.

El Reglamento de Estándares Nacionales de Calidad Ambiental (ECAs) del Aire, aprobado por D.S. 074-2001-PCM, y el D.S. 003-2008-MINAM<sup>4</sup>, regulan a nivel nacional los ECAs del aire.

Los ECAs para el aire se definen como la máxima concentración de contaminantes permitidos en el aire, en su función de cuerpo receptor. Para estos efectos, se establecieron como contaminantes del aire al dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), material particulado con diámetro menor o igual a 10 micrómetros (PM<sub>10</sub>), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), ozono (O<sub>3</sub>), plomo (Pb) y sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S). Adicionalmente, el valor anual de concentración del plomo fue establecido por D.S. 069-2003-PCM.

Por otro lado, a través del reglamento sobre los niveles del estado de alerta nacional para contaminantes del aire, D.S. 009-2003-SA, modificado por D.S. 012-2005-SA, se definieron los diferentes estados de alerta para contaminantes de aire basados en las concentraciones críticas. Estos niveles de alerta fueron establecidos para los siguientes contaminantes: material particulado (PM<sub>10</sub>), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO) y sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S).

---

<sup>4</sup> Los estándares establecidos en esta norma entrarán en vigencia conforme al cronograma aprobado en la misma. Asimismo, resulta necesario resaltar que aún no se han emitido las normas para su implementación de acuerdo al artículo 2.



Mediante R.M. 315-96-EM/VMM, se establecieron los Niveles Máximos Permisibles (NMPs) para emisiones gaseosas de anhídrido sulfuroso, partículas, plomo y arsénico provenientes las unidades minero-metalúrgicas.

### **2.2.2 Aguas.**

La Ley de Recursos Hídricos, Ley 29338 y su Reglamento aprobado mediante D.S. 001-2010-AG, regulan el uso y gestión de los recursos hídricos (es decir, agua superficial, subterránea, continental y los bienes asociados a ésta, marítima y atmosférica). Esta ley reconoce que el agua es un recurso renovable con valor sociocultural, económico y ambiental. Por ello, basa el uso del agua en una gestión integrada y en el equilibrio entre los referidos valores. Asimismo, establece las siguientes reglas básicas:

- **El agua es propiedad de la Nación.** No hay propiedad privada sobre el agua. Es un bien de uso público y su administración puede ser otorgada y ejercida en armonía con el bien común; y
- **La gestión integrada de los recursos hídricos es de interés nacional y necesidad pública.** Ello con el propósito de lograr eficiencia y sostenibilidad en el manejo de cuencas hidrográficas y acuíferos.

La referida ley ha creado el Sistema Nacional de Gestión de los Recursos Hídricos (SNGRH), cuyo ente rector y máxima autoridad técnico-normativa es la Autoridad Nacional del Agua (ANA).

El uso de los recursos hídricos está condicionado a su disponibilidad. Por ello se han establecido 3 tipos de usos en orden prioritario: uso primario (destinado a la satisfacción de necesidades humanas primarias), uso poblacional (captación del agua tratada de una fuente o red pública) y uso

productivo (con fines agrarios, acuícola y pesquero, energético, industrial, medicinal, minero, recreativo, turístico y de transporte).

Por otro lado, mediante el D.S. 010-2010-MINAM<sup>5</sup>, que deroga parcialmente la R.M. 011-96-EM/VMM<sup>6</sup>, se establecieron los Límites Máximos Permisibles (LMPs) de pH, sólidos suspendidos, aceites y grasas, cianuro, arsénico, cadmio, cromo hexavalente, cobre, hierro, plomo, mercurio y zinc para efluentes líquidos minero-metalúrgicos.

La Dirección General de Asuntos Ambientales Mineros (DGAAM) aprueba las descargas dentro del contexto de los Instrumentos de Gestión Ambiental, debiendo asegurar el cumplimiento con los LMPs y con los Estándares de Calidad de Agua aprobados por D.S. 002-2008-MINAM e implementados mediante D.S. 023-2009-MINAM. En este sentido, previamente al otorgamiento de autorizaciones sanitarias de vertimientos, la ANA requiere de la presentación de un EIA aprobado por el sector respectivo.

Los puntos de control de los efluentes deben estar ubicados tal como se establece en el Instrumentos de Gestión Ambiental y deben ser identificados para propósitos de presentación de los reportes. La frecuencia de monitoreo, los análisis químicos y la presentación de reportes se harán de acuerdo al volumen de efluente descargado conforme a los anexos 4 y 5 de la R.M. 011-96-EM/VMM.

---

<sup>5</sup> El artículo 4 de esta norma otorga un plazo de 20 meses para que los titulares mineros que se encuentren desarrollando actividades se adecuen a sus disposiciones.

<sup>6</sup> La Resolución Ministerial 011-96-EM/VMM fue derogada parcialmente por la Disposición Complementaria Derogatoria del D.S. 010-2010-MINAM, estableciéndose que sus artículos 7, 9, 10, 11 y 12, así como sus Anexos 03, 04, 05 y 06 seguirán en vigencia hasta la aprobación y entrada en vigencia del Protocolo de Monitoreo de Aguas y Efluentes Líquidos. Dicho Protocolo debería ser aprobado por el Ministerio de Energía y Minas en un plazo no mayor a doscientos cincuenta (250) días contados a partir del 22 de agosto del 2010.

### 2.2.3 Residuos Sólidos y Residuos Sólidos Peligrosos

El manejo, transporte y disposición final, así como la gestión integral de los residuos sólidos, peligrosos y no peligrosos, tienen como marco legal a la Ley General de Residuos Sólidos, Ley 27314<sup>7</sup>, su Reglamento, D.S. 057-2004-PCM y el Reglamento Nacional de Transporte Terrestre de Materiales y Residuos Peligrosos, D.S. 021-2008-MTC<sup>8</sup>.

Dichas normas establecen los derechos, obligaciones, atribuciones y responsabilidades de la sociedad en su conjunto, para asegurar una gestión y manejo de los residuos sólidos, sanitaria y ambientalmente adecuada, con sujeción a los principios de minimización, prevención de riesgos ambientales y protección de la salud y el bienestar de la persona humana. Se aplica a las actividades, procesos y operaciones de la gestión y manejo de residuos sólidos<sup>9</sup>. Asimismo, comprende las actividades de internamiento y tránsito por el territorio nacional de residuos sólidos<sup>10</sup>.

### 2.3 Producción de Ácido Sulfúrico en el Perú.

En el Perú hay 3 empresas de la gran minería que cuentan con plantas de fabricación de ácido sulfúrico en su proceso productivo. Estas son la Fundición de Ilo de Southern Copper Corporation, la Refinería de Zinc de Cajamarquilla perteneciente a la empresa Votorantim Metais Cajamarquilla S.A. y el Complejo Metalúrgico de La Oroya de propiedad de Doe Run Perú S.A.

---

<sup>7</sup> Modificada por D. Leg. 1065 y las Leyes 29325 y 27353.

<sup>8</sup> Modificado por los D.S., 030-2008-MTC, 043-2008-MTC, 057-2008-EM y 047-2010-MTC

<sup>9</sup> Desde la generación hasta su disposición final, incluyendo las distintas fuentes de generación de dichos residuos, en los sectores económicos, sociales y de la población.

<sup>10</sup> No están comprendidos en el ámbito de esta Ley los residuos sólidos de naturaleza radiactiva, cuyo control es de competencia del Instituto Peruano de Energía Nuclear.

**Tabla N° 2.2. Producción Proyectada de Ácido Sulfúrico en el Perú.**

	Refinería de Zinc de Cajamarquilla - Votorantim	Fundición de Ilo – Southern Copper Corp. (2 plantas)	Fundición de La Oroya – Doe Run Perú SRL		
			Circuito de Zinc	Circuito de Plomo	Circuito de Cobre (en construcción)
Capacidad Instalada de Producción de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 98,5%/año	614 752	1 144 000	63 000	115 000	220 000
TM de H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 98,5%/año	499 239	962 984	58 000	115 000	220 000

**Fuente:** Elaboración propia.

Como puede apreciarse, de reanudarse las operaciones en La Oroya y completarse la construcción de la planta de ácido del circuito de cobre, se proyecta en el Perú una producción anual de 1 855 223 t de ácido sulfúrico de 98,5%.

## 2.4 Uso del Pentóxido de Vanadio como Catalizador.

### 2.4.1 Catalizadores.

Uno de los pasos más importante durante la fabricación de ácido sulfúrico es la producción de trióxido de azufre, lo que se logra al pasar una mezcla de gases de dióxido de azufre y oxígeno a través de un lecho de catalizador, de acuerdo a la mencionada ecuación:



Sin la presencia de un catalizador, esta reacción necesitaría una temperatura muy elevada para tener una velocidad realista. Sin embargo, a

mayores temperaturas el equilibrio se desplaza a favor de la formación de  $\text{SO}_2$  lo que hace muy pobre la conversión.

De todas las sustancias probadas con actividad catalítica para la oxidación del dióxido de azufre, es el pentóxido de vanadio el de uso casi exclusivo, el cual se ubica en uno o más lechos en un equipo conocido como Convertidor.

Los convertidores son dimensionados en base a la velocidad superficial del gas que atraviesa el lecho de catalizador. Si las velocidades son muy altas, la cantidad de  $\text{SO}_2$  que atraviesa el catalizador por unidad de tiempo se incrementa dando como resultado una reducción de la eficiencia de conversión. A velocidades muy bajas la capacidad de conversión del catalizador no es eficientemente empleada.

A velocidades superficiales elevadas, la caída de presión a través del lecho empieza a hacerse demasiado alta. Velocidades bajas del gas implican bajas caídas de presión, dando como resultado problemas en la distribución del gas. Las caídas de presión en el lecho de catalizador deben mantenerse encima de 50 mm WC (2 pulg. WC) para asegurar una distribución razonable de gas a través del lecho de catalizador.

#### **2.4.2 Mecanismo de Catalización.**

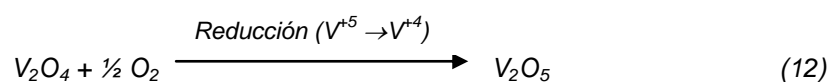
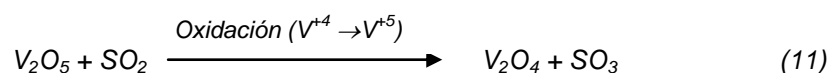
El catalizador pentóxido de vanadio acelera la reacción química entre el dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y el oxígeno ( $\text{O}_2$ ) para formar trióxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ).

El catalizador usado en la fabricación de ácido sulfúrico es el pentóxido de vanadio (5 - 10% V en peso), el cual es considerado como el componente activo; no obstante, es un catalizador relativamente pobre y solo cuando se

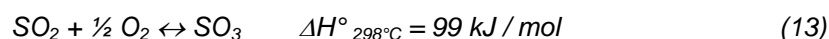
le adicionan los llamados “activadores” puede alcanzar elevadas velocidades de conversión.

Bajo condiciones normales de operación, el catalizador se funde y la reacción de oxidación toma lugar sobre este líquido fundido. Originalmente, el sulfato de potasio fue usado como activador pero recientemente se está usando el sulfato de cesio, ya que este último reduce el punto de fusión del catalizador, pudiendo por lo tanto ser usado a menores temperaturas. En todos los casos, el catalizador está soportado por una matriz de sílice.

Algunos investigadores indican que los componentes activos del pentóxido de vanadio se disocian y la oxidación de dióxido de azufre podría seguir el siguiente esquema:



La reacción total que se observa es reversible y exotérmica:



El equilibrio químico es alcanzado cuando los reactantes se forman tan rápidamente como los productos, tal que la composición de la mezcla permanece constante y no cambia con el tiempo.

La velocidad a la que el  $SO_2$  y  $O_2$  reaccionan para formar  $SO_3$  será proporcional a la cantidad de  $SO_2$  y  $O_2$  presentes en el gas y puede ser expresada en términos de sus presiones parciales y una constante de proporcionalidad o velocidad. De igual manera, la velocidad de la reacción

inversa de  $\text{SO}_3$  a  $\text{SO}_2$  y  $\text{O}_2$  puede ser expresada en términos de la presión parcial de  $\text{SO}_3$  en el gas.

$$r_1 = k_1 \times p_{\text{SO}_2}^m \times p_{\text{O}_2}^n \quad (14)$$

$$r_2 = k_2 \times p_{\text{SO}_3}^x \quad (15)$$

En el equilibrio, la velocidad de las reacciones directa e inversa es igual:

$$r_1 = r_2 = k_1 \times p_{\text{SO}_2}^m \times p_{\text{O}_2}^n = k_2 \times p_{\text{SO}_3}^x \quad (16)$$

Los exponentes  $m$ ,  $n$  y  $x$  están referidos al mecanismo de reacción y catálisis. Los investigadores han propuesto diversos valores para estos exponentes basados en experimentos diseñados para medir la velocidad de reacción. Lo más simple es asumir  $m = 1$ ,  $n = \frac{1}{2}$  y  $x = 1$ . Reordenando la ecuación (16), da:

$$\frac{k_1}{k_2} = K_p = \frac{p_{\text{SO}_3}}{p_{\text{SO}_2} \times p_{\text{O}_2}^{1/2}} \quad (17)$$

Donde  $K_p$  es la constante de equilibrio de presión parcial. La constante de equilibrio de presión parcial es una función de la temperatura. Muchas relaciones han sido propuestas en base a la experimentación con diferentes condiciones de catálisis y operación. Un ejemplo de una de estas relaciones es:

$$\log K_p = \frac{4956}{T} - 4.678 \quad (18)$$

Donde  $T = \text{temperatura (K)}$ .

Al combinar las ecuaciones (17) y (18), puede obtenerse una relación entre temperatura y el grado de conversión y se puede plotear una curva de equilibrio como en la Figura N° 2.1. La curva de equilibrio dependerá de la concentración inicial de  $\text{SO}_2$  y  $\text{O}_2$  en el gas. A menor concentración inicial de  $\text{SO}_2$ , mayor será su posición en la curva de equilibrio. Esto simplemente significa que mayores conversiones pueden ser obtenidas con menores concentraciones iniciales de  $\text{SO}_2$  en el gas.

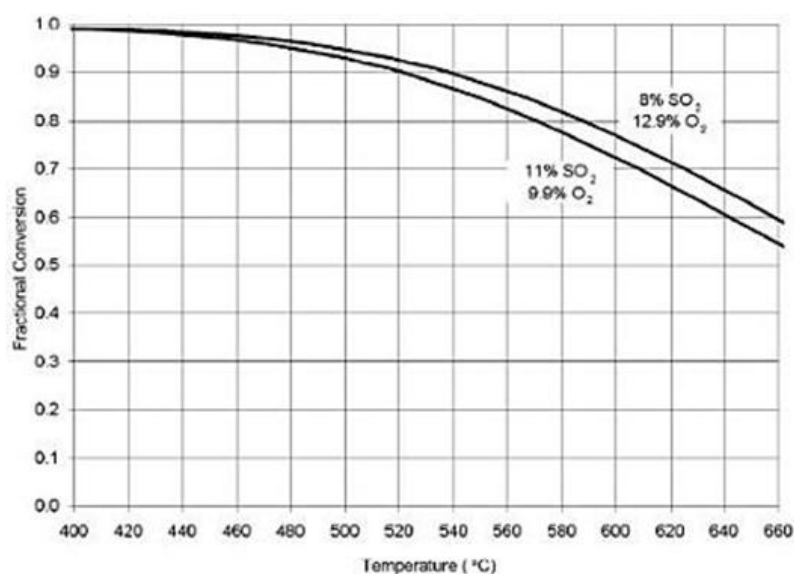


Figura N° 2.1. Curvas de Equilibrio para 8% y 11% de  $\text{SO}_2$ .

#### 2.4.2.1 Formas del Catalizador Pentóxido de Vanadio.

Para la manufactura del ácido sulfúrico, el catalizador pentóxido de vanadio viene en una variedad de tamaños, formas, formulaciones, etc. Los diversos tipos de catalizador disponible permiten tanto al diseñador como al operador maximizar la conversión de  $\text{SO}_2$  a  $\text{SO}_3$  para diferentes tipos de planta, composición de gases y requerimientos de emisión.

Existen tres formas básicas del catalizador que se usan actualmente: pellet, anillo y estrella. La primera forma en ser usada fue el pellet, que es simplemente un cilindro sólido. Su desventaja es la dificultad que tienen los



reactantes de difundirse hasta el centro del catalizador y de manera inversa, la dificultad de difusión de los productos hacia afuera. En esencia, el centro del catalizador no se usa totalmente.



**Figura N° 2.2. Pellets de Pentóxido de Vanadio.**

Los catalizadores en forma de anillo son básicamente pequeños cilindros con un espacio vacío en la parte media. Esto proporciona acceso a los reactantes a la parte central del catalizador, dando como resultado una mejor utilización. El área superficial total del anillo es mayor que el pellet, lo que aumenta la superficie de contacto al gas.



**Figura N° 2.3. Anillos de Pentóxido de Vanadio.**

El catalizador en forma de estrella es una mejora respecto al de forma de anillo. Los canales en la parte externa incrementan el área superficial total y confieren una mayor exposición a la estructura porosa del catalizador, permitiendo una difusión más fácil y más rápida de los reactantes y productos.



**Figura N° 2.4. Estrellas de Pentóxido de Vanadio**

#### **2.4.2.2 Actividad del catalizador Pentóxido de Vanadio.**

La actividad es una medida de la capacidad del catalizador para convertir dióxido de azufre en trióxido de azufre. A mayor actividad como catalizador, se necesitará menor cantidad de catalizador para alcanzar la conversión requerida. La formulación química es el factor principal en la actividad del catalizador, aunque otros factores pueden también afectar su actividad tales como la forma del catalizador, estructura de los poros, proceso de manufactura, etc.

#### **2.4.2.3 Color del catalizador Pentóxido de Vanadio.**

El catalizador completamente sulfatado se caracteriza por un color amarillo, dorado, naranja o amarillo/verdoso. Este color es indicativo del vanadio en

su estado de oxidación +5 ( $V^{+5}$ ). Si el vanadio está en su estado de oxidación +4 ( $V^{+4}$ ), el catalizador tendrá un color verde, verde pálido o azul pálido y puede ser fácilmente oxidado de vuelta al estado  $V^{+5}$ . El catalizador con Vanadio en el estado +3 de oxidación ( $V^{+3}$ ) presentará un color azul oscuro o negro y no podrá ser convertido de vuelta al estado de oxidación +5. Este catalizador debe ser reemplazado ya que no está activo.



Figura N° 2.5. Pentóxido de Vanadio degradado

## 2.5 Riesgos Ambientales y a la Salud de las Personas.

### 2.5.1. Comportamiento en el Medio Ambiente.

- **Agua:** Los compuestos del vanadio son más densos que el agua y se depositan en el fondo. El pentóxido de vanadio se disuelve lentamente en un gran volumen de agua y forma mezclas tóxicas.
- **Aire:** La atmósfera representa un medio de transporte. El pentóxido de vanadio es un reactivo sólido que favorece la combustión de otras sustancias combustibles.
- **Suelo:** Los compuestos de vanadio son geogénicos y se encuentran en todas partes. El vanadio es un oligoelemento esencial y sus compuestos

son asimilados por las plantas e incorporados a sus procesos de crecimiento. Así, el vanadio es extraído del suelo e ingresa a la cadena alimentaria.

### **2.5.2 Riesgos a la Salud de las Personas.**

La experiencia ha demostrado que los óxidos de vanadio, y en especial el pentóxido producen efectos adversos en el hombre. La inhalación de compuestos de vanadio puede producir efectos tóxicos graves, cuya gravedad depende de la concentración atmosférica de los compuestos de vanadio y de la duración de la exposición. Pueden aparecer problemas de salud incluso después de una exposición breve (por ejemplo, 1 hora), y los síntomas iniciales son: lagrimeo profuso, sensación de ardor en la conjuntiva, rinitis serosa o hemorrágica, dolor de garganta, tos, bronquitis, expectoración y dolor torácico.

La Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) ha clasificado al pentóxido de vanadio como posiblemente carcinogénico en seres humanos basado en evidencia de cáncer del pulmón en ratones expuestos al vanadio.

#### **Medidas de salud y seguridad.**

Es importante evitar la inhalación de polvo de pentóxido de vanadio del aire. Para su uso como catalizador en la producción de ácido sulfúrico, debe emplearse en forma de aglomerado o escamas, lo que evita la producción de polvo.

En los procesos asociados con la obtención de vanadio metálico y durante el tamizado del catalizador en las operaciones de mantenimiento, debe evitarse

el escape de polvo efectuando estos procesos en cerrado e instalando sistemas de ventilación con extracción.

Durante las labores de zarandeo y recambio de pentóxido de vanadio, los trabajadores deben utilizar equipos de protección respiratoria adecuados y una mascarilla que les cubra completamente el rostro, con protección ocular. Siempre que sea posible, se deberá reducir la necesidad de que los trabajadores penetren en el interior de los hornos para efectuar trabajos de mantenimiento; cuando sea indispensable realizar labores de limpieza durante la descarga, se deberá efectuar con chorros de agua y aplicando métodos que no requieren la entrada física de los trabajadores al convertidor.

## **2.6 Manejo de Catalizadores Agotados.**

Aunque en teoría el catalizador no interviene en la reacción química, en la práctica se degrada con el tiempo y debe ser reemplazado periódicamente. Tanto la dilatación térmica como las inevitables vibraciones causadas por el gas al atravesar los lechos ocasionan que el catalizador se desmenuce en material fino, los mismos que incrementan la caída de presión en el convertidor, creando un problema operacional.

Para que la caída de presión retorne a sus valores normales, se requiere que el catalizador en el convertidor sea periódicamente removido, zarandeado y reinstalado, creando un flujo de residuos que debe ser apropiadamente manipulado y dispuesto para prevenir daños al medio ambiente.

La contaminación por contacto con impurezas como arsénico, o el cambio en el estado de oxidación de  $V^{+5}$  a  $V^{+3}$  también “*agotan*” al catalizador, debiendo ser reemplazado por catalizador fresco.

### 2.6.1. Reciclado del Catalizador *Pentóxido de Vanadio agotado*.

El catalizador agotado puede ser reciclado como sales de vanadio o como ferrovandio para la producción de acero. Previamente, los recicladores requerirán una muestra del catalizador agotado para aceptarlo como material de reciclaje.

El catalizador agotado no puede contener elementos tóxicos o materiales radioactivos, siendo muy importante que tenga un bajo contenido de arsénico para ser reciclado.

**Tabla N° 2.3. Análisis Típico para Catalizador Agotado.**

V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	mín, 3% en peso
K <sub>2</sub> O	máx, 10% en peso
P	máx, 0,5% en peso
Sn, Pb, As, Sb, Bi, Cu, Zn, Cd, Hg	máx, 0,1% peso

Generalmente, el tipo de empaque del catalizador agotado es especificado por los recicladores para satisfacer sus propios requerimientos de manipuleo. Cada embarque deberá contar con una hoja MSDS.

### 2.6.2. Recuperación del Vanadio.

La recuperación del vanadio a partir del catalizador agotado es parte integral de las operaciones de la mayoría de productores de vanadio. El contenido de vanadio en el catalizador agotado es a menudo mayor que en los minerales, por lo tanto es materia prima preferida de algunos productores. Algunos recicladores envían el catalizador agotado a las minas de vanadio, donde se mezcla con el mineral en sus líneas de procesamiento normal.

En otros casos, el vanadio es recuperado del catalizador agotado por vía hidrometalúrgica o pirometalúrgica.

**2.6.2.1 Hidrometalurgia.** En la revisión bibliográfica efectuada se han encontrado hasta 3 métodos de recuperación de vanadio:

- 1) Este proceso de aplicación en Brasil empieza con una reducción de tamaño a malla 65 y una lixiviación a 60 °C con ácido sulfúrico diluido y tiosulfato de sodio ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ ) como agente reductor. Esto reduce el estado de oxidación del vanadio de +5 a +4, permitiendo su disolución en forma de oxi-sulfato de vanadio ( $\text{VOSO}_4$ ). El *cake* obtenido luego de una etapa de filtración y lavado puede ser dispuesto como material inerte, mientras que a la solución filtrada se le incrementa el pH hasta 4 con soda cáustica, carbonato de sodio o cal para la precipitación del vanadio. La recuperación de vanadio por este método alcanza valores de 85%<sup>11</sup>.
- 2) El catalizador agotado es primero lixiviado con agua a temperatura ambiente en presencia de sulfito de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ), lo que origina que el 99% del vanadio pase a la solución. Después de la separación sólido-líquido, el pH de la solución se eleva a 8,5 con la adición de hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ) produciéndose un precipitado que, después del secado, contiene aproximadamente 25% de  $\text{V}_2\text{O}_5$ . Este sólido es luego tostado con  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  a 700 ° C durante 30 minutos seguido de otra lixiviación con agua, obteniéndose una solución concentrada. El vanadio es separado como vanadato de amonio mediante la adición de  $\text{NH}_4\text{Cl}$ . El producto vanadato de amonio analiza 92,6%  $\text{V}_2\text{O}_5$  después de ser calentado en aire<sup>12</sup>.

---

<sup>11</sup> “Vanadium Recovery by Leaching in Spent Catalysts for Sulfuric Acid Production” – José Luis Magnani. Revista de Ciencia & Tecnología v.8 N° 16 – pp 85-90.

<sup>12</sup> “The Recovery of vanadium from spent catalyst” - Mohanty, J; Rath, PC; Bhattacharya, I N; Paramguru, R K. Mineral Processing and Extractive Metallurgy, v. 120 N° 1, 2011, pp 56-50.

- 3) Gulf Chemical & Metallurgical, uno de los mayores recicladores de catalizadores del mundo, patentó este proceso el cual recupera el pentóxido de vanadio tostando los catalizadores agotados con sodio a temperaturas entre 815 - 980 °C, convirtiendo el vanadio en sales de sodio solubles en agua.

Después de la tostación, la calcina se muele en húmedo en un molino de bolas y se lava con agua para disolver los compuestos de vanadio. La solución de lixiviación se trata con hidróxido de amonio para precipitar selectivamente el metavanadato de amonio, que se filtra y se descompone en pentóxido de vanadio de alta pureza.

**2.6.2.2 Pirometalurgia.** La ruta pirometalúrgica involucra métodos tradicionales de fusión y refinación. Esta ruta no es generalmente económica a menos que una gran cantidad de catalizador agotado sea procesado y los precios del vanadio metálico sean elevados.

En Alemania, la compañía de reciclaje de catalizadores *GfE Metalle and Materialien GMBH* emplea un proceso pirometalúrgico para la obtención de un concentrado fundido de vanadio del cual se extraen reactivos químicos de vanadio de alta pureza<sup>13</sup>.

### **2.6.3 Disposición en Depósitos de Seguridad.**

La disposición final de los residuos tiene como objetivo el confinamiento de los mismos, minimizando las liberaciones de contaminantes. En el caso de residuos peligrosos lo más común es el confinamiento en rellenos de seguridad. Esta tecnología consiste en la disposición en el suelo utilizando obras civiles especialmente diseñadas.

---

<sup>13</sup> “**Handbook of Spent Hydroprocessing Catalysts**” – Meena Marafi, Anthony Stanislaus & Edward Furimsky, Elsevier, 1st. edition 2010.

---

“Disposición final del catalizador pentóxido de vanadio por fijación en una escoria metalúrgica”



En el caso que no se pretenda recuperar el vanadio del catalizador agotado, este puede ser dispuesto finalmente en depósitos de seguridad de dos maneras:

### **2.6.3.1 Estabilización – Solidificación.**

La estabilización consiste en un proceso por medio del cual los contaminantes de un residuo son transformados en formas menos tóxicas o menos móviles o solubles. Las transformaciones se dan por medio de reacciones químicas que fijan los compuestos tóxicos en polímeros impermeables o en cristales estables. Los productos utilizados en este proceso permiten:

- *Mejorar las características físicas del residuo,*
- *Disminuir el área superficial a través de la cual se transfieren los contaminantes,*
- *Reducir la solubilidad de los contaminantes,*
- *Reducir la toxicidad (la disponibilidad) de los contaminantes.*

La solidificación consiste en un tratamiento que genera una masa sólida monolítica de residuos tratados. De esta manera se mejora su integridad estructural, sus características físicas y se facilita su manejo, transporte y disposición final. El empleo de aditivos permite:

- *Incrementar la dureza,*
- *Disminuir la compresibilidad,*
- *Disminuir la permeabilidad.*

Por lo tanto la estabilización-solidificación tiene por objetivo mejorar las características físicas y disminuir el área superficial. De esta forma se reduce la transferencia de masa y la solubilidad de los contaminantes presentes.

Los mecanismos que intervienen en los procesos de estabilización - solidificación son:

- *Macroencapsulamiento*
- *Microencapsulamiento*
- *Absorción*
- *Adsorción*
- *Intercambio iónico*
- *Precipitación*
- *Transformaciones químicas*

Esta técnica es utilizada para residuos básicamente inorgánicos con no más de 10 a 20 % de materia orgánica. Los residuos orgánicos generalmente sufren degradación por lo que no es viable la utilización de estas técnicas.

Las tecnologías aplicadas se clasifican en fijación inorgánica y técnicas de encapsulamiento. Para la fijación inorgánica se utilizan materiales como cemento portland, materiales puzolánicos y cal. Para el encapsulamiento son utilizados polímeros como asfalto, polietileno, urea formaldehído, poliéster y butadieno. Se utiliza también la técnica de transformación en vidrio por medio de la mezcla y fusión con materiales como la sílice.

Como ejemplo de estas tecnologías se puede mencionar:

- a. **Procesos en base a cemento Portland:** los contaminantes presentes en el residuo quedan incluidos dentro de la estructura

cristalina que se forma por la hidratación del cemento. Es un procedimiento utilizado para metales pesados: el níquel y el cobalto sustituyen al calcio; el cromo sustituye al silicio; el cadmio, plomo y cinc precipitan como hidróxidos y carbonatos; el mercurio es encapsulado como óxido de mercurio.

- b. **Procesos en base a cal y materiales puzolánicos:** los materiales puzolánicos naturales o sintéticos contienen partículas de aluminio - silicatos que combinadas con cal y en presencia de agua producen una masa similar al cemento.
- c. **Técnicas en base de polímeros termoplásticos:** los termoplásticos habitualmente utilizados para la solidificación de residuos son el bitumen, asfalto o polietileno.
- d. **Técnicas en base a polímeros orgánicos:** los más utilizados son en base a urea - formaldehído, poliéster y butadieno. En todos los casos se utilizan prepolímeros y catalizador.
- e. **Técnicas de transformación en vidrio:** se basa en la fusión del residuo con sílica u otros materiales para formar vidrio o cerámica.

En todos los casos se requiere de la realización de ensayos de evaluación. Los ensayos físicos más importantes son: permeabilidad, dureza, compresión, ciclo frío - calor y ciclo humectado - secado. Adicionalmente se deberán realizar test de lixiviación para verificar la inmovilización de los contaminantes.

### **2.6.3.2 Depósito directo en Relleno de Seguridad.**

Un relleno de seguridad es una obra de ingeniería diseñada, construida y operada para confinar en el terreno residuos peligrosos. Consiste básicamente en una o varias celdas de disposición final y un conjunto de elementos de infraestructura para la recepción y acondicionamiento de

residuos, así como para el control de ingreso y evaluación de su funcionamiento.

Para ser considerado como un relleno de seguridad, el mismo debe contar como mínimo con los siguientes elementos:

- *Sistema de impermeabilización de base y taludes de doble barrera.*
- *Sistema de captación, conducción y tratamiento de lixiviados.*
- *Sistema de detección de pérdidas.*
- *Sistema de captación y conducción de gases.*
- *Elementos de control de ingreso de agua de lluvia por escurrimiento.*
- *Sistemas de impermeabilización para la clausura.*

Cada relleno contará con criterios de aceptación de residuos en base a las características de las celdas y la compatibilidad de los residuos recibidos. Contará además con planes de contingencia y un programa de monitoreo ambiental.

La evaluación de esta opción como sistema de destino final deberá tener en cuenta que el relleno cumpla con las condiciones mínimas de seguridad para manejar residuos peligrosos y que los residuos a disponer cumplan con las condiciones de aceptación. En caso que no se cumplieran las mismas, se deberá evaluar si existe la viabilidad de acondicionar los residuos mediante un pre-tratamiento.

Esta técnica de disposición final en la actualidad se usa exclusivamente en el Perú. El catalizador es depositado directamente en un relleno de seguridad autorizado por la Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA) del Ministerio de Salud para el tratamiento y disposición final de residuos industriales y peligrosos. Es una práctica común mezclar el catalizador con cal para neutralizar la acidez residual.

El Reglamento de la Ley General de Residuos Sólidos es expreso en cuanto a la necesidad de las instalaciones mínimas y complementarias que debe poseer un relleno de seguridad, dentro de las cuales, para la estructura misma de impermeabilización y drenaje destacan:

- Una impermeabilización del fondo y los taludes del depósito para evitar la contaminación ambiental por lixiviados, con una profundidad mínima de 0,50 m y con permeabilidades menores o iguales a  $1 \times 10^{-9}$  m/s para residuos peligrosos.
- Una geomembrana de un espesor no inferior a 2 mm de espesor.
- Un geotextil de protección. Una capa de drenaje de lixiviados.
- Un geotextil de filtración.
- Drenes de lixiviados.

A pesar que la normativa vigente ha considerado todas estas de medidas de control, existen algunos riesgos potenciales de alta criticidad que pueden afectar tanto al medio ambiente como a la salud humana, por lo que debe promoverse la implementación de métodos alternativos a los ya mencionados de disposición de residuos peligrosos que cumplan requerimientos tanto ambientales, sanitarios y económicos.

### **CAPITULO III. MARCO TEORICO DE REFERENCIA**

#### **3.1 ASPECTOS TEORICOS DE FORMACION DE ESCORIAS FAYALITICAS.**

Para entender mejor el marco teórico de formación de escorias en el proceso de fusión de cobre, se describirán primero las operaciones que se dan en la Fundición de Cobre del Complejo Metalúrgico de La Oroya, instalación industrial en la que se desarrolló el presente trabajo.

##### **3.1.1 Descripción del Proceso de Fusión.**

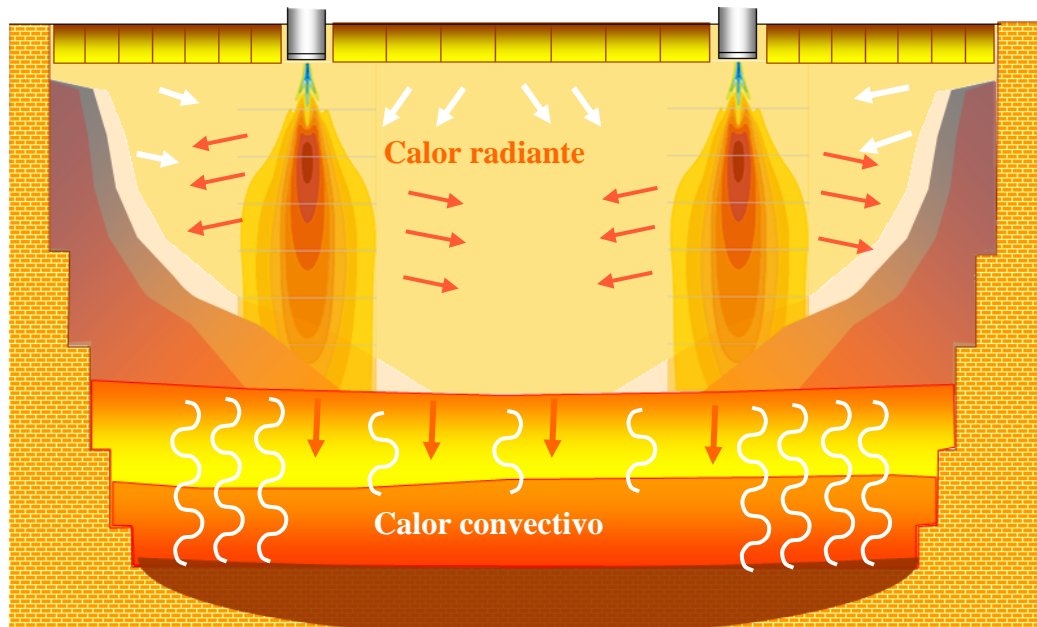
Para la obtención de la mata de cobre, se alimenta calcina al horno Oxy-fuel tomando en cuenta las siguientes condiciones:

- Velocidad de fusión.
- Condiciones ambientales.
- Condiciones de Operación.
- Niveles de escoria y mata.

La fusión en el interior del horno se lleva a cabo a 1 250 °C y es provocada por:

- Calor de radiación procedente de los quemadores oxígeno – petróleo,

- Calor radiante de la estructura refractaria (paredes, techo), y
- Calor convectivo a través del baño del horno.



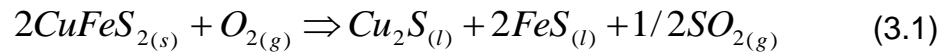
**Figura N° 3.1: Proceso de Fusión de la calcina en un horno oxy-fuel.**

### 3.1.2 Principales reacciones químicas en el proceso de fusión.

Los objetivos de la fusión son formar una fase líquida de sulfuro de cobre y hierro (mata) la cual debe contener todo el cobre de la carga y una fase líquida de escoria sin metales valiosos. La mata posteriormente es procesada en los convertidores Peirce Smith para obtener cobre blister impuro (cobre ampollado) y la escoria fundida se desecha directamente. La escoria es más ligera que la mata, y casi inmisible en ella, pudiendo retirarse con facilidad.

### a) Reacciones de fusión de la Calcina.

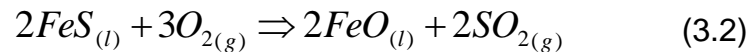
La reacción inicial del proceso de fusión es:



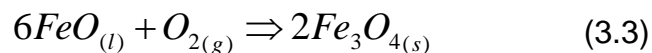
La estequiometría de la mata puede variar, dependiendo de los niveles de calcopirita y de otros sulfuros de Cu-Fe presentes en la calcina, así como del grado de oxidación del Fe.

El exceso de azufre de la calcina, por encima de la mezcla estequiométrica de la mata, reacciona con el oxígeno y forma dióxido de azufre.

Si la atmósfera del horno es oxidante, el FeS de la mata se oxidará de acuerdo a la reacción:



El FeO producido finalmente pasará a formar parte de la escoria en presencia de SiO<sub>2</sub>, ó en su defecto se oxidará para formar magnetita sólida:



### b) Reacciones en Fase Gaseosa.

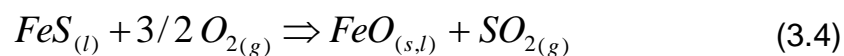
Los gases de salida del horno contienen N<sub>2</sub> del aire usado para la combustión, SO<sub>2</sub> generado por las reacciones de fusión (reacciones 3.1, 3.2) y pequeñas cantidades de CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O y compuestos de las impurezas volatizadas. La concentración de SO<sub>2</sub> en el gas es usualmente mayor al 6% y constituye la materia prima para la generación de ácido sulfúrico.



### c) Reacciones en la escoria.

En el rango de temperaturas de procesamiento de cobre (1 200 – 1 300 °C) y de acuerdo al sistema ternario Fe-O-S, el FeS es miscible con el FeO y Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. Con la finalidad de eliminar esta miscibilidad así como alcanzar la máxima separación entre la mata y la escoria durante la fusión, se adiciona sílice (SiO<sub>2</sub>) al baño fundido en una proporción aproximada al 30% del peso de carga para formar una escoria del tipo fayalita y liberar el FeS del sulfuro de cobre. Normalmente, la sílice torna más iónica a la escoria en comparación con la fase mata, la que es más covalente. Eso les confiere propiedades diferentes a la mata y a la escoria.

Las reacciones son:



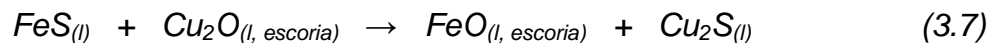
Por esta razón, la fayalita es el principal constituyente de la escoria en el proceso de fusión de cobre. Se encuentran presentes también otros óxidos tales como CaO, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, los que provienen de los concentrados o fundentes, pudiendo provenir también de la disolución de los refractarios del horno.

### 3.2 Formación de la Mata.

La mata es una solución de sulfuros de cobre y hierro presentes en proporciones muy variables, encontrándose en la misma forma otros metales originalmente presentes en el concentrado como sulfuros de bismuto,

sulfuros de plomo y sulfuros de zinc. La mata se encuentra en contacto con la escoria, la cual es una mezcla de óxidos (principalmente  $\text{SiO}_2$  y  $\text{FeO}$ ), así como  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  y  $\text{MgO}$  en menores proporciones. El hierro, cobre, azufre, oxígeno y los óxidos determinan en gran medida la constitución química y física del sistema mata-escoria. Otro factor importante es el potencial de oxidación/reducción de los gases que se usan para calentar y fundir la carga.

La fusión de la calcina tiene como propósito principal que todo el cobre presente en la carga se convierta en sulfuro y pueda direccionarse a la mata. Esto se logra por la acción del  $\text{FeS}$  en la mata, el cual tiende a convertir en sulfuro virtualmente todo el cobre de acuerdo a la siguiente reacción:



$$\Delta G^\circ = -35\,000 + 4,6 T \text{ }^\circ\text{K/kg-mol.}$$

La constante de equilibrio de la ecuación (3.7) es:

$$K_e = \frac{a_{\text{Cu}_2\text{S}} \cdot a_{\text{FeO}}}{a_{\text{Cu}_2\text{O}} \cdot a_{\text{FeS}}} \quad (3.8)$$

Y está dada por:

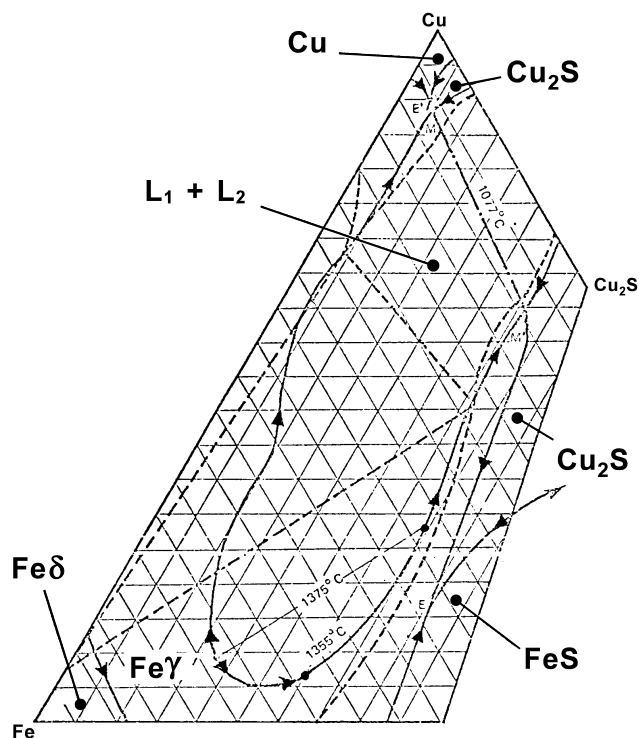
$$\log K_e = \frac{\Delta G^\circ}{4,576 T \text{ }^\circ\text{K}} \quad (3.9)$$

A una temperatura de fusión de  $1\,200^\circ\text{C}$ , la  $K_e$  que se obtiene es de  $10^{+4}$ . Este valor alto indica que la reacción es posible y que el  $\text{Cu}_2\text{O}$  ha sido transformado casi completamente en sulfuro mediante el  $\text{FeS}$ .

Para propósitos de análisis termodinámico de las matas, el ternario Cu-Fe-S puede considerarse en la forma más simple. Fue propuesto originalmente

por Reuleaux en 1927, revisado experimentalmente por Krivsky y Schuhmann en 1957 y actualizado muy recientemente por Chang y otros.

La figura 3.2 muestra la porción cuasitrapezoidal Cu-Cu<sub>2</sub>S-FeS-Fe del diagrama actualizado, que corresponde a la región de interés en la fusión de concentrados. Se distinguen puntos invariantes, el punto E (a la izquierda de la línea de Alkemade) corresponde al eutéctico ternario FeS-Fe<sub>γ</sub>-Cu<sub>2</sub>S. Muestra además la isoterma correspondiente a 1200°C como una línea punteada con el fin de visualizar todos los posibles equilibrios de fases a la temperatura de interés práctico.



**Figura N° 3.2: Porción del ternario Cu-Fe-S semicuantitativo mostrando el equilibrio de fases y la isoterma de 1200°C.**

El sistema (Cu-Fe-S) indica que la mata líquida (Cu<sub>2</sub>S-FeS) es una solución homogénea como se muestra en el diagrama de fases de la figura N° 3.3.

La característica más notable de este sistema es que a medida que la mata líquida pierde azufre, se separa una segunda fase rica en metal. Esto es válido en todo el intervalo de las relaciones Cu/Fe que incluye los extremos  $\text{Cu}_2\text{S}$ -FeS.

De acuerdo al diagrama, las matas pueden existir dentro del intervalo estrecho de composiciones entre la región de inmiscibilidad y el sistema cuasibinario  $\text{Cu}_2\text{S}$ -FeS a 1 250 °C.

Los puntos graficados en el diagrama muestran varias composiciones de matas industriales, las cuales contienen menor azufre del necesario para formar el par estequiométrico  $\text{Cu}_2\text{S}$  y FeS, es decir, las composiciones están hacia la izquierda de la línea  $\text{Cu}_2\text{S}$ -FeS. Esto se debe a las condiciones ligeramente oxidantes dentro de los hornos de fusión de matas.

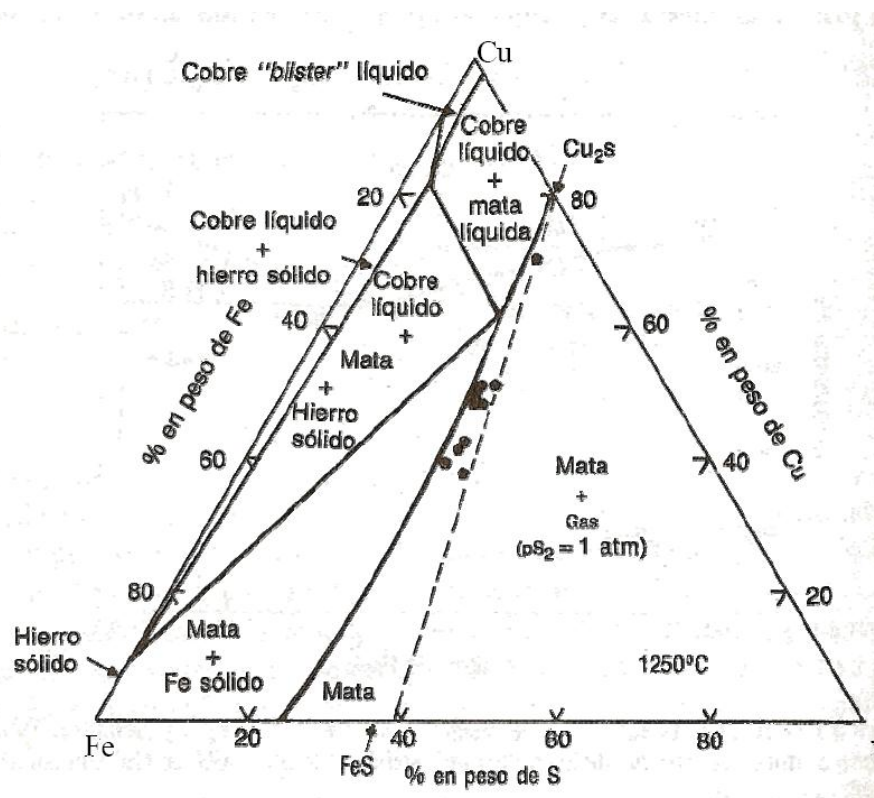


Figura N° 3.3: Diagrama cuasibinario  $\text{Cu}_2\text{S}$  – FeS a 1 250 °C.

### 3.3 Equilibrio Mata-Escoria.

Los objetivos principales del proceso de fusión son:

- Desplazar todo el cobre del concentrado a la fase mata.
- Separar la mata rica en cobre de la fase escoria.

Por lo expresado, se trata de un proceso de concentración vía pirometalúrgica. Esto se facilita si la fase escoria se encuentra saturada con  $\text{SiO}_2$ .

Efectivamente, los óxidos y sulfuros líquidos son altamente miscibles en ausencia de sílice, por lo que el sistema  $\text{FeS} - \text{FeO}$  tendría en gran parte una sola fase y no sería posible ninguna separación mata-escoria.

En la figura 3.4 (diagrama de fases simplificado para el sistema  $\text{Fe-O-S-SiO}_2$  a  $1200^\circ\text{C}$ ) se muestra la inmiscibilidad entre las fases líquidas escoria – mata causada por la  $\text{SiO}_2$ . El borde izquierdo del diagrama representa una solución líquida que consiste solamente de  $\text{FeS}$  y  $\text{FeO}$ . En ausencia de sílice y con concentraciones de  $\text{FeS}$  por encima de 31% masa, se forma una sola fase líquida de oxisulfuro. No obstante, cuando se añade sílice, aparece una brecha de miscibilidad en el estado líquido. Esta brecha se torna más grande cuando más sílice se añade. La flecha gruesa del diagrama muestra que adicionando  $\text{SiO}_2$  al oxisulfuro líquido, éste se divide en una mata rica en  $\text{FeS}$  y en escoria carente de  $\text{FeS}$ .

Las líneas *a*, *b*, *c* y *d* representan las composiciones de equilibrio de los dos líquidos. La fase líquida rica en sulfuros es conocida como mata. La fase líquida rica en óxidos es conocida como escoria. Los puntos A y B dan la línea de saturación de  $\text{SiO}_2$ .



Las escorias producidas en la industria consisten principalmente de FeO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y SiO<sub>2</sub>, con pequeñas cantidades de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO y MgO. La figura 3.5 muestra los límites de composición para la región *liquidus* en el sistema FeO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> a 1 200°C y 1 250 °C. A lo largo de la línea superior (AD), la escoria está saturada con sílice sólida. A lo largo de la línea límite inferior (BC), la escoria está saturada con FeO sólido. El límite en la derecha (CD) marca las composiciones en las que el FeO disuelto y el Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> reaccionan para formar magnetita sólida:

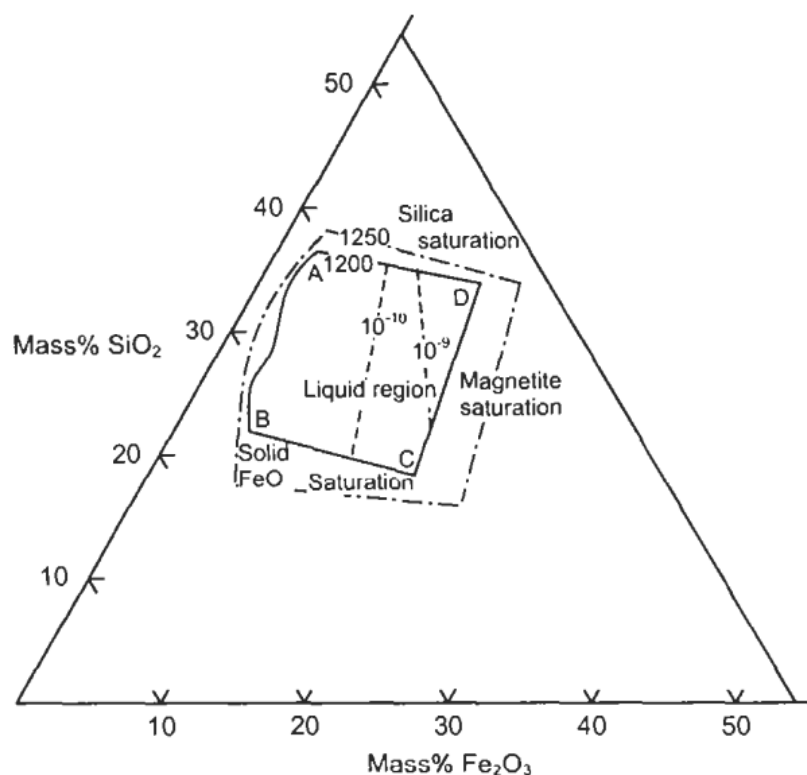
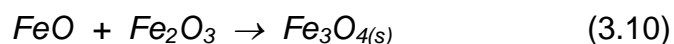


Figura N° 3.5: Superficie de la fase *liquidus* en el sistema FeO – Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub> a 1200 °C y 1250 °C.

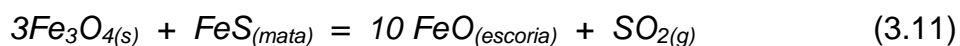
La oxidación intensa y bajas temperaturas de fusión fomentan la formación de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  en la escoria. Evitando estas condiciones se minimizará la precipitación de magnetita.

A lo largo del límite izquierdo (AB), la escoria está saturada con hierro metálico o fayalita sólida ( $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ). Este escenario nunca se presenta bajo las condiciones oxidantes de un proceso industrial de cobre.

Otra característica importante es la línea de saturación de la magnetita sólida CD. La posición de este límite indica que la magnetita sólida será una fase en equilibrio cuando la presión de oxígeno de los gases del horno exceda  $10^{-9}$  atm (punto C) ó  $10^{-8}$  atm (en la saturación con sílice punto D).

Los gases de combustión en la mayor parte de los hornos de fusión contienen alrededor de 1% de oxígeno ( $p\text{O}_2 \approx 10^{-2}$  atm), lo cual indica que la magnetita sólida se debe producir en la interfase gas/escoria durante la fusión.

En realidad, el FeS en la mata ejerce un potencial reductor fuerte sobre el sistema y la magnetita tiende a ser reducida por la siguiente reacción:

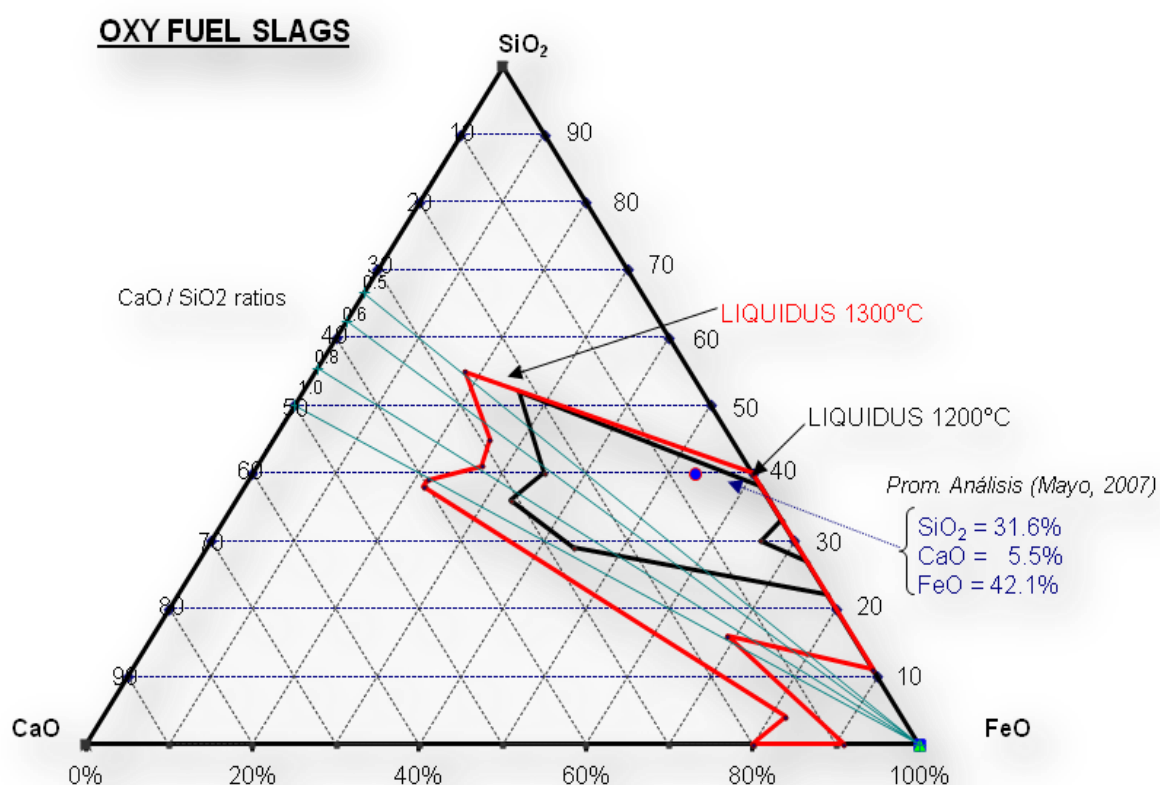


### 3.4.1 Importancia de la calidad de las escorias.

De acuerdo a la experiencia, seis son las características más importantes que deben poseer las escorias de extracción de cobre para asegurar la máxima eficiencia durante la operación:



- La escoria debe encontrarse completamente líquida a la temperatura de fusión del metal o de la mata.
- La escoria debe ser fácilmente manejable durante el proceso, esto es, debe tener baja viscosidad.
- Las escorias que van a descarte deben contener mínimas cantidades de metal, ya sea disuelto o en suspensión.
- El rango de operación de la escoria debe ser tal, que admita variaciones tanto en la composición de la escoria misma como la alimentación al horno sin producir trastornos de funcionamiento.
- La escoria debe asegurar un buen drenaje de los elementos menores no deseados.



**Figura N° 3.6: Diagrama Ternario SiO<sub>2</sub> – CaO – FeO**

### 3.5 Caracterización de las Escorias Industriales de Cobre.

Las escorias del horno oxy-fuel de cobre están formadas principalmente por los óxidos provenientes de la calcina y los óxidos de las escorias de los convertidores Peirce Smith. La Tabla 3.1 muestra un análisis característico de las escorias de fusión de la Fundición de La Oroya.

**Tabla N° 3.1. Análisis químico característico de las escorias de fusión de Cobre de La Oroya (%)**

Análisis Químico (%)											
SiO <sub>2</sub>	Fe	FeO	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	CaO	S	Pb	Cu	As	Sb	Bi	Ag (g/t)
31,6	32,9	42,1	3,1	5,5	1,2	0,7	0,6	0,6	0,7	0,03	30,6

Fuente: Reporte Laboratorio (Promedios de compósitos diarios) Mayo -2007

#### 3.5.1 Sistemas Ternarios.

Un sistema que puede representar claramente a las escorias de fusión es el sistema ternario CaO-FeO-SiO<sub>2</sub>. Como se puede apreciar en la Figura 3.6, las escorias de los hornos de la Fundición de La Oroya se encuentran muy cerca de la curva de saturación con sílice. Así, podemos concluir que las escorias se encuentran básicamente por encima de la curva de saturación con sílice, aproximadamente a 1200 °C, lo cual se demuestra un predominio de la fayalita. Estas condiciones viabilizan el empleo de estas escorias para el tratamiento del *pentóxido de vanadio agotado* aquí propuesto.

#### 3.5.2 Propiedades Físicas.

Las principales propiedades físicas de las escorias son dadas a continuación:

- **Viscosidad de las Escorias.** La característica sobresaliente de las escorias es su alta viscosidad (5 a 20 P) comparadas a la de la mata (0,1 P) y del cobre líquido (0,03 P). La presencia de magnetita sólida y/o sílice sólida en exceso incrementan la viscosidad de la escoria dificultando la separación de partículas de mata atrapadas en estas, incrementando las pérdidas de cobre por atrapamiento físico.

La viscosidad de las escorias puede ser calculada a partir de su módulo de viscosidad, el cual está dado por la siguiente expresión:

$$K_V = \frac{wt\%FeO + wt\%Fe_3O_4 + wt\%CaO + wt\%MgO}{wt\%SiO_2 + wt\%Al_2O_3}$$

Siendo wt%  $M_xO_y$  el porcentaje en peso del óxido en mención.

Las escorias de fusión deben ser lo suficientemente fluidas para poder permitir un asentamiento de las partículas de mata atrapadas en estas. Por esta razón, las escorias de fusión deben tener la menor viscosidad posible.

Teniendo en cuenta los análisis químicos de la Tabla N° 3.1, el módulo de viscosidad de las escorias de la fundición de La Oroya sería el siguiente:

$$K_V = \frac{42,1 + 3,1 + 5,5 + 0}{31,6 + 2,9}$$

$$K_V = 1,47$$

De acuerdo a tablas, la viscosidad de las escorias de la fundición de La Oroya es de 11,3 P, valor adecuado que se manifiesta en contenidos de cobre relativamente bajos (0,6%).

- **Grado de Silicatación.** Las escorias de fusión son compuestos iónicos, están formadas por cationes tales como  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Fe}^{+2}$ ,  $\text{Fe}^{+3}$ , aniones tales como  $\text{O}^{-2}$ ,  $\text{SiO}^{-4}$ , cadenas y anillos silicatados. Las escorias están clasificadas en básicas, neutras y ácidas, de acuerdo a su grado de silicatación, el cual está definido como:

$$GS = \frac{\eta(\text{Moles de Oxígeno Acido a partir de SiO}_2)}{\eta(\text{Moles de Oxígeno Básico a partir de CaO, FeO, MgO, etc.})}$$

Las escorias básicas tienen una estructura muy simple, lo cual redonda en una gran fluidez; mientras que escorias ácidas están formadas por largas cadenas y complejos anillos silicatados, lo cual origina escorias muy viscosas.

Teniendo en cuenta los análisis de las escorias de fusión de la Fundición de La Oroya, podemos observar un grado de silicatación igual a 0,9, lo cual las coloca en la zona de escorias básicas con relativa baja viscosidad.

### 3.5.3 Comportamiento del Pentóxido de Vanadio en las escorias.

Un aspecto muy importante a tomar en cuenta es que la carga de pentóxido de vanadio agotado al horno oxy-fuel de cobre, tal como se propone, sería aproximadamente el 0,3% del peso de calcina, lo que no afectaría en absoluto el proceso metalúrgico ya establecido, por lo que el marco teórico de formación de mata y escoria permanecería inalterable.

Debe adicionalmente tenerse presente que el vanadio en el catalizador se encuentra en forma de óxido ( $\text{V}_2\text{O}_5$ ), por lo que se estima que al fundirse en una atmósfera neutra – oxidante preferentemente se desplazará a la fase escoria, la cual por ser del tipo fayalita saturada en

sílice tiene una gran capacidad de disolver óxidos y una alta capacidad de remover impurezas.

#### **3.5.4 Consideraciones Cinéticas.**

Debido a las altas temperaturas (1 200 – 1 300 °C) empleadas en el proceso de fundición, los ratios de reacción son muy rápidos y el equilibrio químico es alcanzado casi instantáneamente.

En los nuevos procesos donde las reacciones entre los sulfuros y a atmósferas con altos potenciales de oxígeno, la cinética de las reacciones no son un factor de control del proceso.

#### **3.5.4 Balances de Materiales en el Horno Oxy-fuel.**

En el horno Oxy-Fuel existen cuatro tipos de materiales alimentados:

- Calcina de cobre
- Calcina de arsénico
- Speiss
- Escoria de convertidores

Por otro lado, los productos son:

- Mata
- Escoria
- Gases y polvos

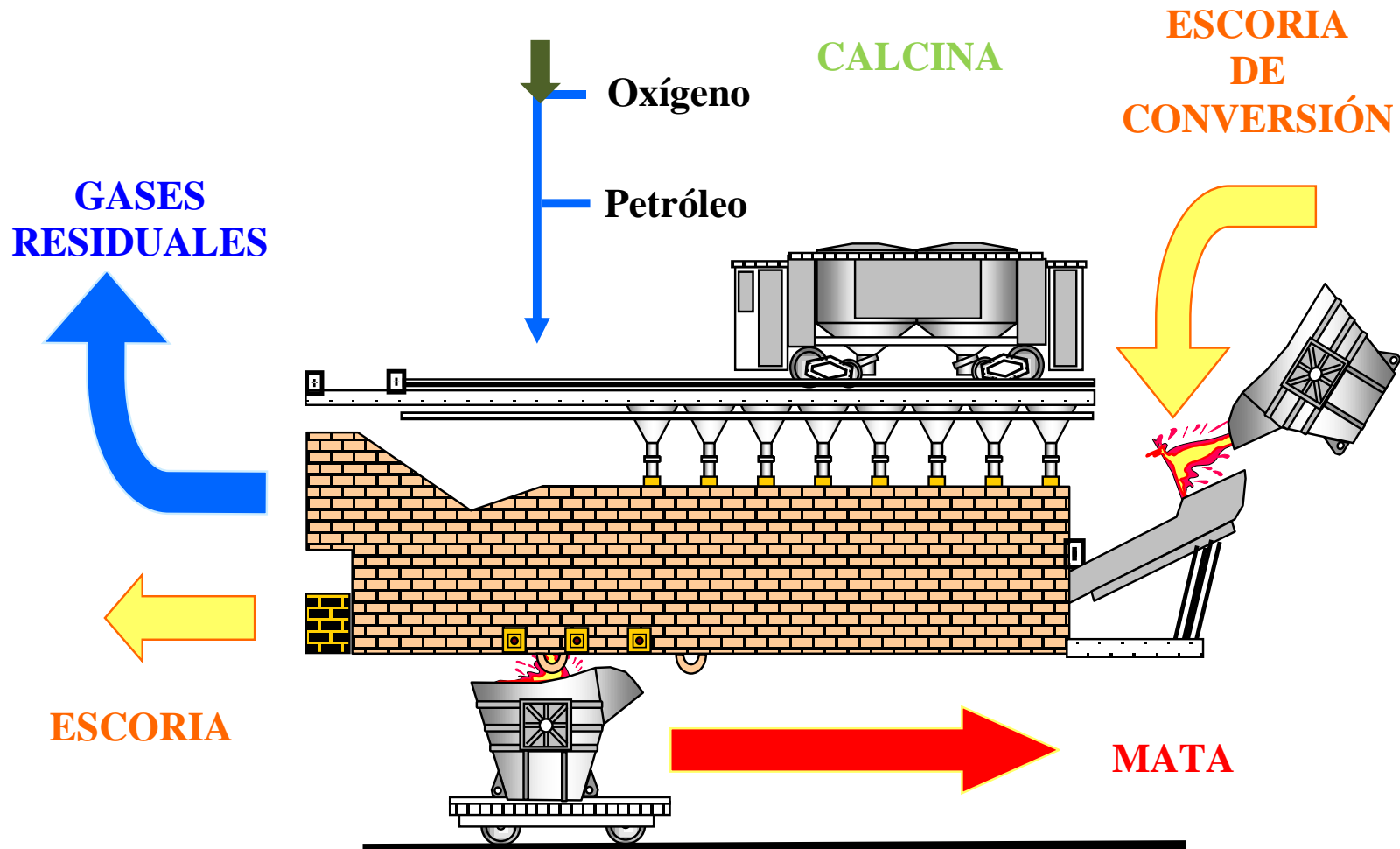


Figura N° 3.7: Diagrama de entradas y salidas en el horno

Tabla N° 3.2 Resumen de los análisis de las entradas y salidas del Horno Oxy-Fuel

	DMT	ASSAY														
		Cu	Pb	Fe	S	As	Sb	Bi	Zn	Ag*	Au*	Se	Te	CaO	SiO2	Al2O3
		%	%	%	%	%	%	%	%	g/t	g/t	%	%	%	%	%
<b>INPUT</b>																
Cu CALCINE	27521.67	21.70	2.20	24.30	21.60	1.70	0.10	0.03	2.90	1278.00	8.10	0.07	0.03	4.10	6.40	1.20
As CALCINE	2242.89	13.30	8.40	32.80	21.00	1.20	1.60	0.35	2.80	964.00	3.00	0.07	0.05	1.22	11.40	0.40
SPEISS	0.00	45.10	25.90	0.33	1.40	13.80	9.60	0.30	0.10	6858.00	1.40	0.08	0.07	0.30	1.40	0.10
CONVERTER SLAG	14514.00	2.70	2.10	42.90	1.40	0.10	0.80	0.03	3.61	112.60	0.87	0.05	0.02	0.50	23.90	1.06
<b>TOTAL</b>	<b>44278.56</b>	<b>15.05</b>	<b>2.48</b>	<b>30.83</b>	<b>14.95</b>	<b>1.15</b>	<b>0.41</b>	<b>0.05</b>	<b>3.13</b>	<b>880.09</b>	<b>5.47</b>	<b>0.06</b>	<b>0.03</b>	<b>2.77</b>	<b>12.39</b>	<b>1.11</b>
<b>OUTPUT</b>																
Cu MATTE	20720.00	28.80	4.10	27.40	26.00	0.40	0.80	0.19	2.60	1748.80	10.80	0.05	0.03	0.32	0.06	0.10
Cu SLAG	19370.00	0.60	0.70	32.90	1.20	0.60	0.70	0.03	3.09	30.60	0.04	0.06	0.02	5.50	31.60	2.90
DUST (Total)	1223.73	4.73	14.48	4.94	6.96	18.79	1.52	1.30	7.09	860.09	2.02	0.15	0.12	0.30	1.95	0.00
<b>TOTAL</b>	<b>41313.73</b>	<b>14.87</b>	<b>2.81</b>	<b>29.31</b>	<b>13.81</b>	<b>1.04</b>	<b>0.77</b>	<b>0.15</b>	<b>2.96</b>	<b>916.90</b>	<b>5.50</b>	<b>0.06</b>	<b>0.03</b>	<b>2.75</b>	<b>14.90</b>	<b>1.41</b>
<b>DUST</b>																
Boiler cleaning	174.12	6.80	16.36	16.90	8.90	11.20	0.88	1.27	4.58	964.00	2.20	0.05	0.03	1.20	10.00	
Pipe dust	229.61	7.80	10.91	8.20	4.00	24.50	1.80	1.60	5.59	768.00	3.90	0.10	0.14	0.69	2.80	
Cottrell dust	820.00	3.44	15.08	1.48	7.38	18.81	1.58	1.23	8.04	863.81	1.46	0.18	0.13			
Total dust	1223.73	4.7	14.5	4.9	7.0	18.8	1.5	1.3	7.1	860.1	2.0	0.1	0.1	0.3	1.9	0.0

Fuente: Reportes mensuales de producción y laboratorio (mes de mayo 2007)

Tabla Nº 3.3 Balance de Materiales del Horno Oxy-Fuel Mes de mayo 2007.

	DMT	WEIGHT														
		Cu	Pb	Fe	S	As	Sb	Bi	Zn	Ag*	Au*	Se	Te	CaO	SiO2	Al2O3
		t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	t	Te	t	t	t
<b>INPUT</b>																
Cu CALCINE	27521,67	5972,2	605,5	6687,8	5944,7	467,9	27,5	8,3	798,1	35172,7	222,9	19,3	8,3	1128,4	1761,4	330,3
As CALCINE	2242,89	298,3	188,4	735,7	471,0	26,9	35,9	7,9	62,8	2162,1	6,7	1,6	1,1	27,4	255,7	9,0
SPEISS	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
CONVERTER SLAG	14514,00	391,9	304,8	6226,5	203,2	14,5	116,1	4,4	524,0	1634,3	12,6	7,3	2,9	72,6	3468,8	153,8
<b>Total</b>	<b>44278,56</b>	<b>6662,38</b>	<b>1098,67</b>	<b>13649,94</b>	<b>6618,88</b>	<b>509,30</b>	<b>179,52</b>	<b>20,46</b>	<b>1384,88</b>	<b>38969,12</b>	<b>242,28</b>	<b>28,09</b>	<b>12,28</b>	<b>1228,32</b>	<b>5485,92</b>	<b>493,08</b>
<b>OUTPUT</b>																
Cu MATTE	20720,00	5967,4	849,5	5677,3	5387,2	82,9	165,8	39,4	538,7	36235,1	223,8	10,4	6,2	66,3	12,4	20,7
Cu SLAG	19370,00	116,2	135,6	6372,7	232,4	116,2	135,6	5,8	598,9	592,7	0,8	11,6	3,9	1065,4	6120,9	561,7
DUST (Total)	1223,73	57,9	177,2	60,4	85,2	230,0	18,6	16,0	86,8	1052,5	2,5	1,8	1,4	3,7	23,8	0,0
<b>Total</b>	<b>41313,73</b>	<b>6141,5</b>	<b>1162,3</b>	<b>12110,4</b>	<b>5704,8</b>	<b>429,1</b>	<b>319,9</b>	<b>61,1</b>	<b>1224,4</b>	<b>37880,4</b>	<b>227,0</b>	<b>23,8</b>	<b>11,5</b>	<b>1135,3</b>	<b>6157,2</b>	<b>582,5</b>
<b>DUST</b>																
Boiler cleaning	174,12	11,8	28,5	29,4	15,5	19,5	1,5	2,2	8,0	167,9	0,4	0,1	0,1	2,1	17,4	0,0
Pipe dust	229,61	17,9	25,1	18,8	9,2	56,3	4,1	3,7	12,8	176,3	0,9	0,2	0,3	1,6	6,4	0,0
Cottrell dust	820,00	28,2	123,7	12,1	60,5	154,2	12,9	10,1	66,0	708,3	1,2	1,5	1,1	0,0	0,0	0,0
<b>Total dust</b>	<b>1223,73</b>	<b>57,9</b>	<b>177,2</b>	<b>60,4</b>	<b>85,2</b>	<b>230,0</b>	<b>18,6</b>	<b>16,0</b>	<b>86,8</b>	<b>1052,5</b>	<b>2,5</b>	<b>1,8</b>	<b>1,4</b>	<b>3,7</b>	<b>23,8</b>	<b>0,0</b>

Fuente: Elaboración Prop



## CAPITULO IV. INVESTIGACION EXPERIMENTAL Y EVALUACION DE RESULTADOS

### 4.1 OBJETIVOS DEL DESARROLLO EXPERIMENTAL.

#### 4.1.1 Objetivo General.

Comprobar la viabilidad técnica – ambiental del proceso propuesto en el presente trabajo.

#### 4.1.2 Objetivos Específicos.

- Determinar la relación adecuada *kg catalizador agotado / TM de calcina* durante la carga al horno de fundición de cobre para obtener una fijación del orden de 98% de vanadio en la fase escoria.
- Confirmar que el cobre blíster obtenido en la fundición de cobre durante el tratamiento del *pentóxido de vanadio agotado* se mantenga dentro de los rangos de calidad química requeridos para su procesamiento posterior.
- Comprobar que la implementación del tratamiento industrial del catalizador agotado se efectúe sin variar los parámetros operativos del horno Oxy-Fuel de la Fundición de Cobre.

- Identificar potenciales problemas operativos para la dosificación del catalizador agotado a los carros de calcina durante el tratamiento industrial de catalizador agotado en la Fundición de Cobre.
- Confirmar que la escoria obtenida en el tratamiento industrial sea químicamente estable a la acción del intemperismo para que pueda ser dispuesta de manera segura en los depósitos de escoria existentes.
- Verificar que los niveles de vanadio en el material particulado no excedan los límites máximos permisibles (LMP) tanto de emisiones por chimeneas como en ambientes de trabajo para proteger el medio ambiente y la salud de los trabajadores.

#### 4.2 DESARROLLO DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES.

En coordinación con las áreas involucradas, se efectuaron las pruebas experimentales bajo los siguientes considerandos:

- **Materia prima:**
  - Calcina de los Tostadores de Cobre.
  - Catalizador agotado de pentóxido de vanadio proveniente de la planta de ácido sulfúrico del circuito de zinc.
- **Alcance:** Pruebas experimentales en dos niveles: laboratorio e industrial.
- **Reactor:** Por las características de las escorias producidas y por las facilidades operativas existentes, se eligió al Horno Oxy-fuel de la Fundición de Cobre para el desarrollo de las pruebas industriales, debiendo simularse en las pruebas a nivel laboratorio las condiciones de operación de dicho reactor.

Por ser un proyecto complementario, el proceso propuesto debía adecuarse a las condiciones operativas ya establecidas para no alterar el

flujo normal de producción de la Fundición de Cobre. Dicho en otras palabras, para **la implementación del tratamiento del catalizador agotado no debían variarse los parámetros operativos del horno Oxy-Fuel de la Fundición de Cobre.**

#### **4.2.1 Variables del Proceso.**

En general, en un sistema multivariable se dispone de dos tipos de variables, de cuyo conocimiento depende el control que sobre el proceso se pretende ejercer:

**Variables Independientes.** Son aquellas sobre las que se tiene control.

Bajo el criterio expresado en el numeral 4.2, la única variable independiente debía ser la dosificación del pentóxido de vanadio agotado a la carga del horno oxy-fuel.

**Variables Dependientes.** Son aquellas sobre las cuales no se tiene control, siendo inherentes a los materiales o al proceso.

Para el presente caso, se podría considerar como variables dependientes a la temperatura, tonelaje de alimentación de calcina, composición de la carga, etc.

#### **4.2.2 Características de la Materia Prima.**

- **Residuo:** Catalizador agotado de Pentóxido de Vanadio.
- **Apariencia y color:** Amarillo claro – verdoso en forma de anillos o pellets de 7/32" x 3/8" largo.
- **Solubilidad:** 65% a 75% SiO<sub>2</sub> insoluble.

25% a 35% sales orgánicas parcialmente solubles.

- **Densidad aparente:** 0,523 kg/litro.
- **Composición típica (\*):**

Pentóxido de Vanadio	6,5 a 7,5 %
Sulfato de potasio	17,5 a 22,5 %
Sulfato de sodio	3,0 a 3,5 %
Trióxido de Aluminio	1,0 a 1,5 %
Sílice (SiO <sub>2</sub> )	55,0 a 60,0 %
Trióxido de azufre	7,5 a 9,5 %

(\*) Los datos anteriores pueden variar dependiendo del proveedor o tipos de catalizador.

- **Vanadio:**

Masa atómica	50,9
Nº atómico	23
Punto de fusión	1 700 °C
Punto de ebullición	3 000 °C
  
- **Pentóxido de Vanadio:**

Masa atómica	181,9
Punto de fusión	800 °C
Punto de ebullición	1 750 °C

### 4.2.3 Desarrollo Experimental.

**4.2.3.1 Nivel Laboratorio – 1er. Set de pruebas.** En esta primera etapa del proyecto se efectuaron pruebas tipo batch en pequeña escala y a bajo costo. Los resultados obtenidos fueron limitados pero otorgaron suficiente información para avanzar al siguiente set de pruebas de laboratorio.

#### Equipos y materiales.

- Horno Eléctrico Tubular GHC Carbolite.
- Tubos de alúmina de 1,2 m de largo y 5,5 cm de diámetro.



**Figura N° 4.1 Horno Tubular de Laboratorio Carbolite.**

Este horno puede alcanzar temperaturas hasta 1 250 °C, teniendo 3 zonas de calentamiento con controles independientes.

#### **Descripción de las pruebas.**

Se trabajó con atmósfera controlada simulando condiciones reductoras del horno oxy-fuel de cobre, ejecutándose tres pruebas en las que el catalizador agotado se mezcló con la calcina de cobre, proyectándose obtener mata de cobre como producto principal y una escoria descartable.

**Tabla N° 4.1 Condiciones de Trabajo a Nivel Laboratorio - 1er. Set de pruebas.**

Condición de Trabajo	Experiencias		
	1	2	3
Temperatura en fase gas (°C)	1 250 - 1 260	1 250 - 1 260	1 250 - 1 260
Carga de Calcina (g)	180,0	180,0	180,0
Carga de Catalizador agotado (g)	2,8	5,6	8,5
% de catalizador en la carga	1,5	3,0	4,5
Tiempo de fusión (min)	30	30	30

### **Discusión de Resultados.**

- No se produjo separación de fases mata - escoria, parte del producto reaccionó con el tubo de alúmina contaminando la prueba.
- Se descartaron los resultados por rotura de los tubos de alúmina.
- Se decidió pasar al siguiente set de pruebas en otro tipo de horno con mayores cantidades de calcina y residuo.

**4.2.3.2 Nivel Laboratorio – 2do. Set de pruebas.** Con la experiencia del set de pruebas anterior y con la intención de generar información para el diseño de las pruebas a nivel industrial, se ejecutó una segunda corrida de pruebas a nivel laboratorio pero empleando otro tipo de horno para evitar los inconvenientes del horno tubular.

### **Equipos y Materiales.**

- Horno Eléctrico de Cámara CWF Carbolite de 23 litros de capacidad.
- Crisoles de Grafito.



**Figura N° 4.2 Horno Eléctrico de Laboratorio Carbolite.**

Este horno tipo cámara puede alcanzar temperaturas de 1 300 °C y trabaja con crisoles de diferentes tamaños y tipos.

**Descripción del 2do. Set de pruebas laboratorio.** Se realizaron tres juegos de pruebas de acuerdo al siguiente detalle:

**Tabla N° 4.2 Condiciones de Trabajo 2do. Set de pruebas laboratorio.**

Condiciones experimentales	Experiencias		
	4	5	6
Temperatura en fase gas (°C)	1 250	1 250	1 250
Carga de Calcina (g)	1 200	1 200	1 200
Carga de Catalizador agotado (g)	3,6	7,2	10,8
Carga Total (g)	1 203,6	1 207,2	1 210,8
Vanadio en la carga (g)	0,04	0,08	0,12
% de catalizador en la carga	0,3	0,6	0,9
Tiempo de reacción en fase líquida (min)	30	30	30

### Discusión de Resultados

- Las pruebas sufrieron espumación en los tres crisoles, estimándose que la espumación estuvo asociada a alta temperatura de operación.
- A mayor cantidad de catalizador, mayor fue la espumación y pérdida de material.
- En las 3 pruebas realizadas, el contenido de Vanadio en la fase mata fue inferior a 1 ppm.
- Se detectó una distribución de más del 98% del vanadio hacia la fase escoria, sin embargo los datos no fueron concluyentes porque existió pérdida de masa.
- Se decidió realizar el siguiente set de pruebas a menor temperatura manteniendo la proporción de catalizador.

**4.2.3.3 Nivel Laboratorio – 3er. Set de pruebas.** Para evitar la pérdida de material incurrida en el 2do set de pruebas atribuida a una alta temperatura (1 250 °C), se corrió el 3er set de pruebas a 1 230 °C.



**Tabla N° 4.3 Balance Metalúrgico 3er. Set de pruebas laboratorio.**

Temperatura en fase gas: 1 230 °C.

Tiempo de reacción en fase líquida: 20 min.

BALANCE	PRUEBA N° 7			PRUEBA N° 8			PRUEBA N° 9		
	PESO (g)	Vanadio		PESO (g)	Vanadio		PESO (g)	Vanadio	
		%	g		%	g		%	g
<b>CARGA</b>									
Calcina	1200			1200			1200		
Catalizador (*)	3.6	1.11	0.040	7.2	1.11	0.080	10.8	1.11	0.120
<b>Total carga</b>	<b>1203.6</b>		<b>0.040</b>	<b>1207.2</b>		<b>0.080</b>	<b>1210.8</b>		<b>0.120</b>
<b>PRODUCTOS</b>									
Mata	520	0.0001	0.001	521	0.0001	0.001	526	0.0001	0.001
Escoria	675	0.0058	0.039	676	0.0116	0.079	677	0.0175	0.118
Indeterminados	8.6		0.000	10.2		0.001	7.8		0.001
<b>Total productos</b>	<b>1203.6</b>		<b>0.040</b>	<b>1207.2</b>		<b>0.080</b>	<b>1210.8</b>		<b>0.120</b>
<b>DISTRIBUCION (%)</b>									
Mata	43.2%		1.3%	43.2%		0.7%	43.4%		0.4%
Escoria	56.1%		98.6%	56.0%		98.5%	55.9%		98.8%
Indeterminados	0.7%		0.1%	0.8%		0.9%	0.6%		0.7%

(\*) % de V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> en el catalizador agotado = 3.98%

## Discusión de Resultados

- A 1 230 °C se comprobó disminución de la espumación.
- La dosificación de catalizador agotado se mantuvo en el mismo orden del 2do set de pruebas, variando de 0,3% (prueba N° 7) a 0,9% (prueba N° 9).
- Independiente de la dosificación de catalizador utilizada, el contenido de vanadio en la fase mata NO varió y se mantuvo inferior a 0,0001 % (1 ppm).
- Como consecuencia del punto anterior, el contenido de vanadio en la escoria de descarte aumenta a medida que la dosificación del catalizador es mayor.
- En todos los casos, se confirmó una distribución de más del 98% del vanadio hacia la fase escoria.

**4.2.3.4 Nivel Laboratorio – 4to. Set de pruebas.** Para cuantificar el comportamiento del vanadio con mayores cargas de catalizador agotado, se corrió el 4to. Set de pruebas, en las cuales la dosificación de catalizador agotado varió del 2% (prueba N° 10) al 8% (prueba N° 13)

#### **Discusión de Resultados.**

- En todos los casos, más del 98% del vanadio cargado se desplazó hacia la fase escoria, confirmándose nuevamente su afinidad por la escoria. Es de notar el incremento de vanadio en la escoria a medida que aumenta la dosificación de catalizador agotado en la carga.
- El contenido de vanadio en la fase mata se mantiene en niveles muy bajos y se incrementa conforme aumenta la dosificación del catalizador agotado a la mezcla. Para una dosificación del 2%, el contenido de vanadio en la mata es 1 ppm, mientras que para una dosificación del 8%, el vanadio en la mata es 3 ppm.
- Se estima que el contenido de vanadio en la fase mata (1 – 3 ppm) no alterará la calidad química del cobre blíster para la subsiguiente etapa de refinación electrolítica.

**Tabla N° 4.4 Balance Metalúrgico 4to. Set de pruebas laboratorio.**

Temperatura en fase gas: 1 230 °C.  
Tiempo de reacción en fase líquida: 20 min.

BALANCE	PRUEBA N° 10			PRUEBA N° 11			PRUEBA N° 12			PRUEBA N° 13		
	PESO (g)	Vanadio		PESO (g)	Vanadio		PESO (g)	Vanadio		PESO (g)	Vanadio	
		%	g		%	g		%	g		%	g
<b>CARGA</b>												
Calcina	1200			1200			1200			1200		
Catalizador (*)	24	1.11	0.266	50	1.11	0.555	76	1.11	0.844	105	1.11	1.166
<b>Total carga</b>	<b>1224</b>		<b>0.266</b>	<b>1250</b>		<b>0.555</b>	<b>1276</b>		<b>0.844</b>	<b>1305</b>		<b>1.166</b>
<b>PRODUCTOS</b>												
Mata	535	0.0001	0.001	541	0.0002	0.001	546	0.0002	0.001	550	0.0003	0.002
Escoria	679	0.0386	0.262	696	0.0786	0.547	721.0	0.1150	0.829	750.0	0.1530	1.148
Indeterminados	10.0		0.004	13.0		0.007	9.0		0.013	5.0		0.016
<b>Total productos</b>	<b>1224.0</b>		<b>0.266</b>	<b>1250.0</b>		<b>0.555</b>	<b>1276.0</b>		<b>0.844</b>	<b>1305.0</b>		<b>1.166</b>
<b>DISTRIBUCION (%)</b>												
Mata	43.7%		0.2%	43.3%		0.2%	42.8%		0.1%	42.1%		0.1%
Escoria	55.5%		98.4%	55.7%		98.6%	56.5%		98.3%	57.5%		98.5%
Indeterminados	0.8%		1.4%	1.0%		1.2%	0.7%		1.6%	0.4%		1.4%

(\*) % de V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> en el catalizador agotado = 3.98%

**4.2.3.5 Pruebas a Nivel Industrial.** A raíz de los resultados obtenidos, se proyectaron pruebas a nivel industrial con dosificaciones de catalizador agotado del orden del 0,3% de la carga del horno oxy-fuel.

En esta etapa, se planificó una prueba continua de 24 h de duración dividida en 3 turnos operativos de 8 h cada uno. Para esto, se haría uso de las instalaciones industriales del horno oxy-fuel del Circuito de Cobre, siguiéndose los parámetros operativos normales establecidos.

#### **Equipos.**

- Horno oxy-fuel equipado con quemadores verticales de petróleo-oxígeno.
- Grúa puente para el carguío del catalizador agotado a los carros calcineros

#### **Materiales e insumos.**

- Calcina de cobre.
- Catalizador agotado de pentóxido de vanadio.
- Petróleo Residual 6.
- Oxígeno de 95%.
- Agua de refrigeración.

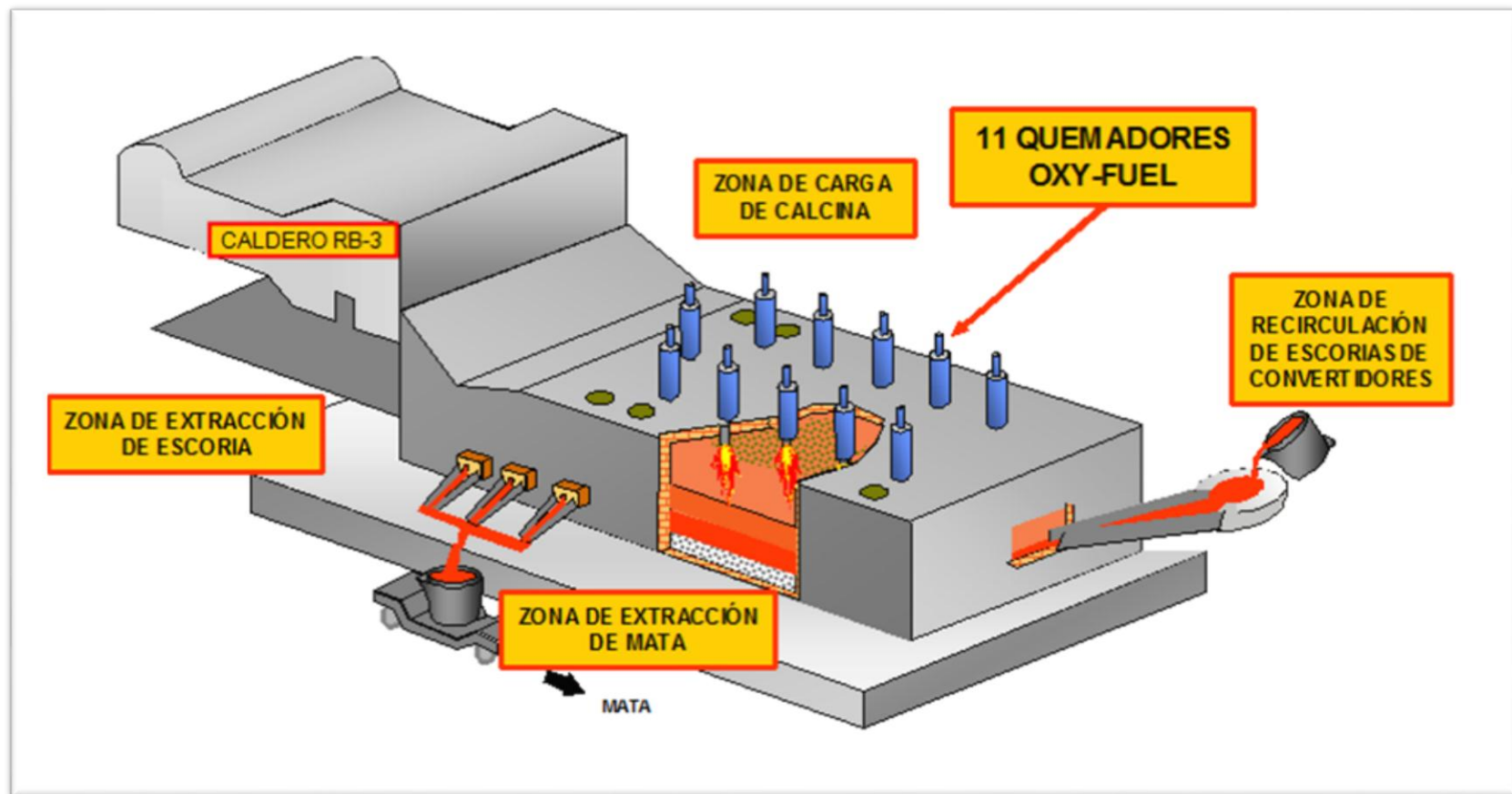


Figura N° 4.3 Vista isométrica del Horno con Quemadores Oxy-Fuel.

### **Descripción del Proceso Industrial.**

El Proceso de fusión de la Calcina procedente de la planta tostadores de cobre, se basa en la exposición de la carga a la llama y gases calientes de los quemadores Oxy-Fuel (Oxígeno - Petróleo). La carga de calcina es distribuida a lo largo de las paredes laterales del horno, formando taludes de carga, que protege las paredes refractarias del horno.

La calcina con una temperatura promedio de 580°C, es conducida al horno de fusión Oxy-Fuel por medio de carros especiales eléctricos sobre la línea férrea y es periódicamente descargada al horno a través de bocinas de carga refrigeradas que atraviesan el techo.

El calor necesario para la fusión es suministrado por 11 quemadores Oxy-Fuel, de los cuales operan alternadamente 7 quemadores, manteniendo una temperatura promedio de 1 250°C. En este proceso se separan por diferencia de densidades los sulfuros metálicos presentes en la calcina, obteniéndose una fase rica en sulfuro de cobre y sulfuro de hierro llamada mata y otra fase compuesta mayormente por óxidos de hierro y sílice, denominada escoria.

La mata es extraída por un costado del horno y es conducida por canales a una taza especial; posteriormente con la ayuda de un carro transportador se traslada hasta la zona donde operan las grúas de convertidores para luego ser cargada a los convertidores para la obtención del cobre metálico.

La escoria producida es granulada con agua a alta presión y enviada al depósito de escorias en Huanchán.

Los gases producidos en el horno por la fusión y la combustión pasan por el caldero de calor residual, en donde una gran parte del calor es recuperado para la producción de vapor. Los gases son llevados al Precipitador Electrostático para recuperar los polvos metálicos antes de ser descargados al ambiente por la chimenea principal.

### Descripción de la Prueba Industrial.

#### Materia Prima.

- **Calcina de Cobre.**

Es el producto del procesamiento de los lechos de fusión de cobre en los tostadores mediante una reacción de oxidación controlada (tostación). Está conformada, principalmente, por una mezcla de óxidos y sulfuros de cobre y hierro.

**Tabla N° 4.5 Análisis Químico de la Calcina de Cobre**

Análisis Químico (%)										
SiO <sub>2</sub>	Fe	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	CaO	S	Pb	Cu	As	Sb	Bi	Ag*
6.4	24.3	2.4	4.1	21.9	2.2	21.7	1.7	0.10	0.03	1278

(\*) g/ton **Fuente:** Comentario Mensual Planta Tostadores de Cobre

- **Catalizador agotado de la planta de ácido sulfúrico de zinc.**

El análisis químico al catalizador agotado con el cual se realizaron las pruebas industriales es como sigue:

**Tabla N° 4.6 Análisis Químico del Catalizador Agotado.**

% SiO <sub>2</sub>	% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	% V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	% Mg	% S	% Ca
68,5	1,32	3,98	0,06	5,81	< 0,01

Fuente: Reporte Laboratorio General

### Productos de la Prueba Industrial.

- **Mata de Cobre.**

La mata es el producto valioso del horno de fusión Oxy-Fuel y está constituida por una solución de Cu-Fe-S (para los cálculos estequiométricos se considera que la mata corresponde a una solución de Cu<sub>2</sub>S.FeS). El oro y la plata se disuelven en las matas y son recuperados posteriormente.

**Tabla N° 4.7 Análisis Químico de la Mata de Cobre.**

Análisis Químico (%)									
Cu	Pb	Fe	Ag (g/t)	S	Bi	FeO	As	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	V (ppm)
28,8	4,1	27,4	1748,8	26,0	0,19	4,3	0,4	4,9	2

Fuente: Reporte Laboratorio General.

- **Escoria**

Producto de desecho conformado por una mezcla de hierro y sílice en forma de silicatos. Tiene un contenido mínimo del metal valioso.



**Tabla N° 4.8 Análisis Químico de la Escoria de Reverbero.**

Análisis Químico (%)											
SiO <sub>2</sub>	Fe	FeO	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	CaO	S	Pb	Cu	As	V	Bi	Ag (g/t)
31,6	32,9	42,1	3,1	5,5	1,2	0,7	0,6	0,6	0,012	0,03	30,6

Fuente: Reporte Laboratorio General.

### Controles Operativos de la Prueba industrial.

- Velocidad de fusión de la calcina.
- Flujo de petróleo de los quemadores Oxy-Fuel.
- Niveles del baño del horno.
- Tiraje del horno.
- Temperatura del caldero RB-3.
- Temperatura de escoria.

Tabla N° 4.9 Balance Metalúrgico - Pruebas Nivel Industrial.

BALANCE	PRUEBA N° 1			PRUEBA N° 2			PRUEBA N° 3		
	PESO (TM)	Vanadio		PESO (TM)	Vanadio		PESO (TM)	Vanadio	
		%	kg		%	kg		%	kg
<b>CARGA</b>									
Calcina	345.0			330.0			335.0		
Escoria Convertidores	172.0			165.0			175.0		
Catalizador (*)	1.1	1.11	12.210	1.1	1.11	12.210	1.1	1.11	12.210
<b>Total carga</b>	<b>518.1</b>		<b>12.210</b>	<b>496.1</b>		<b>12.210</b>	<b>511.1</b>		<b>12.210</b>
<b>PRODUCTOS</b>									
Mata	246.0	0.0001	0.246	239.0	0.0001	0.239	238.0	0.0001	0.238
Escoria	240.0	0.0050	12.048	238.0	0.0050	11.948	239.0	0.0050	11.998
Polvo	14.5	0.0001	0.015	14.0	0.0001	0.014	14.0	0.0001	0.014
Indeterminados	17.6		-0.098	5.1		0.009	20.1		-0.040
<b>Total productos</b>	<b>518.1</b>		<b>12.210</b>	<b>496.1</b>		<b>12.210</b>	<b>511.1</b>		<b>12.210</b>
<b>DISTRIBUCION (%)</b>									
Mata	47.5%		2.0%	48.2%		2.0%	46.6%		1.9%
Escoria	46.3%		98.7%	48.0%		97.9%	46.8%		98.3%
Polvos	2.8%		0.1%	2.8%		0.1%	2.7%		0.1%
Indeterminados	3.4%		-0.8%	1.0%		0.1%	3.9%		-0.3%

(\*) % de V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> en el catalizador agotado = 3.98%

## Discusión de Resultados

- El balance de masa a nivel industrial es aproximado ya que muchos pesos son estimados; sin embargo, confirman lo establecido en las pruebas de laboratorio: el vanadio se desplaza en el orden del 98% a la fase escoria.
- La solubilidad de vanadio en la fase mata es muy baja, alcanzando valores de 1 ppm. Por esta razón, no se comprometería la calidad del cobre blíster obtenido en la Fundición de Cobre.
- No se observan problemas operativos para la dosificación del catalizador agotado a los carros de calcina, por lo que fácilmente se podría integrar el tratamiento de catalizador agotado en las operaciones de la Fundición de Cobre.
- Se recomendaría enviar muestras de escorias para análisis de microscopía óptica y rayos X a fin de determinar la distribución y estructura del vanadio en la matriz de escoria.

## CAPITULO V. ENSAYES AMBIENTALES COMPLEMENTARIOS

### 5.1 CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA DE LAS ESCORIAS.

Se considera generalmente que las escorias de fundición son residuos particularmente estables y que su estructura vidriosa impide una removilización de los metales que forman parte de su composición. Sin embargo, bajo ciertas condiciones, las escorias pueden experimentar transformaciones que afectan su estabilidad química.

Por esta razón, luego de comprobarse experimentalmente la factibilidad técnica del tratamiento del *catalizador agotado pentóxido de vanadio*, se ejecutaron dos tipos de pruebas con las escorias producidas para determinar su capacidad de:

- Generación y neutralización de drenaje ácido de roca,
- Lixiviación natural en contacto con agua meteórica (agua de lluvia).

Los resultados de estas pruebas sirvieron para definir el tipo de disposición final de las escorias, ya que se pretendía evitar la potencial contaminación de los suelos así como de las aguas superficiales y/o subterráneas del entorno del depósito.

### **5.1.1. GENERACIÓN DE DRENAJE ACIDO DE ROCA (DAR).**

La probabilidad de generación del drenaje ácido de roca (DAR) es una preocupación ambiental para los recursos de agua superficial y subterránea del entorno de toda operación minera, por lo que las escorias producidas fueron sometidas a ensayos geoquímicos para evaluar el potencial de generación de aguas ácidas, tomando en consideración que se prevé almacenar estas escorias en los depósitos actuales de Huanchán – La Oroya, los cuales están sometidos a la acción del intemperismo.

#### **5.1.1.1. Objetivo.**

Evaluar el potencial de generar drenaje ácido a partir de las escorias producidas durante las pruebas industriales de tratamiento del *catalizador agotado pentóxido de vanadio* en la Fundición de Cobre.

#### **5.1.1.2. Metodología.**

Para determinar el potencial de generación de acidez de las escorias se llevaron a cabo ensayos tipo ABA (Acid Base Account) en un laboratorio acreditado ante INDECOPI.

#### **5.1.1.3. pH Pasta.**

El pH en pasta indica la presencia de material con capacidad neutralizadora fácilmente disponible (p.ej. carbonatos) o de acidez almacenada. El resultado está gobernado por las propiedades superficiales del sólido y por la cantidad de sales solubles presentes.

#### 5.1.1.4. Test ABA.

El método de conteo Ácido Base (ABA, del inglés Acid Base Account) es un balance teórico entre el potencial de una muestra de generar ácido y el potencial de neutralizarlo. Involucra la determinación del potencial de acidez (PA) y el potencial de neutralización (PN), ambos expresados en kg CaCO<sub>3</sub>/tonelada.

El potencial de acidez (PA) se calcula considerando que todo el contenido de azufre como sulfuro se oxida a sulfato, generando ácido sulfúrico en una proporción de 2 moles de H<sup>+</sup> por cada mol de azufre como sulfuro contenido en la muestra. El PA se obtiene multiplicado el porcentaje de sulfuro presente en las muestras por el factor de conversión 31,25 (Dold, 1999, 2007):

El potencial de neutralización (NP) es una medida del material carbonatado disponible para neutralizar la acidez y se determina tratando una muestra con exceso de ácido clorhídrico estandarizado. La muestra es agitada por 24 h para asegurar la reacción completa. Luego, la muestra se titula con una solución de NaOH llegando a pH 8,3 para determinar la cantidad de ácido neutralizado por el material.

Existen diferentes criterios para la interpretación de pruebas ABA estáticas. Realizando una simple comparación de los potenciales AP y NP se tiene una medida de si la muestra puede ser generadora o consumidora de ácido. El potencial neto de neutralización (PNN), correspondiente a la diferencia NP – AP, se utiliza como un indicador general de la capacidad de consumo o generación de ácido por la muestra. En términos simples, un valor negativo del PNN indica una muestra con tendencia a formar ácido, mientras que un valor positivo indica que prevalecen los factores neutralizantes. Por otra parte, el índice

de NP/AP también se usa como una pauta interpretativa para clasificar los materiales. Su interpretación se resume en la Tabla 5.1.

**Tabla 5.1. Categorización de materiales de acuerdo a la interpretación del test ABA.**

PNN		PN/PA	Interpretación
>20		>3	Bajo o Nulo Potencial de Generación de Ácido
<20		1 a 3	Potencial Marginal de Generación de Ácido
Negativo		<1	Alto Potencial de Generación de Ácido
-20 y 20	Interpretación dificultosa	>3	Bajo Riesgo de Formar Drenaje Ácido.
		entre 1 y 3	Zona de Incertidumbre

#### 5.1.1.5. Caracterización Química de las Muestras.

Los análisis químicos realizados fueron; azufre total (S), azufre como sulfuro ( $S^{-2}$ ), azufre como sulfato ( $S^{+6}$ ) y carbono como carbonato. La cantidad de azufre como sulfuro se utilizó para calcular el PA de la muestra. Los análisis de azufre y de carbono se determinaron por análisis LECO. El contenido de azufre como sulfuro se determinó mediante la diferencia entre el azufre total y el azufre como sulfato de la muestra.

#### 5.1.1.6. Discusión de resultados geoquímicos.

Los resultados de las pruebas ABA de las muestras de escoria se presentan a continuación en la Tabla N° 5.2.

**Tabla N° 5.2. Resumen de los Resultados de Prueba ABA.**

Análisis Químico (%)				pH pasta	Potenciales				
St	S <sup>=</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>=</sup>		PN*	PA*	PNN*	PN/PA	Tipo de material
1,13	0,3	0,005	0,01	7,8	90,4	9,4	81,0	9,6	No productor de ácido

PN = Potencial de Neutralización

*“Disposición final del catalizador pentóxido de vanadio por fijación en una escoria metalúrgica”*

PA (Potencial de Acidez) = % Azufre como sulfuro x 31,25

PNN (Potencial Neto de Neutralización) = PN – PA

(\*) Resultados expresados como kilogramos equivalentes CaCO<sub>3</sub>/ton de material

Las muestras estudiadas presentan valores de pH en pasta por encima de 7, es decir que en ningún caso estas muestras han empezado a generar acidez.

El PN reportado por laboratorio se encuentra en 90,4. Los resultados de los análisis de carbono inorgánico están en el orden de 0,01% CO<sub>3</sub><sup>=</sup>, lo que indican que las muestras no son muy ricas en minerales carbonatados capaces de neutralizar la acidez.

Las muestras tienen poco azufre total (1,13%), mientras que los valores de azufre en forma de sulfuro se presentan en bajas concentraciones (0,3%).

#### **5.1.1.7. Conclusiones de resultados geoquímicos.**

El análisis de los ensayos ABA de las muestras estudiadas indica que no están desarrollando acidez en la actualidad (valor de pH en pasta superior a 7). Además, el azufre en forma de sulfuro en las muestras está presente en bajas concentraciones (0,3%), lo que pone de manifiesto el muy bajo contenido de pirita u otro sulfuro que potencialmente hubiera sido generador de acidez de estas muestras.

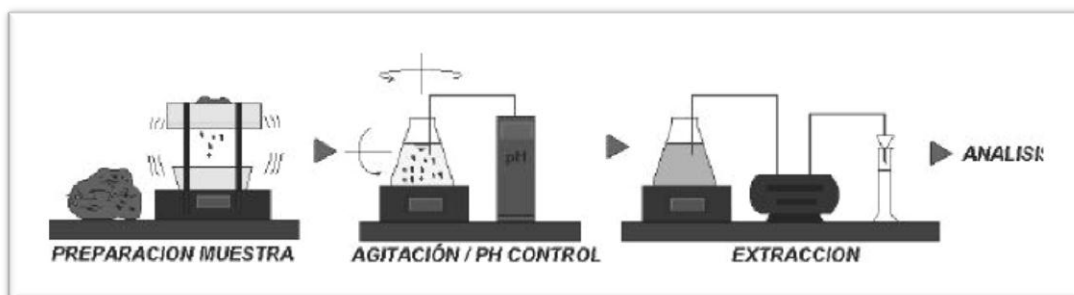
La interpretación a partir de los ensayo ABA indica que el potencial de generación de acidez de estas escorias es nulo o bajo, debido principalmente al escaso contenido en sulfuros y al elevado potencial de neutralización.



### 5.1.2. TEST SPLP – 1312 (SYNTHETIC PRECIPITATION LEACHING PROCEDURE).

Si un agua superficial o subterránea se pone en contacto con un material, cada componente del mismo se disuelve a una velocidad finita. Incluso en los residuos solidificados más impermeables (como arcillas, cemento, vidrio, etc.) el agua puede penetrar en su interior y disolver parte del residuo.

El potencial impacto en el medio ambiente de los residuos sólidos dispuestos en el suelo es generalmente estimado utilizando tests de lixiviación tipo batch a escala de laboratorio (figura N° 5.1) por constituir una forma rápida y económica para evaluar el potencial de peligrosidad de un residuo.



**Figura N° 5.1 Esquema práctico sobre procedimientos de test de lixiviación.**

Para determinar la estabilidad química de residuos mineros, en Estados Unidos se han desarrollado una serie de pruebas de lixiviación cuya aplicación depende del alcance del estudio:

- Para fines regulatorios, la US EPA (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos) emplea el test TCLP – 1311 (Toxicity Characteristic Leaching Procedure),

- Para fines de reconocimiento en campo, se emplean el test SPLP – 1312 (Synthetic Precipitation Leaching Procedure), el USGS FLT (U.S. Geological Survey Field Leach Test), el Meteoric Water Mobility Procedure (MWMP) del Estado de Nevada, entre otros.

De acuerdo a la literatura, en Europa se usan diversos métodos regulatorios de lixiviación como el DIN 38414 S4 de Alemania, el AFNOR X 31-210 de Francia así como los tests NEN 7341 y 7349 de Holanda.

#### **5.1.2.1 Objetivo.**

Determinar si los constituyentes de las escorias producidas, al entrar en contacto con agua de lluvia ácida, lixivien en forma natural concentraciones peligrosas de productos tóxicos.

#### **5.1.2.2 Metodología.**

El test SPLP 1312 trata de simular el efecto de lluvia ácida sobre los residuos dispuestos en tierra y reducidos a un tamaño inferior a 9,5 mm. Se coloca una muestra de 100 g en un recipiente de extracción de 2 litros y se mezcla con un fluido de extracción compuesto de dos ácidos inorgánicos (buffer de mezcla de ácido nítrico con ácido sulfúrico) a un pH de 4,2 a 5 que simula lluvia ácida.

Se emplea una relación L/S específica (20:1) y la mezcla es rotada  $18 \pm 2$  h a 30 rpm. El lixiviado es luego filtrado con un filtro de fibra de vidrio y se analiza, si la concentración de un constituyente en particular excede los estándares de agua de uso doméstico, el material se considerará como peligroso.

### 5.1.2.3. Discusión de resultados.

Los resultados del análisis químico del extracto de lixiviación se muestran en la tabla siguiente y se comparan con los límites máximos establecidos por EPA, la Norma Chilena 1333 sobre Requisitos de Calidad del Agua para diferentes usos - Valores para Agua de Riego y los valores de calidad de agua vigentes para el Perú.

**Tabla N° 5.3 Resultados del test SPLP – US EPA 1312 (mg/L)**

	As	Ba	Cd	Cr	Hg	Pb	Ag	Se	V
Extracto Líquido	<0.005	<0.05	< 0.01	<0.05	<0.001	<0.05	<0.02	<0.005	<0.1
USA (a)	0.05	2	0.005	0.1	0.0002	0.015	0.01	0.05	-----
<b>Norma Chilena de Referencia</b>									
NCh 1333 (b)	0.1	4.0	0.01	0.1	0.001	5.0	0.2	0.02	0.1
<b>Norma Peruana de Referencia</b>									
ECA Agua Cat. 3 ( c)	0.05	0.7	0.005	0.1*	0.001	0.05	0.05	0.05	0.1**
(*) En este caso el parámetro regulado es cromo +6 y no cromo total									
(**) El V no está regulado en Agua Categoría 3. El valor 0,1 mg/L corresponde a Agua Categoría 1.									

- (a) U.S. National Drinking Water Standards of Metals.  
 (b) Norma Chilena sobre Requisitos de Calidad del Agua para Diferentes Usos - Valores para Agua de Riego.  
 (c) D.S. N° 002-2008-MINAM. Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para Agua - Categoría 3: Riego de Vegetales y Bebida de Animales.

- Los extractos líquidos del test SPLP método 1312 de las muestras de escoria no exceden los estándares de agua de consumo humano de USA para todos sus constituyentes, por lo que se concluye que estas escorias no presentan características de toxicidad. Por lo tanto, pueden disponerse en el depósito de escorias metalúrgicas.
- A manera de referencia, se compararon los resultados de los extractos de lixiviación con los estándares de calidad ambiental (ECA) para agua (riego de vegetales) tanto para el Perú como para Chile, y se aprecia

que ninguno de los valores supera los ECAs, concluyéndose igualmente que no presentan riesgos de contaminación para las aguas superficiales y subterráneas.

## **5.2 Determinación de Material Particulado Emitido por Chimeneas.**

Para determinar la concentración de vanadio en el material particulado emitido por la chimenea principal, se efectuaron monitoreos de emisiones durante las pruebas industriales de tratamiento del catalizador agotado pentóxido de vanadio en el horno oxy-fuel de la Fundición de Cobre.

Estos monitoreos se efectuaron por un laboratorio externo acreditado ante INDECOPI siguiendo el Método 5 de la US EPA – Determinación de Material Particulado Emitido por Fuentes Estacionarias y los resultados se compararon con los Niveles Máximos Permisibles de Elementos y Compuestos Presentes en Emisiones Gaseosas Provenientes de las Unidades Minero-Metalúrgicas establecidos en la RM-N°315-96-EM/VMM.

### **5.2.1 Método 5 USEPA: Determinación de Emisiones de Partículas de Fuentes Fijas.**

Procedimiento descrito en el “CODE OF FEDERAL REGULATIONS”, Parte 40, Título 60 de la USEPA, y basado en el principio de muestreo isocinético, que consiste en captar los gases de aspiración a igual velocidad de los mismos en el interior de la chimenea, de manera que la extracción de material particulado de la fuente de emisión se deposite en un filtro de fibra de vidrio mantenido a una temperatura del rango de 120 +/- 14 °C (248 +/- 25 °F). La masa particulada, que incluye todo material que se condense a temperatura de filtración, o superior, se determina gravimétricamente después de extraer el agua sin mezclar.

**Tabla N° 5.7 Concentraciones de Material Particulado y Elementos Metálicos.**

Parámetros	Chimenea Principal		Promedio Aritmético	Desviación Estándar	Nivel Máximo Permissible <sup>3</sup>
	Corrida 1	Corrida 2			
Partículas (mg/m <sup>3</sup> ) <sup>1</sup>	14,41	4,26	<b>9,34</b>	7,18	<b>100</b>
Plomo (mg/m <sup>3</sup> ) <sup>2</sup>	0,76	0,70	<b>0,73</b>	0,04	<b>25</b>
Arsénico (mg/m <sup>3</sup> ) <sup>2</sup>	0,18	0,08	<b>0,13</b>	0,07	<b>25</b>

Valores expresados a presión y temperatura estándar: 760 mmHg y 25 °C.

(1) Determinado mediante aplicación del Método 5 – USEPA.

(2) Determinado sobre las partículas recolectadas en el filtro.

(3) Niveles Máximos Permisibles de Elementos y Compuestos presentes en Emisiones gaseosas provenientes de Unidades Minero-Metalúrgicas. R.M. N° 315-96-EM/VMM.

### 5.2.2 Discusión de Resultados.

- La fuente fija de emisión evaluada presentó concentraciones de material particulado por debajo del nivel máximo permisible de carácter obligatorio establecido en la R.M. N° 315-96-EM/VMM (100 mg/m<sup>3</sup>).
- Las concentraciones de plomo y arsénico en el material particulado emitido no exceden los límites máximos permisibles señalados en la R.M. N° 315-96-EM (25 mg/m<sup>3</sup>). Debe precisarse que el vanadio no es un elemento regulado por la normativa peruana para emisiones por chimeneas.
- A manera de referencia, se determinó el contenido de vanadio en el material particulado capturado en los filtros durante la prueba industrial y arrojaron valores inferiores a 0,02 ppm de vanadio.

### 5.3 Monitoreo de Agentes Químicos en Ambientes de Trabajo.

Dando cumplimiento a lo establecido en el DS 046-2001-EM Reglamento de Seguridad e Higiene Minera que se encontraba vigente durante las pruebas industriales de tratamiento del catalizador agotado pentóxido de vanadio en el horno oxy-fuel de la Fundición de Cobre, se efectuaron determinaciones de Vanadio en ambientes de trabajo, para lo cual se

empleó la metodología establecida en las Normas NIOSH (*National Institute for Occupational Safety and Health*) y en este caso particular el método NIOSH 7504 (Vanadium Oxides).

El método consiste en hacer pasar a través de un filtro un caudal de aire establecido, utilizando para ello un equipo portátil. La concentración de partículas suspendidas ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) en el ambiente de trabajo, se calcula a partir del volumen de aire aspirado y la cantidad de pentóxido de vanadio presente en el polvo recolectado en el filtro.

**Tabla N° 5.8 Mediciones de Polvo en Ambiente de Trabajo.**

Punto de Medición	Fecha de Medición	Caudal L/min	Hora de Inicio	Concentración $\text{V}_2\text{O}_5$ ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )			
				Valor Medido	DS 046-2001-EM	OSHA <sup>a</sup>	ACGIH <sup>b</sup>
Operador 1	02 de junio	1,7	16:10 h	0,021	0,50	0,50	0,05
Operador 2	02 de junio	1,7	00:05 h	0,015			
Operador 3	02 de junio	1,7	08:05 h	0,019			

a) La Administración de Salud y Seguridad Ocupacional (OSHA, *Occupational Safety and Health Administration*) ha establecido un límite de exposición de 0,5 miligramos por metro cúbico ( $0,5 \text{ mg}/\text{m}^3$ ) para polvo de pentóxido de vanadio y  $0,1 \text{ mg}/\text{m}^3$  para vapores de pentóxido de vanadio en el aire del trabajo durante una jornada diaria de 8 horas, 40 horas a la semana.

b) ACGIH (*American Conference of Governmental Industrial Hygienists*)

### 5.3.1 Discusión de Resultados.

- En todos los casos, se puede apreciar que las concentraciones de pentóxido de vanadio en el polvo obtenidos en los puntos de medición no exceden los límites máximos permisibles (LMP) establecidos en el D.S. N° 046-2001-EM<sup>i</sup>, cumpliendo lo establecido con la normativa peruana.

<sup>i</sup>“Disposición final del catalizador pentóxido de vanadio por fijación en una escoria metalúrgica”

- De manera referencial, se observa que las mediciones no superan los LMP de la ACGIH, a pesar que estos límites son 10 veces menores que los establecidos en la normativa peruana.

---

<sup>i</sup> Reglamento de Seguridad e Higiene Minero vigente durante la ejecución de las pruebas industriales.

### **CONFIRMACION DE LA HIPOTESIS.**

De la evaluación de los resultados de la prueba a nivel industrial, se desprende lo siguiente:

- Más del 98% del vanadio que ingresó en el pentóxido de vanadio agotado se desplazó a la fase escoria del horno reverbero de cobre, evidenciando la factibilidad técnica del proceso propuesto.
- Las escorias obtenidas durante las pruebas industriales son químicamente estables, por lo que podrían confinarse en el actual depósito de escorias de la Fundición de Cobre sin afectar la calidad de las aguas subterráneas y superficiales de su entorno.
- La calidad del cobre blíster obtenido durante las pruebas industriales se mantiene dentro de los parámetros establecidos, ya que la solubilidad de vanadio en la fase mata es muy baja (1 ppm V). De esta manera, no se compromete la subsiguiente operación de refinación del cobre.
- Durante el procesamiento del pentóxido de vanadio no se excedieron los límites máximos permisibles de emisión por chimenea y en ambientes de trabajo establecidos en la normativa peruana, lo que asegura el cuidado del medio ambiente y de la salud de los trabajadores.

Por lo expuesto, se confirman los postulados establecidos en la hipótesis.



## ANÁLISIS COSTO - BENEFICIO

El análisis costo-beneficio compara los costos y los beneficios de ejecutar programas o proyectos, incluyéndose también aquellos ligados al medio ambiente. De esta manera, los programas o proyectos cuyos beneficios superen los costos estimados son los que se recomiendan para ser ejecutados, puesto que esto tendería a maximizar los beneficios netos tanto en el entorno ambiental como en el aspecto económico, la seguridad y salud de las personas.

Este análisis considera como un “costo” a cualquier impacto derivado de la implementación del proceso propuesto que en general tenga un carácter negativo y considera como un “beneficio” a cualquier impacto que en general tenga un carácter positivo.

Para fines de esta evaluación y debido a la subjetividad de asignar valores numéricos a los impactos, se ha realizado un análisis cualitativo de costo – beneficio del tratamiento del catalizador *pentóxido de vanadio agotado* propuesto en este trabajo, detallándose a continuación una revisión de los principales costos-beneficios:

### IMPACTOS AMBIENTALES NEGATIVOS

Los potenciales impactos negativos ambientales más relevantes identificados estarían asociados directamente a la calidad del aire e indirectamente a la calidad del agua superficial y subterránea, debiendo resaltar que estos impactos no son de significancia mayor respecto a los ya comprometidos por las operaciones del Complejo Metalúrgico.

- Afectación de la calidad del aire y de los ambientes de trabajo por emisión de vanadio por la chimenea principal y por emisiones fugitivas.
- Afectación de las aguas superficiales y subterráneas del entorno por generación de drenaje ácido y posterior lixiviación del vanadio presente en las escorias producidas durante el tratamiento del catalizador agotado.

De acuerdo a los resultados de los monitoreos ambientales descritos en el Capítulo V, no se evidenciaron impactos a la calidad del aire ya que no se excedieron los límites máximos permisibles de emisión por chimenea ni las concentraciones máximas de agentes químicos en ambientes de trabajo establecidos en la normativa peruana.

De igual manera, los resultados de las pruebas geoquímicas efectuadas a las escorias evidencian que no son generadoras de ácido ni se lixivian por acción de la lluvia ácida, por lo que no comprometerían la calidad de las aguas superficiales y subterráneas del entorno del depósito de escorias.

## **IMPACTOS AMBIENTALES POSITIVOS**

Los impactos positivos están asociados principalmente al aspecto económico y ambiental, en los siguientes componentes:

- Eliminación del riesgo de derrame durante el transporte, manipuleo y almacenamiento del catalizador agotado, lo cual podría afectar tanto al medio ambiente como a la salud de las personas.
- Reducción de costos asociados al transporte y disposición final del catalizador agotado en depósitos de seguridad particulares.
- Cero inversión para la implementación del proceso propuesto, ya que se emplearían las instalaciones y servicios existentes.

## CONCLUSIÓN

Si bien, de acuerdo a la evaluación efectuada, la ejecución del presente trabajo podría alterar o tener algún impacto negativo sobre algún recurso ambiental y la salud de las personas, los resultados de los monitoreos ambientales evidenciaron que no habría afectación a la calidad de aire ni del agua. Por otro lado, los beneficios que se generarían están relacionados directamente tanto con el aspecto económico como con la seguridad y salud de las personas.

Al tenerse controlados los riesgos de afectación al entorno, los beneficios exceden en valor a los posibles costos ambientales que se alcanzarían por la implementación del presente trabajo.

Sin embargo, el titular minero debe comprometerse a manejar sus operaciones con las mejores prácticas y procedimientos para maximizar los beneficios económicos y minimizar o evitar los costos ambientales y de salud adversos.

## CONCLUSIONES

1. Los resultados obtenidos en la prueba industrial han confirmado los enunciados formulados en la hipótesis: *“El catalizador agotado de pentóxido de vanadio generado en las plantas de ácido sulfúrico puede ser fijado en las escorias metalúrgicas de fundiciones de cobre, logrando un producto que sea químicamente estable en condiciones naturales”*. Se concluye que es un proceso viable desde el punto de vista técnico, ambiental y de salud de las personas.
2. La dosificación de pentóxido de vanadio agotado a la carga de calcina del horno oxy-fuel de cobre, tal como se propone en este trabajo, es de aproximadamente el 0,3% del peso total, lo que aparentemente no afectaría el proceso metalúrgico ya establecido. Por tal razón, se estima que el actual marco teórico de formación de mata y escoria de cobre permanecería inalterable.
3. Por las condiciones neutras-oxidantes de la atmósfera del horno reverbero y por cuestiones termodinámicas, se deduce que el vanadio estaría presente en la fase escoria en forma de óxido. La escoria del tipo fayalita tiene una gran capacidad de disolver óxidos, lo que podría explicar que más del 98% del vanadio que ingresó en el pentóxido de vanadio agotado se haya desplazado a la fase escoria del horno reverbero de cobre.
4. La solubilidad de vanadio en la fase mata de cobre es muy baja, habiéndose alcanzado valores del orden de 1 ppm durante las pruebas industriales. Con estos resultados, se podría afirmar que la calidad del cobre blister obtenido se mantendría dentro de los parámetros establecidos, descartándose una contaminación del blister con vanadio.

5. Los resultados de la prueba geoquímica ABA (Acido Base) aplicada a las escorias obtenidas durante las pruebas industriales indican que no son generadoras de ácido, por lo que no comprometerían la calidad de las aguas superficiales y subterráneas del entorno del depósito de escorias.
6. De acuerdo a los resultados del test SPLP método 1312 de la US EPA, las escorias obtenidas durante las pruebas industriales son químicamente estables a la acción de la lluvia ácida, por lo que podrían confinarse de manera segura en el actual depósito de escorias de La Oroya, el cual está expuesto a la acción del intemperismo.
7. Las pruebas industriales de procesamiento del pentóxido de vanadio evidenciaron que no causan impactos a la calidad del aire, ya que no se excedieron los límites máximos permisibles de emisión por chimenea ni las concentraciones máximas de agentes químicos en ambientes de trabajo establecidos en la normativa peruana.
8. Para la implementación industrial del presente trabajo no se variarán los parámetros operativos del horno Oxy-Fuel, por lo que no se alterará el flujo normal de producción de la Fundición de Cobre.
9. De acuerdo al análisis cualitativo de costo beneficio efectuado, los impactos positivos exceden en valor a los posibles costos ambientales que se alcanzarían por la implementación del presente trabajo.
10. El presente trabajo podría efectivizarse a nivel industrial con cero inversiones, ya que se utilizarían las instalaciones, equipos y servicios existentes.

## RECOMENDACIONES

1. Se recomienda hacer una evaluación económica para confirmar las bondades del proceso propuesto. La implementación industrial reduciría ostensiblemente los costos referidos al traslado y disposición final de este residuo peligroso en un depósito de seguridad particular; sin embargo, deberá evaluarse también el costo incurrido por su tratamiento en el horno reverbero de cobre (petróleo, mano de obra, etc.) y el costo financiero por su tratamiento en lugar de procesar calcina y obtener mayor volumen de producción.
2. Se deben continuar las pruebas hasta determinar la carga máxima de pentóxido de vanadio agotado que puede tratarse en el horno reverbero de cobre sin que se afecte la calidad del cobre blíster ni se altere la estabilidad química de las escorias. Este dato será de suma importancia en vista que la generación de pentóxido agotado se incrementará al entrar en operación sostenida las plantas de ácido sulfúrico de los circuitos de plomo y cobre del Complejo Metalúrgico de La Oroya.
3. Se deberían aperturar líneas de investigación a futuro para enriquecer las bases teóricas del presente proceso, y así conocer con más certeza el comportamiento del vanadio en las fases mata y escoria.
4. La normativa ambiental peruana debería establecer los estándares de calidad ambiental (ECAs) para las aguas subterráneas y para los suelos, debiendo estos ECAs ser de referencia obligatoria en los Estudios de Impacto Ambiental (EIAs) de los nuevos proyectos mineros e industriales. De esta manera, se aseguraría el cuidado de los suelos y aguas subterráneas en su calidad de cuerpos receptores.

5. Se debería enviar muestras de escorias del tratamiento de catalizador agotado para análisis de microscopía óptica y rayos X a fin de determinar la distribución y estructura del vanadio en la matriz de escoria.

**BIBLIOGRAFIA**

1. *“Acid Mine Drainage Prediction”*, Technical Document, December 1994. U.S. Environmental Protection Agency.
2. *“A Guide to the Use of Leaching Tests in Solid Waste Management Decision Making”*. Timothy Townsend, Yong-Chul Jang and Thabet Tolaymat, Department of Environmental Engineering Sciences, University of Florida, March 2003.
3. *“Characterization of Fayalite from Copper Slags”*, I. Mihailova & D. Mehandjiev, Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy, 45, 3, 2010, 317-326. University of Chemical Technology and Metallurgy, Ohridski, Sofia 1756, Bulgaria.
4. *“Determinación de la Actividad del Cobre en el Sistema  $\text{SiO}_2 - \text{Cu}_2\text{O} - \text{FeO}$ ”*, Juan López López, Departamento de Ingeniería en Metalurgia y Materiales, Instituto Politécnico Nacional de México, Octubre 2008.
5. *“Disposal of material containing vanadium as landfill”*, U.S. Patent 4668124.
6. *“Disposal of spent vanadium pentoxide catalyst by vitrification”*, Schumacher, Pierre L. J., United States Patent 5091001.
7. *“Distribution of Elements in Slag, Matte, and Speiss during Settling Operation”*, Amirreza Khatibi, October 2008, Division of Process Metallurgy, Department of Chemical Engineering and Geosciences. Lulea University of Technology, Sweden.
8. *“Estudio de viabilidad de fijación del pentóxido de vanadio – cesio en una matriz silicatada de escoria, en forma estable y ambientalmente sustentable en el tiempo”*, Rodrigo Subiabre - Carlos Salvo de la Compañía Minera Disputada de las Condes Limitada, Fundición



Chagres. Artículo presentado en la III Mesa Redonda Plantas de Ácido 13 y 14 Noviembre 2000 Chile.

9. *“Extractive Metallurgy of Copper”*, W.G. Davenport, M. King, M. Schlesinger, A.K. Biswas. Pergamon, 4th edition, 2002.
10. *“Fabricación de Ácido Sulfúrico”*, Serie Guías Técnicas de aplicación de BREF´s en la Comunidad Autónoma del País Vasco, 2006.
11. *“Fundamentals of Metallurgy”*, Seshadri Seetharaman. Woodhead Publishing Limited, 2005.
12. *“Guía Ambiental para el manejo de drenaje ácido de minas”*, Ministerio de Energía y Minas del Perú.
13. *“Handbook of Acid Sulphuric Manufacturing”*, Douglas K. Louie, P.Eng., Published by DKL Engineering, Inc. 2005, Canadá.
14. *“Kinetics of Copper Reduction from Molten Slags”*, Fiseha Tesfaye Firdu, August 2009. Helsinki University of Technology Department of Materials Science and Engineering.
15. *“Method 1312 - Synthetic Precipitation Leaching Procedure”*. Revision 0, September 1994, U.S. Environmental Protection Agency.
16. *“Production of Sulphuric Acid”*, European Sulphuric Acid Association (ESA), 2000. Booklet N° 3 of 8.
17. *“Recovery of vanadium pentoxide from spent catalyst used in the manufacture of sulphuric acid”*, S. Khorfan, A. Wahoud and Y. Reda, Periodica Polytechnica Ser. Chem. Eng. Vol. 45, no. 2, pp. 131–137 (2001), Syria.
18. *“Vanadium Oxide Recovery from Spent Catalysts by Chemical Leaching”*, Falak. O. Abas, Eng.&Tech., Vol. 26, No 2, 2008.

19. *“Vanadium Recovery by Leaching in Spent Catalysts for Sulfuric Acid Production”*. José Luís Magnani, Escola Politécnica da USP; George Cury Kachan, Escola Politécnica da USP; Newton Libanio Ferreira, Universidade Metodista de Piracicaba. *Revista de Ciência & Tecnologia* • V. 8, Nº 16 – pp. 85-90

## ANEXOS

- PROPIEDADES DEL VANADIO
- MSDS DEL PENTOXIDO DE VANADIO

## PROPIEDADES DEL VANADIO

El vanadio es un elemento químico de número atómico 23 situado en el grupo 5 de la tabla periódica de los elementos. Su símbolo es V. Es un metal dúctil, blando, brillante y poco abundante. Se encuentra en distintos minerales y se emplea principalmente en algunas aleaciones. El nombre procede de la diosa de la belleza *Vanadis* en la mitología escandinava.

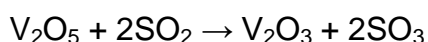
Andrés Manuel del Río descubrió el vanadio en 1801 mediante el análisis de los minerales de la vanadinita, y lo llamó *Erythronium*. Cuatro años más tarde, fue equivocadamente convencido por otros científicos que su descubrimiento era idéntico al cromo. El elemento fue redescubierto en 1831 por Nils Gabriel Sefström, quien lo llamó vanadio. Ambos nombres fueron atribuidos a la amplia gama de colores que se encuentran en los compuestos de vanadio.

### Química y compuestos del vanadio.

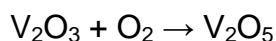
La química de vanadio es notable por la accesibilidad de los cuatro estados de oxidación adyacentes. Los estados de oxidación más comunes del vanadio son +2, +3, +4 y +5. El óxido de vanadio (II) es un agente reductor, mientras que el óxido de vanadio (V) es un agente oxidante del óxido de vanadio (IV). A menudo existen compuestos de vanadio como los derivados que contengan dióxido de vanadio (VO<sub>2</sub>).

La batería redox de vanadio utiliza estos estados de oxidación; la conversión de estos estados de oxidación es ilustrada por la fuerte reducción de una solución de ácido de vanadio (V) compuesto con polvo de zinc. La primera característica de color amarillo de los iones de vanadato (VO<sub>4</sub><sup>3-</sup>), se sustituye por el color azul [VO(H<sub>2</sub>O)<sub>5</sub>]<sup>2+</sup>, seguido por el color verde [V(H<sub>2</sub>O)<sub>6</sub>]<sup>3+</sup> y luego violeta [V(H<sub>2</sub>O)<sub>6</sub>]<sup>2+</sup>.

El compuesto de mayor importancia es el pentóxido de vanadio, que se utiliza como un catalizador para la producción de ácido sulfúrico. Este compuesto oxida el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) a trióxido (SO<sub>3</sub>). En esta reacción redox, el azufre se oxida de +4 a +6, y el vanadio se reduce de +5 a +3:



El catalizador se regenera por oxidación con el aire:



El pentaóxido de vanadio, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, que se suele obtener como un sólido pulverulento de color naranja, es un agente oxidante, y se emplea como catalizador y como colorante.

### **Diagrama de Predominancia de Pourbaix.**

Los diagramas Eh – pH, también conocidos como Diagramas de Pourbaix, muestran las áreas de estabilidad termodinámica de diferentes especies en una **solución acuosa** en función del pH y del potencial electroquímico. El sistema puede contener diversos tipos de especies, tales como iones disueltos, óxidos condensados, hidróxidos, etc.

Usualmente, la escala del eje de **potencial redox** está basada en el Electrodo Estándar de Hidrógeno (SHE por sus iniciales en inglés). El potencial redox de un sistema representa su habilidad para cambiar electrones. El sistema tiende a remover electrones de las especies cuando el potencial es alto (Eh>0). Estas condiciones pueden existir cerca del ánodo en una celda electroquímica, pero también pueden ser

generadas por la acción de un agente oxidante ( $\text{Cu} + \text{H}_2\text{O}_2 = \text{CuO} + \text{H}_2\text{O}$ ).

Bajo condiciones reductoras, el potencial es bajo ( $\text{Eh} < 0$ ) y el sistema es capaz de suministrar electrones a las especies, por ejemplo, con un cátodo o con agentes reductores.

El término pH se usa para expresar la intensidad de la acidez o de la alcalinidad de una solución y representa la concentración de ion hidrógeno.

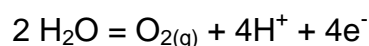
El pH del sistema describe su habilidad para suministrar protones ( $\text{H}^+$ ) a las especies. En condiciones ácidas ( $\text{pH} < 7$ ) la concentración de los protones es alta y en condiciones básicas ( $\text{pH} > 7$ ) la concentración de protones es baja.

Generalmente, una gran cantidad de especies diferentes existen simultáneamente en una mezcla acuosa bajo condiciones fijas de Eh-pH. Los diagramas de Pourbaix simplifican esta situación ya que solo muestran las especies **predominantes** en cada área de estabilidad. Las líneas en los diagramas representan las condiciones de Eh-pH donde el contenido de las especies adyacentes es el mismo en el estado de equilibrio. No obstante, estas especies siempre existen en pequeñas cantidades en ambos lados de las líneas y podrían tener algún efecto sobre aplicaciones prácticas.

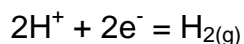
Las ecuaciones químicas pueden además ser representadas con líneas en los diagramas, las que pueden ser divididas en tres grupos de acuerdo a los tipos de reacción:

- **Líneas horizontales.** Estas líneas representan reacciones que están involucradas con electrones y que son independientes del pH. Tanto los iones  $H^+$  como  $OH^-$  no participan en estas reacciones.
- **Líneas diagonales** con pendientes positivas o negativas. Estas líneas representan reacciones que involucran electrones y iones ( $H^+$  y  $OH^-$ ).
- **Líneas verticales.** Estas líneas representan reacciones que están involucradas con iones ( $H^+$  y  $OH^-$ ), pero que son independientes del Eh. En otras palabras, los electrones no participan en estas reacciones.

El área de estabilidad química del agua se muestra en los diagramas Eh-pH con líneas punteadas. El límite de estabilidad superior del agua está basado en el potencial cuando la generación de oxígeno empieza sobre el ánodo, según la reacción:



El límite de estabilidad inferior está basado en la formación de hidrógeno sobre el cátodo de acuerdo a la siguiente reacción:



Los diagramas de Pourbaix contienen información básica de un sistema acuoso en una forma compacta e ilustrativa, y han encontrado muchas aplicaciones en ingeniería de corrosión, geoquímica e hidrometalurgia.

En hidrometalurgia, los diagramas Eh-pH pueden ser usados, por ejemplo, para especificar las condiciones de lixiviación selectiva o precipitación. En ingeniería de corrosión, ellos pueden ser usados para analizar el comportamiento de disolución o pasivación de diferentes metales en ambientes acuosos. Estos diagramas pueden además ser usados para ilustrar el comportamiento químico de diferentes iones en soluciones acuosas.

Los geoquímicos usan los diagramas de Pourbaix con bastante frecuencia para estudiar los procesos de intemperismo y sedimentación química. Los procesos de intemperismo se usan para predecir que sucederá con un mineral que está expuesto a condiciones ácidas oxidantes a altas temperaturas y presiones.

### **Sistema V – O - H.**

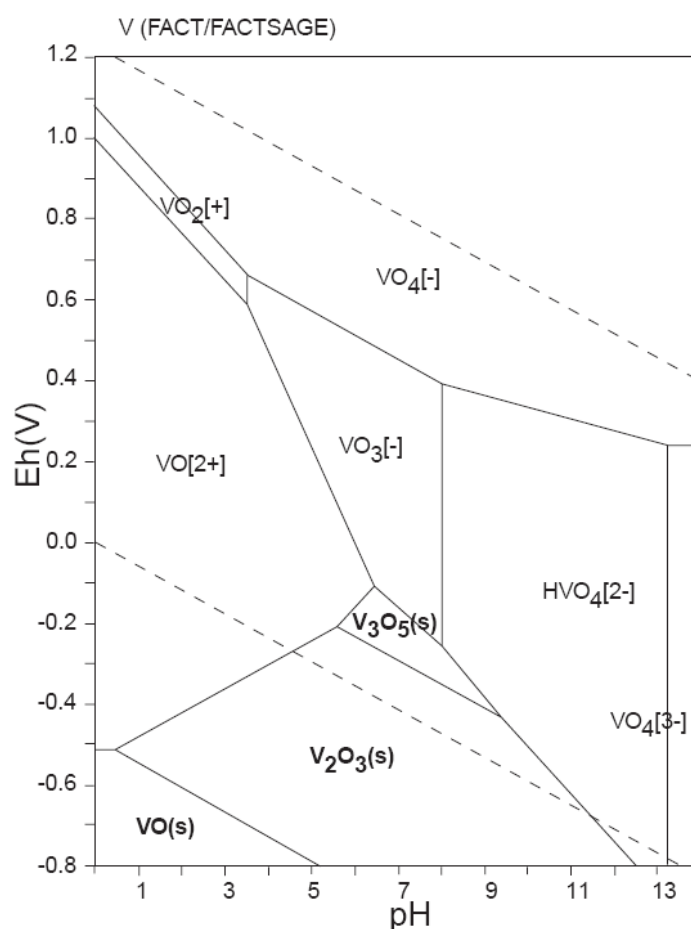
Del estudio del diagrama V – H<sub>2</sub>O mostrado en la figura N° 6.1 se puede deducir lo siguiente:

- La presencia de líneas diagonales indica que el comportamiento redox de los iones de vanadio en solución acuosa es altamente afectado por el pH.
- El diagrama muestra que las zonas de predominio de las especies están relacionadas con los estados de valencia en solución acuosa. Mientras menor sea la valencia del vanadio, el área de predominancia de la especie se encontrará en la región reductora. A su vez, cuanto mayor sea la valencia de las especies, su área de predominancia se ubicará en las zonas de menor pH.
- Se aprecian los cambios del estado de oxidación del vanadio (+5, +3 y +2) medida que las condiciones reductoras se hacen más fuertes (Eh<0). Para un potencial redox cercano a 0 y en medio



acuoso, coexiste el óxido de vanadio V; el óxido de vanadio III se presenta para potenciales  $Eh < -0.2$  mientras que el óxido de vanadio II se encuentra a potenciales  $Eh < -0.5$  pero en medio ácido.

- En el rango de Eh presentado, no se aprecia la formación de vanadio metálico catódico. Sin embargo, por consideraciones termodinámicas, se calcula que podría depositarse vanadio metálico sobre el cátodo a condiciones fuertemente reductoras ( $Eh < -1.2$ ) y en medio ácido.



**Figura N° 6.1. Diagrama Eh-pH del sistema V-O-H.  $\Sigma V = 10-10$ , 298.15K, 105 Pa.**

- Excepto en medio ácido muy fuerte, las especies de vanadio V son agentes oxidantes relativamente débiles. A lo largo de una serie de transición, aumenta la capacidad oxidante del óxido u oxoión superior.
- Bajo condiciones oxidantes ( $E_h > 0$ ), el vanadio V forma diversos peroxo-complejos. Las especies  $VO^{2+}$ ,  $VO_2^+$  y  $VO_3^-$  están presentes en soluciones ácidas.
- En soluciones alcalinas, las especies con grupos de peróxidos 2, 3 y 4 están presentes en un amplio rango de potencial.

### **Aplicaciones del Vanadio.**

Aproximadamente el 80% del vanadio producido se emplea como ferrovanadio o como aditivo en aceros.

- Se emplea en acero inoxidable usado en instrumentos quirúrgicos y herramientas, en aceros resistentes a la corrosión, y mezclado con aluminio en aleaciones de titanio empleadas en motores de reacción. También, en aceros empleados en ejes de ruedas y cigüeñales, engranajes, y otros componentes críticos.
- Es un importante estabilizador: se utiliza en los vehículos para darle un mayor agarre en las llantas y así tener una mayor capacidad de carburos en la fabricación de aceros.
- Se emplea en algunos componentes de reactores nucleares.
- Forma parte de algunos imanes superconductores.
- Algunos compuestos de vanadio se utilizan como catalizadores en la producción de anhídrido maleico y ácido sulfúrico. Concretamente, es muy usado el pentóxido de vanadio,  $V_2O_5$ , que también se emplea en cerámica.

La mayor parte del vanadio se utiliza como ferrovanadio como aditivo para mejorar los aceros. El ferrovanadio se produce directamente por la reducción de una mezcla de óxido de vanadio, óxidos de hierro y de hierro en un horno eléctrico. El vanadio termina en arrabio producido a partir de la magnetita de vanadio. Durante la producción de acero, el oxígeno es soplado en la fundición de hierro, la oxidación del carbono y la mayoría de las otras impurezas, formando escoria. Dependiendo del mineral utilizado, la escoria contiene hasta un 25% de vanadio.

El vanadio metálico se obtiene a través de un proceso de múltiples pasos que comienza con la calcinación de mineral triturado con NaCl o Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> en alrededor de 850 °C para dar metavanadato de sodio (NaVO<sub>3</sub>). De un extracto acuoso de este sólido se acidifica a dar "pastel rojo", una sal polivanadiata, que se reduce con el calcio metálico.

### **Aleaciones.**

Aproximadamente el 85% de vanadio producido se utiliza como ferrovanadio o como aditivo del acero. El aumento considerable de la fuerza en el acero que contienen pequeñas cantidades de vanadio fue descubierto a comienzos del siglo XX. El vanadio forma carburos y nitruros estables, resultando en un aumento significativo de la resistencia del acero. A partir de ese momento el acero de vanadio se utiliza para aplicaciones en ejes, cuadros de bicicletas, cigüeñales, engranajes y otros componentes críticos. Hay dos grupos de vanadio que contienen grupos de aleación de acero. El vanadio, con aleaciones de acero al carbono, contiene 0,15 a 0,25% de vanadio y se usa para herramientas de alta velocidad con rangos de contenido de vanadio del 1% al 5%. Para los aceros para herramientas de alta velocidad, se puede lograr por encima de una dureza Rockwell de 60 kg. El acero se utiliza en los instrumentos quirúrgicos y herramientas.

El vanadio estabiliza la forma beta de titanio y aumenta la resistencia y estabilidad de la temperatura de titanio. Mezclado con aluminio en aleaciones de titanio se utiliza en motores a reacción y células de aeronaves de alta velocidad. Una de las aleaciones de titanio común es 6AL-4V, una aleación de titanio con 6% de aluminio y 4% de vanadio.

### **Otros usos**

El vanadio es compatible con hierro y titanio; por lo tanto, el vanadio es utilizado en revestimiento de titanio y de acero. Los neutrones térmicos moderan la captura de la sección transversal y la corta vida media de los isótopos producidos por captura de neutrones hace al vanadio un material adecuado para la estructura interior de un reactor de fusión. Varias aleaciones de vanadio muestran el comportamiento de superconductor.

El pentóxido de vanadio ( $V_2O_5$ ), se utiliza también como oxidante en la producción de anhídrido maleico y en la fabricación de cerámica. El dióxido de vanadio ( $VO_2$ ), se utiliza en la producción de revestimientos de vidrio, que bloquea la radiación infrarroja a una temperatura específica. El óxido de vanadio puede ser utilizado para inducir color en centros de corindón para crear joyas de alexandrita, aunque alexandrita en la naturaleza es un crisoberilo. El vanadato se puede utilizar para proteger el acero contra la oxidación y la corrosión por un revestimiento de conversión electroquímica. El óxido de vanadio y de litio ha sido propuesto para su uso como ánodo de alta densidad de energía de las baterías de iones de litio de 745 Wh/L, si se combina con una batería de litio de cátodo de óxido de cobalto y de litio. Se ha propuesto por algunos investigadores que una pequeña cantidad, 40 a 270 ppm de vanadio en acero wootz y acero de Damasco, mejora significativamente la resistencia del material, aunque no está claro cuál es la fuente del vanadio.

### **Abundancia y obtención.**

El vanadio no se encuentra nunca en estado nativo, pero está presente en unos 65 minerales diferentes, entre los que destacan la patronita,  $VS_4$ , vanadinita,  $Pb_5(VO_4)_3Cl$ , y la carnotita,  $K_2(UO_2)_2(VO_4)_2 \cdot 3H_2O$ . También se encuentra en la bauxita, así como en depósitos que contienen carbono, como por ejemplo en carbón, petróleos, crudo y alquitrán. Está presente en el petróleo formando estructuras tipo porfirinas. Además, se obtiene pentóxido de vanadio,  $V_2O_5$ , recuperándolo de la combustión del petróleo.

Los vanadatos se disuelven mediante una fusión alcalina. En medio ácido y tras otros procesos se obtiene el  $V_2O_5$ , que se reduce parcialmente con carbono, y luego con calcio en atmósfera de argón para obtener vanadio metálico.

En el caso de que no se parta de un mineral que contenga el vanadato, sino un sulfuro, éste se oxida para obtener el vanadato y se realiza el mismo procedimiento para obtener vanadio. Si se quiere obtener vanadio más puro, se emplea el método Van Arkel-de Boer (formación de un compuesto volátil y su posterior descomposición).

Gran parte de la producción de vanadio en el mundo proviene de la magnetita. El vanadio es extraído principalmente de Sudáfrica, el noroeste de China, y el este de Rusia. En 2007 estos tres países habían extraído más del 95% de las 58.600 toneladas de vanadio producido.

El vanadio también se encuentra en la bauxita y en los depósitos de combustibles fósiles como el petróleo crudo, el carbón, el esquisto bituminoso y las arenas bituminosas. En el petróleo crudo, han sido reportadas concentraciones de hasta 1200 ppm. Cuando se queman productos derivados del petróleo, las trazas de vanadio pueden iniciar la

corrosión en los motores y calderas. Se estima que 110.000 toneladas de vanadio por año se liberan a la atmósfera por la quema de combustibles fósiles. El vanadio también se ha detectado en la luz espectroscópica del Sol y otras estrellas.

### **Toxicología.**

El polvo metálico es pirofórico, y los compuestos de vanadio deberían de ser considerados como altamente tóxicos. Su inhalación puede causar cáncer de pulmón.

La Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA) ha establecido un límite de exposición para el polvo de pentóxido de vanadio de  $0,05 \text{ mg/m}^3$ , y de  $0,1 \text{ mg/m}^3$  para el gas de pentóxido de vanadio en el aire del lugar de trabajo para una jornada de 8 horas, 40 horas a la semana.

El Instituto Nacional de Salud y Seguridad Ocupacional (NIOSH) de EEUU recomienda que deba considerarse peligroso para la salud y la vida un nivel de  $35 \text{ mg/m}^3$  de vanadio. Este nivel se corresponde al cual puede causar problemas permanentes de salud o muerte.

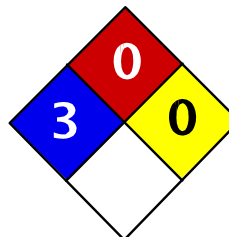
Las trazas de vanadio en los combustibles fósiles presentan un riesgo de corrosión; es el componente principal de combustible que influye en la corrosión de alta temperatura. Durante la combustión, se oxida y reacciona con el sodio y el azufre. La obtención de compuestos de vanadato con puntos de fusión hasta  $530 \text{ }^\circ\text{C}$  ataca la capa de pasivación sobre el acero, y lo hace susceptible a la corrosión. Los compuestos de vanadio sólido también pueden causar abrasión de los componentes del motor. El sulfato de vanadio puede actuar como tratamiento en la diabetes mellitus tipo 2.

Tabla N° 6.1. Propiedades del Vanadio.

Información general	
Nombre, símbolo, número	Vanadio, V, 23
Serie química	Metales de transición
Grupo, período, bloque	5, 4, d
Masa atómica	50,9415 u
Configuración electrónica	[Ar]3d <sup>3</sup> 4s <sup>2</sup>
Dureza Mohs	7,0
Electrones por nivel	2, 8, 11, 2 (imagen)
Propiedades atómicas	
Radio medio	135 pm
Electronegatividad	1,63 (Pauling)
Radio atómico (calc)	171 pm (Radio de Bohr)
Radio covalente	125 pm
Radio de van der Waals	Sin datos pm
Estado(s) de oxidación	2, 3, 4, 5
Óxido	Anfótero
1. <sup>a</sup> Energía de ionización	650,9 kJ/mol
2. <sup>a</sup> Energía de ionización	1414 kJ/mol
3. <sup>a</sup> Energía de ionización	2830 kJ/mol
4. <sup>a</sup> Energía de ionización	4507 kJ/mol
5. <sup>a</sup> Energía de ionización	6298,7 kJ/mol
Propiedades físicas	
Estado ordinario	Sólido
Densidad	6110 kg/m <sup>3</sup>
Punto de fusión	2.175 K (1.902 °C)
Punto de ebullición	3.682 K (3.409 °C)
Entalpía de vaporización	0,452 kJ/mol
Entalpía de fusión	20,9 kJ/mol
Presión de vapor	3,06 Pa a 2175 K
Varios	
Estructura cristalina	Cúbica centrada en el cuerpo
N° CAS	7440-62-2
N° EINECS	231-171-1
Calor específico	490 J/(K·kg)
Conductividad eléctrica	4,89·10 <sup>6</sup> S/m
Conductividad térmica	30,7 W/(K·m)

<b>Velocidad del sonido</b>	4560 m/s a 293,15 K (20 °C)				
<b>Isótopos más estables</b>					
Artículo principal: Isótopos del vanadio					
<b>iso</b>	<b>AN</b>	<b>Periodo</b>	<b>MD</b>	<b>Ed</b> <b>MeV</b>	<b>PD</b>
<sup>48</sup> V	Sintético	15,9735 d	ε	4,012	<sup>48</sup> Ti
<sup>49</sup> V	Sintético	330 d	ε	0,605	<sup>49</sup> Ti
<sup>50</sup> V	intético	1,4·10 <sup>17</sup> a	ε β	2,208 1,037	<sup>50</sup> Ti <sup>50</sup> Cr
<sup>51</sup> V	100%	Estable con 28 neutrones			
Valores en el SI y condiciones normales de presión y temperatura, salvo que se indique lo contrario.					





Health	3
Fire	0
Reactivity	0
Personal Protection	E

## Material Safety Data Sheet MSDS Pentóxido de Vanadio

### Sección 1: Producto Químico e Identificación de la Compañía

**Nombre del Producto:** Pentóxido de Vanadio

**Código del Catálogo:** SLV1165

**CAS#:** 1314-62-1

**RTECS:** YW2450000

**TSCA:** TSCA 8(b) inventario: Pentóxido de Vanadio

**CI#:** No disponible.

**Sinónimos:** Pentóxido de divanadio; Anhidrido vanádico; Pentaóxido de Vanadio

**Nombre Químico:** Pentóxido de Vanadio

**Fórmula Química:** V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>

**Información de Contacto:**

**Sciencelab.com, Inc.**

14025 Smith

Rd. Houston,

Texas 77396

US Sales: **1-800-901-7247**

International Sales: **1-281-441-4400**

Order Online: [ScienceLab.com](http://ScienceLab.com)

**CHEMTREC (24HR Teléfono de Emergencia), llamar al:** 1-800-424-9300

**International CHEMTREC, llamar al:** 1-703-527-3887

**Para asistencia en casos de no emergencia, llamar:** 1-281-441-4400

### Sección 2: Composición e Información de Ingredientes

**Composición:**

Nombre	CAS #	% en peso
Pentóxido de Vanadio	1314-62-1	100

**Información toxicológica de los Ingredientes:** Pentóxido de Vanadio: ORAL (LD50): Agudo: 10 mg/kg [Rata]. 5 mg/kg [Ratón]. DERMAL (LD50): Agudo: 50 mg/kg [Conejo]. DUST (LC50): Agudo: 126 mg/m 6 hr [Rata].

### Sección 3: Identificación de Peligros

**Efectos Agudos Potenciales sobre la Salud:**

Muy peligroso en caso de ingestión o inhalación. Peligroso en caso de contacto con la piel y ojos (irritante). Ligeramente peligroso en caso de contacto cutáneo (permeación). Una severa sobre exposición puede causar la muerte.

**Efectos Potenciales Crónicos sobre la Salud:**

EFFECTOS CANCERÍGENOS: A4 (No clasificado para el humano o animal) por la ACGIH.

EFFECTOS MUTAGENICOS: No disponible.

EFFECTOS TERATOGENICOS: No disponible.

TOXICIDAD DE DESARROLLO: No disponible.

La sustancia puede ser tóxica para el tracto gastrointestinal, tracto respiratorio superior, piel.

La exposición repetida o prolongada a la sustancia puede causar daños localizados en órganos. La exposición repetida a un producto altamente tóxico puede causar deterioro de la salud por acumulación en uno o varios órganos humanos.

## Sección 4: Medidas de Primeros Auxilios

### Contacto con Ojos:

Verificar y retirar los lentes de contacto. En caso de contacto, inmediatamente lave los ojos con abundante agua durante al menos 15 minutos. Puede utilizarse agua fría. Obtener atención médica.

### Contacto con la piel:

En caso de contacto, lave inmediatamente la piel con abundante agua durante al menos 15 minutos mientras se quita la ropa y el calzado contaminados. Cubrir la piel irritada con un emoliente. Puede utilizarse agua fría. Lave la ropa antes de reutilizar. Limpie completamente los zapatos antes de volver a usarlos. Busque atención médica de inmediato.

### Contacto grave con la piel:

Lavar con un jabón desinfectante y cubrir la piel contaminada con una crema anti-bacteriana. Busque atención médica inmediata.

### Inhalación:

Si fue inhalado, trasladar al aire libre. Si no está respirando, administre respiración artificial. Si la respiración es dificultosa, dar oxígeno. Busque atención médica de inmediato.

### Inhalación grave:

Evacuar a la víctima a un lugar seguro lo más pronto posible. Aflojar las ropas apretadas tales como collares, corbatas, cinturones o cintos. Si la respiración es dificultosa, administrar oxígeno. Si la víctima no respira, realizar la respiración boca a boca. ADVERTENCIA: Puede ser peligroso para la persona que proporcione auxilio boca a boca cuando el material inhalado es tóxico, infeccioso o corrosivo. Busque atención médica inmediata.

### Ingestión:

En caso de ingestión, no induzca el vómito a menos que lo indique expresamente el personal médico. No dar nada por la boca a una persona inconsciente. Aflojar las ropas apretadas tales como collares, corbatas, cinturones o cintos. Busque atención médica de inmediato.

**Ingestión Grave:** No disponible.

## Sección 5: Información sobre Incendios y Explosiones

**Inflamabilidad del producto:** No es inflamable.

**Temperatura de autoignición:** No aplicable.

**Puntos de inflamación:** No aplicable.

**Límites de inflamabilidad:** No aplicable.

**Productos de combustión:** No disponible.

**Riesgos de incendio en presencia de varias sustancias:** No aplicable.

### Riesgos de explosión en presencia de varias sustancias:

Riesgos de explosión del producto en presencia de un impacto mecánico: No disponible.

Riesgos de explosión del producto en presencia de una descarga estática: No disponible.

**Instrucciones contra incendios:** No aplicable.

**Comentarios especiales sobre riesgos de incendio:** No disponible.

**Comentarios especiales sobre riesgos de explosión:** No disponible.

## Sección 6: Medidas contra Liberación Accidental

**Derrames pequeños:** Utilice las herramientas apropiadas para colocar el sólido derramado en un recipiente adecuado de disposición de residuos.

**Derrames grandes:**

Sólidos venenosos.

Detener la fuga si no hay riesgo. No introducir agua dentro del recipiente. No toque el material derramado. Use sprays de agua para reducir los vapores. Impedir la entrada en alcantarillas, sótanos o áreas cerradas, si es necesario. Pedir ayuda para la disposición. Tener cuidado que el producto no está presente en un nivel de concentración superior al TLV. Verifique TLV en el MSDS y con las autoridades locales.

**Sección 7: Manipulación y Almacenamiento****Precauciones:**

No ingerir. No respire el polvo. Usar ropa protectora adecuada. En caso de ventilación insuficiente, use equipo de respiración adecuado. Si se ingiere, consultar inmediatamente al médico y mostrar el envase o la etiqueta. Evite el contacto con la piel y los ojos.

**Almacenamiento:** Mantener el recipiente bien cerrado. Mantenga el recipiente en lugar fresco y bien ventilado.

**Sección 8: Controles de la Exposición / Protección Personal****Controles de Ingeniería:**

Use encerramientos en los puntos de proceso, ventilación localizada u otros controles de ingeniería para mantener los niveles en el aire debajo de los límites de exposición recomendados. Si la operación genera polvo, vapores o niebla, usar ventilación para mantener la exposición a los contaminantes aerotransportados por debajo del límite de exposición.

**Protección Personal:**

Lentes de seguridad. Bata de laboratorio. Respirador para polvo. Asegúrese que utiliza un respirador certificado / aprobado o equivalente. Guantes

**Protección Personal en Caso de derrame grande:**

Lentes de seguridad. Ropa de protección completa. Respirador para polvo. Botas. Guantes. Para evitar la inhalación del producto se debe utilizar equipo de respiración autocontenido. Ropas de protección sugeridas podrían no ser suficiente; consultar a un especialista ANTES de manipular este producto.

**Límites de Exposición:**

TWA: 0.05 (mg/m<sup>3</sup>) de ACGIH (TLV) [USA] Respirable.

TWA: 0.1 (mg/m<sup>3</sup>) de OSHA (PEL) [USA] Respirable.

CEIL: 0.05 (mg/m<sup>3</sup>) de NIOSH [USA] Respirable.

TWA: 0.05 (mg/m<sup>3</sup>) [Reino Unido (UK)] Respirable.

Consultar a autoridades locales para límites aceptables de exposición.

**Sección 9: Propiedades Físicas y Químicas**

**Estado físico y apariencia:** Sólido. (Polvo sólido.)

**Olor:** Sin olor.

**Sabor:** No disponible.

**Peso Molecular:** 181.9 g/mole

**Color:** Amarillo-Naranja.

**pH (1% soln/agua):** No disponible.

**Punto de Ebullición:** 1750°C (3182°F)

**Punto de Fusión:** 690°C (1274°F)

**Temperatura Crítica:** No disponible.

# LUIS GONZALES PAREDES

Av. Bolívar 2150 Block 11 Dpto. 403 Pueblo Libre, Lima  
Teléfonos: 987 404 521 / 976 978 155 (RPM \*6917815)  
Registro del C.I.P. 49675  
Licencia de Conducir: A II B  
[luis.gonzales1201@gmail.com](mailto:luis.gonzales1201@gmail.com)



## RESUMEN

Ingeniero Metalurgista con Maestría en Minería y Medio Ambiente, estudios en Gestión de Proyectos y Gerencia Estratégica Minera, especialista en monitoreos ambientales y manejo de residuos sólidos; con conocimiento de legislación ambiental minera, programas de control ambiental y cierre de minas; experiencia en seguimiento de fiscalizaciones y auditorías ambientales. Nivel intermedio superior de inglés.

Profesional con más de 8 años de experiencia manejando programas de Gestión Ambiental en el sector minero. Actualmente ocupa el cargo de Superintendente de Medio Ambiente, Permisos Ambientales y Sociales de Gold Fields La Cima S.A.A., siendo responsable de la obtención de los permisos ambientales de la Gerencia de Proyectos de Cerro Corona, Cajamarca.

Anteriormente, laboró como Jefe de Control Ambiental del Complejo Metalúrgico de La Oroya, representando a la empresa ante autoridades y partes interesadas, coordinando con las áreas operativas y proyectos para la mejora de la performance ambiental empresarial.

## EXPERIENCIA PROFESIONAL

### **GOLD FIELDS LA CIMA S.A.A.: Noviembre 2010 a la fecha.**

#### **Cargo actual:**

- Superintendente de Medio Ambiente, Permisos Ambientales y Sociales.  
Gerencia Corporativa de Proyectos - Cerro Corona, Cajamarca.

### **DOE RUN PERU - La Oroya: Octubre 1997 a Octubre 2010.**

#### **Cargos Desempeñados:**

- Jefe de Control Ambiental del Complejo Metalúrgico de La Oroya.  
Enero 2006 a Octubre 2010.
- Ingeniero de Asuntos Ambientales y Relaciones Comunitarias.  
Noviembre 2003 – Enero 2006.
- Ingeniero de Control de Procesos Metalúrgicos Junior.  
Abril 2003 – Octubre 2003.
- Supervisor de Operaciones.  
Octubre 1997 – Abril 2003.

## **DATOS ACADÉMICOS**

### **Maestría en Minería y Medio Ambiente**

Universidad Nacional de Ingeniería  
Lima (2000 - 2001)

### **Ingeniería Metalúrgica**

Universidad Nacional de San Agustín  
Arequipa (1978 - 1984)

## **ESTUDIOS COMPLEMENTARIOS**

### **Diplomatura de Gerencia de Proyectos y Calidad**

Pontificia Universidad Católica del Perú  
Mayo 2012 a la fecha

### **Diplomado de Gerencia Estratégica en Minería**

Pontificia Universidad Católica del Perú  
Junio 2010 – Febrero 2011

### **Derecho Ambiental**

Pontificia Universidad Católica del Perú  
Julio 2009

### **Especialista en Gestión Integral de Residuos Sólidos**

Universidad Nacional Agraria La Molina  
Octubre 2008 - Mayo 2009

### **Especialista en Monitoreo y Evaluación de la Calidad Ambiental**

Universidad Nacional Agraria La Molina  
Marzo – Junio 2007

### **Especialista en Evaluación de la Contaminación Ambiental en el Perú**

Pontificia Universidad Católica del Perú  
Marzo – Julio 2005

### **Especialista en Auditoría de Sistemas Integrados de Gestión: Calidad, Ambiente y Seguridad**

Universidad Nacional Agraria La Molina  
Noviembre 2004 - Marzo 2005

### **Stage en Pirometalurgia**

Université de Liège – BELGICA  
Service de Métallurgie et Traitement des Minerais  
Octubre – Diciembre 2002

### **Inglés Intermedio – Avanzado**

Instituto Cultural Peruano Norteamericano  
Octubre 1980 – Noviembre 1982

**Computación:** MS Office profesional.

# LUIS GONZALES PAREDES

2150 Bolívar Av., Apartment 11-403, Pueblo Libre, Lima  
(51-1) 261 3643 / (51) 987 404 521  
Register N° 49675 Colegio de Ingenieros del Perú  
email: [luis.gonzales1201@gmail.com](mailto:luis.gonzales1201@gmail.com)



## **BACKGROUND**

Luis is a Metallurgical Engineer and master's candidate in Mining and Environment. He has over 8 years of experience leading environmental programs in the mining industry, including a non-ferrous smelting. His studies includes Project Management, Mining Management, Environmental Monitoring, Solid Waste Management, Environmental Regulations and Integrated Management Systems (ISO 9001 & 14001 and OHSAS 18001). He has extensive knowledge on environmental control programs, mining effluent treatment, mine closure programs and environmental audits.

Currently holds the position of Environmental and Permitting Superintendent at Gold Fields La Cima S.A.A., being responsible for obtaining environmental permits in the Project Management Office. He was previously the Head of Environmental Control Department in La Oroya Metallurgical Complex (Doe Run Peru SRL).

## **EXPERIENCE**

**GOLD FIELDS LA CIMA S.A.A.:** November 2010 - present.

### **Current position:**

- Environmental and Permitting Superintendent.  
Project Management Office - Cerro Corona, Cajamarca, Peru.

**DOE RUN PERU S.R.L. - La Oroya Division:** October 1997 to October 2010.

### **Positions held:**

- Head of Environmental Control Department in La Oroya Metallurgical Complex.  
January 2006 to October 2010
- Environmental & Community Relations Supervisor.  
November 2003 - January 2006
- Metallurgical Process Engineer.  
April 2003 - October 2003
- Metallurgical Plant Supervisor.  
October 1997 - April 2003

**EMPRESA MINERA DEL CENTRO DEL PERÚ - CENTROMIN PERÚ S. A.:** March 1993 to October 1997

### **Positions held:**

- Metallurgical Plant Supervisor.
- Member of Graduate Trainee Program (1993).

## **EDUCATION**

### **Master in Mining & Environmental**

Universidad Nacional de Ingeniería  
Lima (2000 - 2001)

### **Metallurgical Engineering**

Universidad Nacional de San Agustín  
Arequipa (1978 - 1984)

## **COMPLEMENTARY STUDIES**

### **Diploma in Project Management**

Pontificia Universidad Católica del Perú  
May 2012 - present

### **Diploma in Strategic Management for Mining Industry**

Pontificia Universidad Católica del Perú  
June 2010 - February 2011

### **Environmental Law and Regulation Course**

Pontificia Universidad Católica del Perú  
July 2009

### **Solid Waste Management Specialist**

Universidad Nacional Agraria La Molina  
October 2008 - May 2009

### **Environmental Monitoring & Evaluation Specialist**

Universidad Nacional Agraria La Molina  
March-June 2007

### **Environmental Assessment Specialist**

Pontificia Universidad Católica del Perú  
March-July 2005

### **Integrated Management Systems Auditor: Quality, Environmental and OS&H**

Universidad Nacional Agraria La Molina  
November 2004 - March 2005

### **Stage in Pyrometallurgy**

Université de Liège - Belgium  
Service de Métallurgie et Traitement des Minerais  
October-December 2002

### **English Courses: Intermediate and Advanced Level**

Peruvian North American Cultural Institute  
October 1980 - November 1982

**Computing Courses:** MS Office Professional.