TALLER REPORTABILIDAD DE PROCESOS METALURGICOS
Comisión Minera

Procesos metalúrgicos en la estimación de reservas de minerales de hierro

Luis Bernal Consultor Senior de Procesos
Process Minerals Consulting

6 de abril 2022

Contenido

1. Capítulos de Procesos en Informes NI 43-101
2. Minerales de Fe de importancia económica
3. Pruebas metalúrgicas minerales de Fe
   - Preparación de muestras
   - Análisis químicos, Mineralogía
   - Test DTT
   - Pruebas laboratorio y piloto
4. Métodos de recuperación
   - Flowsheet en estudios NI 43-101
   - 3 casos a analizar
5. Reporte de Capex-Opex versus precio de venta

Capítulos de Procesos en Informes NI 43-101

- **Procesamiento de minerales y pruebas metalúrgica**: análisis de diferentes métodos de procesamiento
- **Métodos de recuperación:** descripción del flowsheet y planta de procesos
- **Capex y Opex**: definición equipos principales de proceso y cálculo del Opex de la planta

Table of contents

1 Summary 15
1.1 Introduction 15
1.2 Property Description and Ownership 15
1.3 History 16
1.4 Geology and Mineralization 16
1.5 Mineral Processing and Metallurgical Testing 18
1.6 Mineral Resource Estimate 21
1.7 Mineral Reserve Estimate 23
1.8 Mining Methods 23
1.9 Recovery Methods 24
1.10 Project Infrastructures 25
1.11 Market Studies and Pricing 26
1.12 Environment Studies, Permitting and Social or Community Impact 26
1.13 Capital and Operating Costs 27
1.14 Economic Analysis 28
1.15 Recommendations 30
1.15.1 Geology 30
1.15.2 Mining 31
1.15.3 Metallurgy 31
1.15.4 Infrastructures 31

Capítulos de Procesos en Informes NI 43-101

- **Procesamiento de minerales y pruebas metalúrgica**:
  - Preparación muestras
  - Análisis químicos y Mineralogia
  - Test de conminución
  - Test Tubo Davis
  - Test separación magnética LIMS, MIMS
  - Test separación alta intensidad WHIMS
  - Test separación gravitacional (espirales, mesas, medio denso)
  - Test flotación directa hematita
  - Test flotación inversa magnetita/hematita
  - Modelo Fe vs SiO2
  - Especificación del concentrado final (pellets feed, pellets)
  - Modelo de recuperación RP (rec. rn peso de concentrado), RM (rec. metalúrgica de Fe) y RMM (rec. Fe magnético)

13 Mineral Processing and Metallurgical Testing 85

13.1 Metallurgical Testwork Program (2014) 85

13.1.1 Sample Description and Preparation 85

13.1.2 Chemical Analysis 87

13.1.3 Mineralogical Analysis 88

13.1.4 Grindability Testwork 96

13.1.5 Heavy Liquid Separation Test (HLS) 98

13.1.6 Davis Tube Test (DTT) 104

13.1.7 Wilfley Table Tests 109

13.2 Heavy Liquid Separation Test (2014) 110

13.3 Fe vs. SiO_2 Grade Model Development 113

13.4 Concentrate Specifications 115

13.5 Weight Recovery Model 116

Capítulos de Procesos en Informes NI 43-101

- **Método de recuperación**:
  - Benchmarking
  - Criterio de diseño
  - Diagrama de flujo
  - Descripción del proceso
  - Selección equipos principales
  - Estudios de casos base diferentes producciones
  - Análisis de riesgo/oportunidades

17 Recovery Methods 172

17.1 Similar Operations 172

17.2 Process Design Criteria 172

17.2.1 Hypotheses and Requirements 172

17.2.2 Symbols and Units 173

17.2.3 Equipment Design Guidelines 173

17.2.4 Design Criteria 174

17.3 Process Flowsheet 179

17.4 Process Description 181

17.5 Major Process Equipment Selection 183

17.6 5.5 MTPY Case Study 184

17.7 QPyrxM Processing Opportunity 185

Capítulos de Procesos en Informes NI 43-101

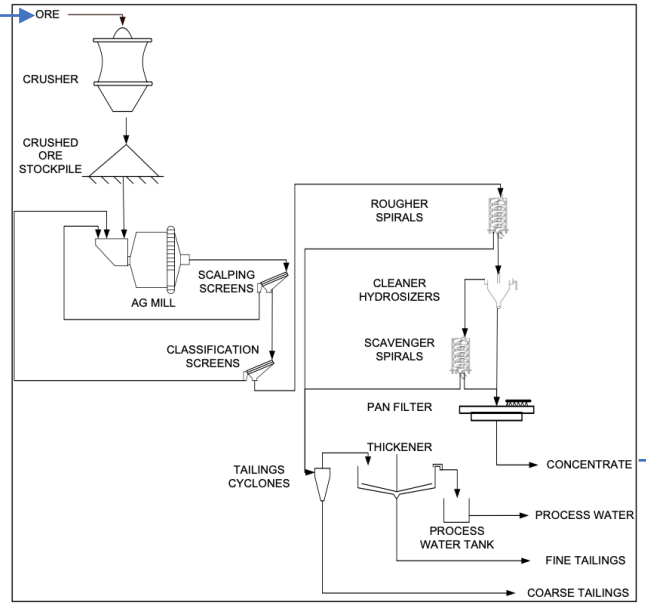
- **Calculo de Opex Concentrador:**
- Por Operación unitaria
  - Chancado
  - Molienda
  - Concentración gravitacional
  - Separación magnética
  - Flotación impurezas
  - Espesamiento/filtración concentrado
  - Espesamiento relaves
- Por ítem de gasto
  - Personal
  - Energia
  - Consumibles
  - Mantención
  - Servicios/Subcontratos
- Nota:
  - Costo se calcula en USD/t mineral procesado y luego se transforma a USD/t concentrado, cáculo que es función de la RP

    USD/t concentrado = (USD/t mineral)/ RP x 100

    En este ejemplo la RP es 36 %
  - Luego se reporta en kUSD/año

Area	Annual Cost	Unit Cost	
	$'000	$/tonne Mineralization	$/tonne Conc.
Mining	108 046	7.95	21.92
Concentrating	32 464	2.39	6.59
Tailings	8 131	0.60	1.65
General and Administration	34 714	2.55	7.04
Rail Transportation	56 379	4.15	11.43
Port Handling	30 454	2.24	6.18
TOTAL	**270 188**	**19.88**	**54.81**

13,6Mt/a mineral



4,9 Mt/a conc.

Referencia: Ni 43-101 Technical Report on the Preliminary Economic Assessment (PEA) for the Lamêlée Project, Dic. 2014

Minerales de Fe de importancia económica

El hierro es el metal pesado más extenso y más abundante en la superficie de la tierra. Por su avidez por el oxigeno generalmente se encuentra oxidado, pero se encuentra también en silicatos y súlfuros.

Minerales óxidos de Fe	**Fórmula**	**Densidad**	**Propiedades**	**Ley Fe**
Hematita	Fe_2O_3	5,27	Débil% magnética	69%
Magnetita	Fe_3O_4	5,175	Alta% Magnético	72%
Limonita (Goethita)	$Fe_2O_3 .nH_2O$	3,6-4,4	débil%-mag. arcilloso	58,7%
Siderita	$FeCO_3$	4,0	No magnético	58,3%
Taconita	$Fe_3O_4*SiO_2$	4,5	Altamente magnética	25-40%
Martita (hibrido mag-hem)	$Fe_2O_3*Fe_3O_4$	5,2	Semi-magnética	70%

Hematita

Magnetita

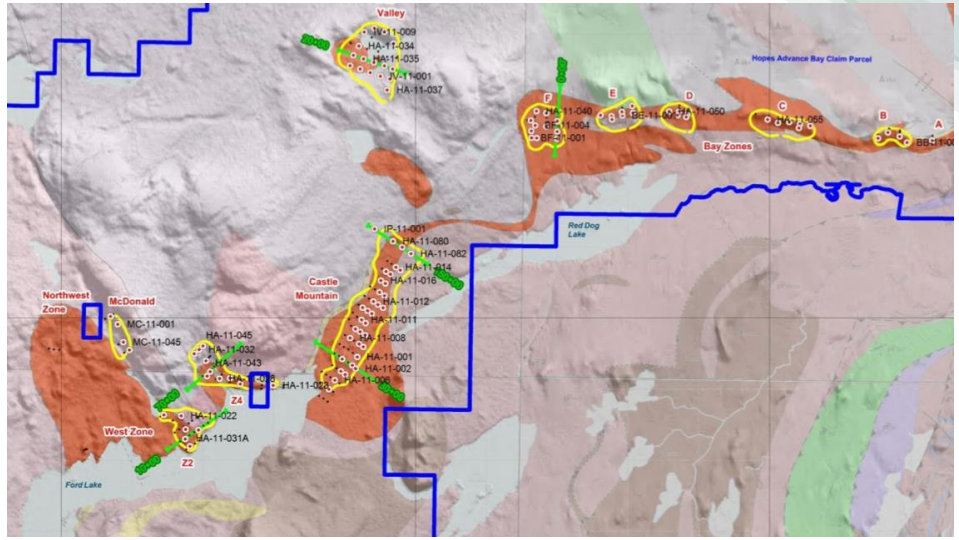
Limonita

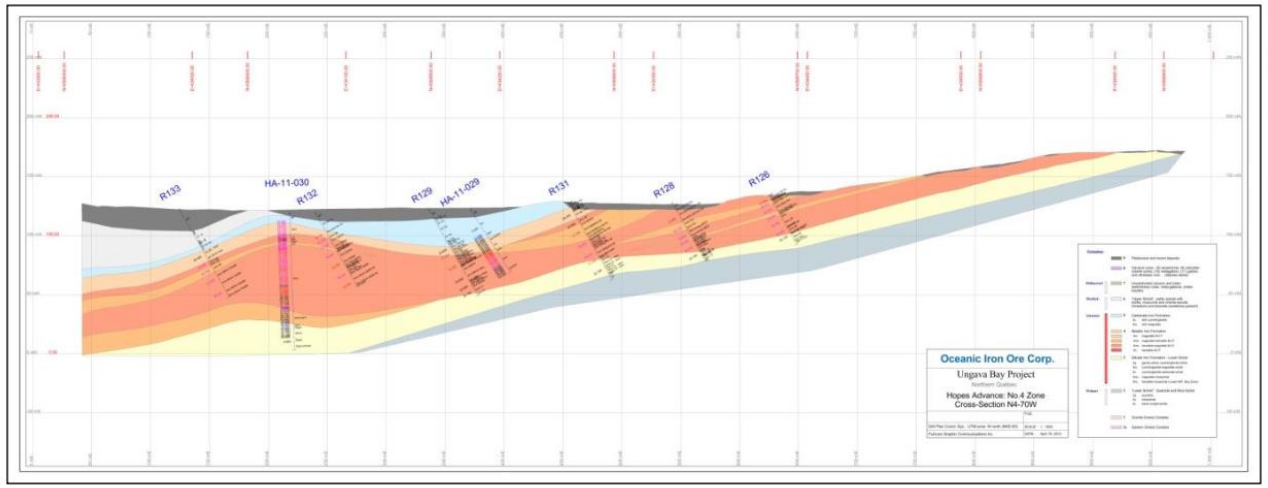
Siderita

Pruebas metalúrgicas minerales de Fe

Preparación de muestras

- Definición de zonas mineralizadas por geología
- Definición de unidades geo-metalúrgicas
- Muestras de tramos sondajes diamantinos 1,5”-2”, 15m-20m
- Muestras especiales sondajes metalúrgicos de 3,5”
- Muestras de túneles para pilotaje
- Análisis químicos completo ICP, WRA
  - AA (absorción atómica) para elementos principales
  - ICP (Inductively Coupled Plasma) para elementos trazas
  - WRA (Whole rock analysis by XRF) para compuestos: Al_2O_3, CaO, Cr_2O_3, K_2O, MgO, MnO, Na_2O, P_2O_5, Fe_2O_3, SiO_2, TiO_2, LOI
- Mineralogía
  - Microscopía óptica prioritaria inicialmente para identificación de especies
  - Qemscan o Tescan microscopia electrónica MA y PMA (Particle minerals analysis) para determinar grado de liberación,asociaciones, e impurezas





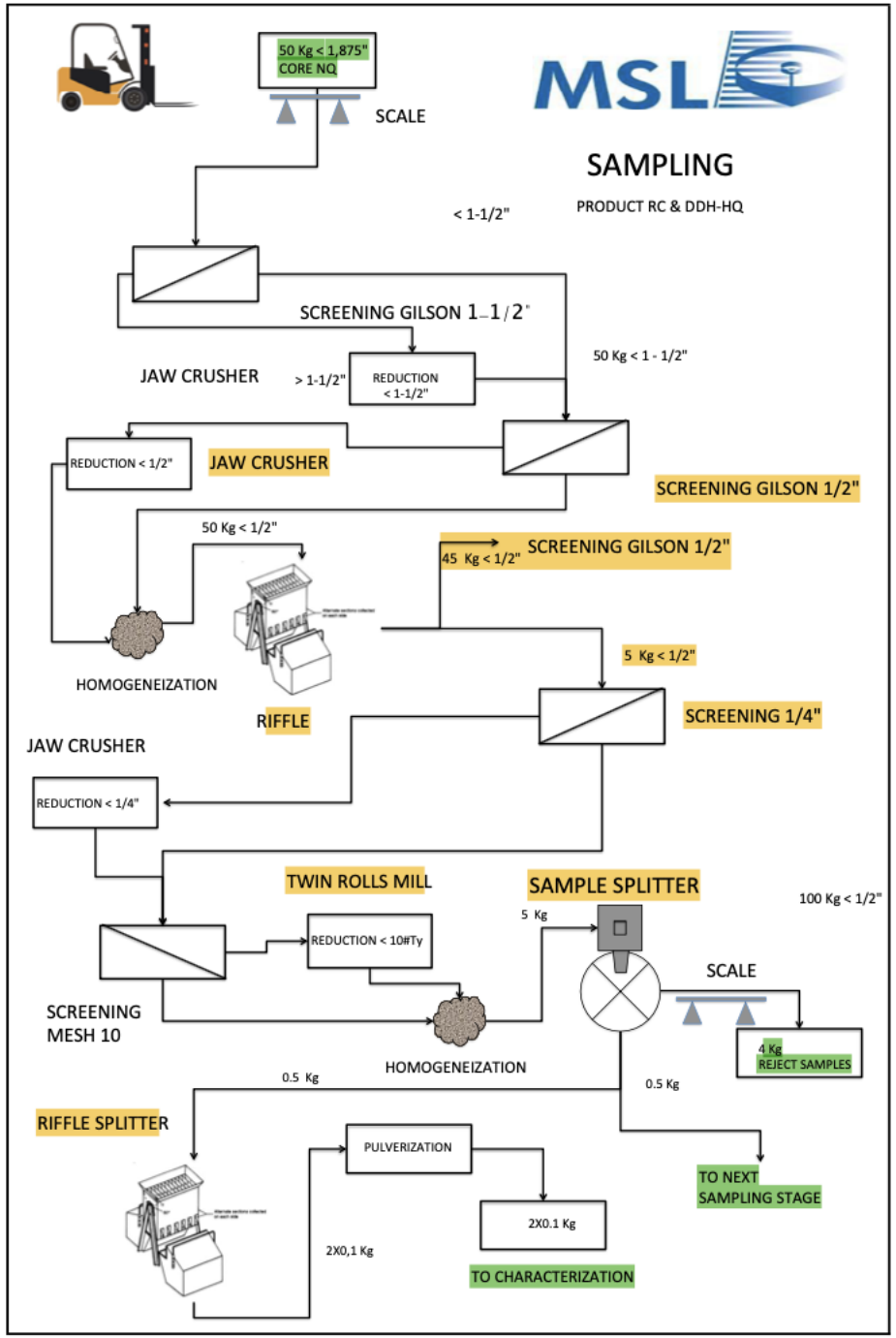
Pruebas metalúrgicas minerales de Fe

Preparación de muestras test laboratorio
Objetivo: screening de tecnología

- Utilización sondajes p.ej 15-20m de 1,5” diámetro, aprox. 50 kg
- Reducción de tamaño hasta ½”
- Homogenización y generación paquetes de 0,5 kg-4,0 kg
  - Test WI, SPI, Abrasión
  - Test LIMS, MIMS, Flotación, concentrado de espirales, deslamador
- Pulverización de sub-muestra para caracterización
  - AQ, Mineralogía, densidad
  - Test DTT (Tubo Davis)
- Muestras especiales sondajes metalúrgicos de 3,5”

Muestras para Test Planta Piloto
Objetivo: Prueba tecnología seleccionada, test de conminución SAG o HPGR

- Opción 1 compósito sondajes metalúrgicos, 1-5 ton
- Opción 2 muestras de túnel de exploración, 5 a 20 ton



Pruebas metalúrgicas minerales de Fe

Análisis químico y mineralógico TESCAN (QEMSCAN)

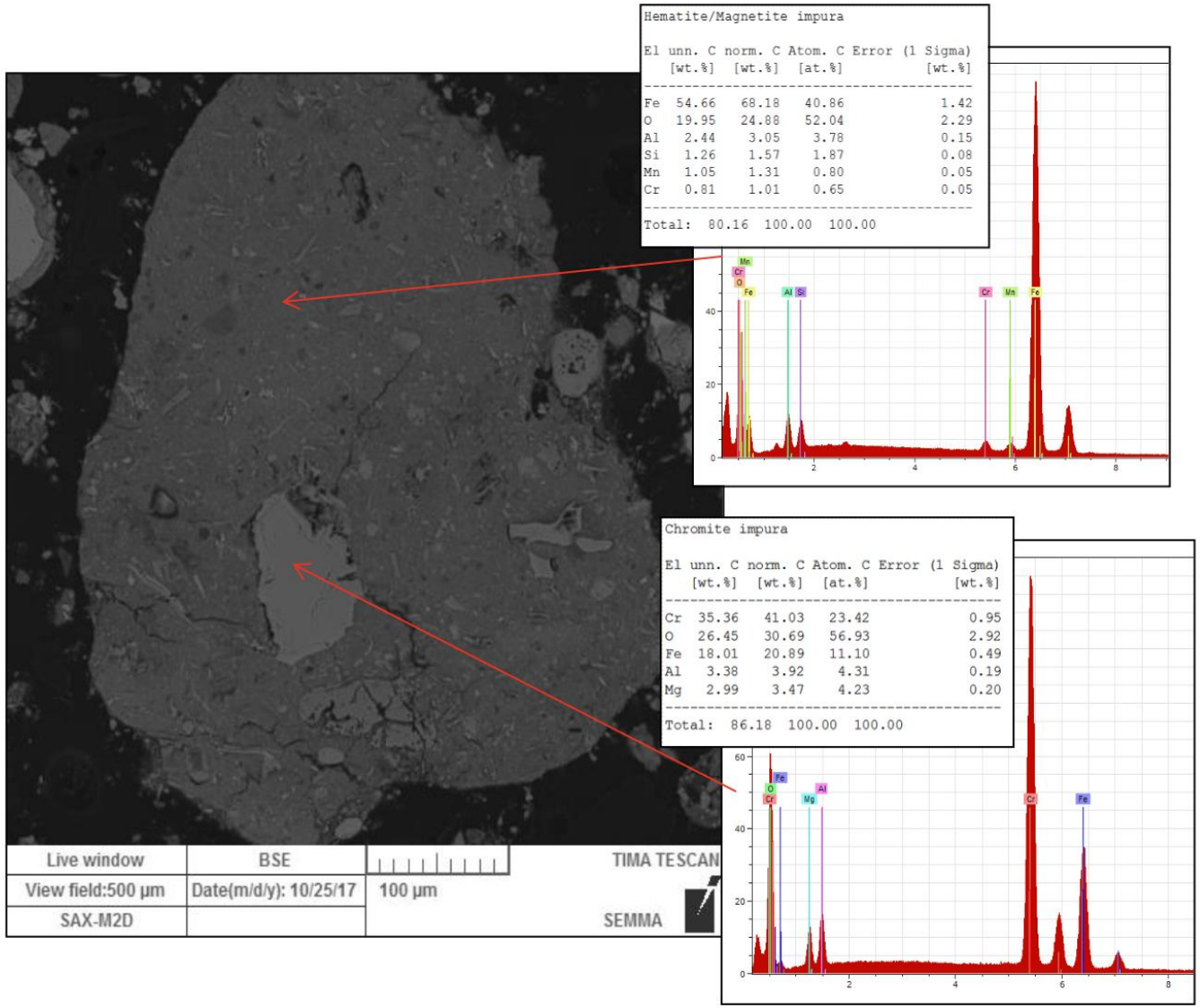
- *Relaves de Fe provenientes de proceso Ni-Co*
- *Estudio de elementos trazas en matriz de magnetita- hematita*
- *Análisis de tamaño de cuarzo (SiO2)*

A-2.- ANÁLISIS ELEMENTAL (Calculado)

Element / Mass [%]	M2
Fe	55.54
O	27.39
Si	5.94
Mg	4.48
Al	2.85
Cr	2.83
Mn	0.65
Ni	0.29
Ca	0.01
C	0.00
Ti	0.00
Na	0.00
S	0.00
Cu	0.00
K	0.00
Nb	0.00
H	0.00
Ta	0.00
Unspecified	**0.00**
Total	**100**

A-1.- MINERALOGÍA MODAL

Primary phases / Mass [%]	M2
Hematite/Magnetite impura	61.43
Hematite/Magnetite	23.429
Protoanthophyllite	7.709
Chromite impura	3.304
FeSi transition class	2.303
Majorite	0.686
Quartz	0.549
Olivine	0.381
Chromferide	0.071
Garnet - Pyrope	0.07
Calcite	0.019
Kaersutite	0.017
Augite	0.008
Chlorite - Clinochlore	0.007
Plagioclase	0.006
Albite	0.004
Ilmenite	0.002
Wollastonite	0.001
Orthoclase	0.001
Dolomite	0.001
Pyrite	0.001
Muscovite	0.001
The rest	**0.002**
Total	**100**



Test de Tubo Davis (DTT) minerales de Fe

Determinación de Fe magnético

- *No existe un análisis químico de Fe magnético*
- *Existe un análisis indirecto mediante determinación del contenido de FeO basado en: Fe3O4= FeO*Fe2o3*
- *Se utilizan varios métodos físicos como por ejemplo la balanza Satmagan*
- *Sin embargo el método mas utilizado y estandarizado es el test DTT:*
  - *Muestra molida 60% - 90%-325# (45 um), 20 gr*
  - *Se introduce en un tubo con un campo magnético exterior de 4.000 Gauss*
  - *Se ingresa un flujo de agua de lavado*
  - *Tubo se agita en forma lineal y además se rota*
  - *Se obtiene un concentrado de magnetita que se pesa y se determina la RP (conc/alim x100)*
  - *Se mide la ley de Fe total o FeDTT y las impurezas*
  - *La ley de Femag= RP x FeDTT*

- Mediante este test se determina el tamaño de molienda óptimo para el proceso de separación magnética, para obtener un producto comercial >65% Fe

Figure 13.10 – Fe Grade in Concentrate Fraction - DTT

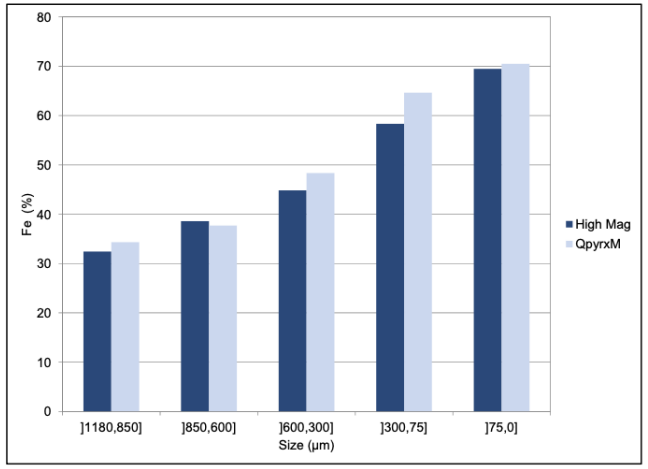
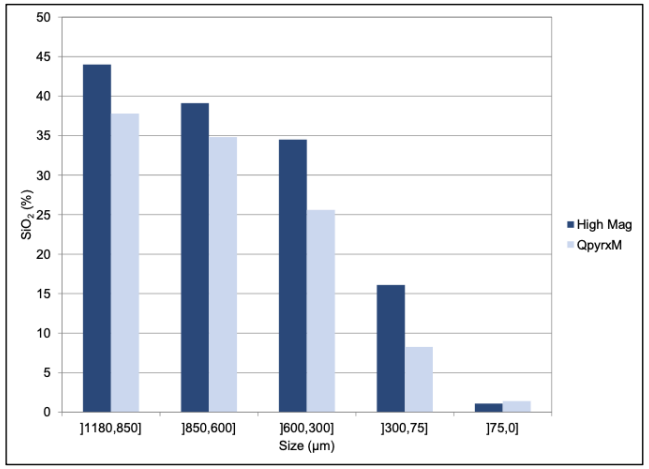


Figure 13.11 – SiO_2 Grade in Concentrate Fraction – DTT



Test separación magnética LIMS- MIMS-WHGMS de minerales de Fe

Determinación de RM y RMM de mineral de Fe

- ***LIMS (Low intesity magnetic separator):*** *separador magnético de baja intensidad 800-1.000 gauss*
- ***MIMS (Medium intesity magnetic separator):*** *separador magnético de media intensidad 800-1.000 gauss*
- ***WHIMS o WHGMS (Wet high intensity magnetic separator):*** *separador de alta intensidad 10.000-12.000 gauss*

Separador WHGMS
500mmx400mm
50-100 kg/h
Recuperación hematita y débil% magnético

Alimentación
Fet_a
$Femag_a$

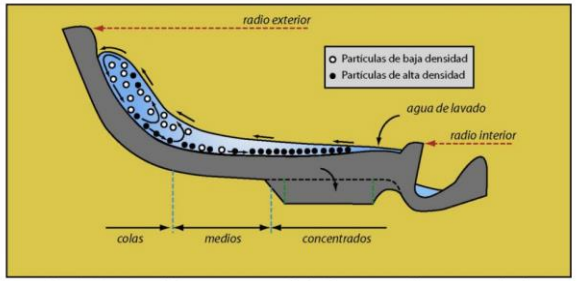
Separador LIMS/MIMS
400mmx300mm
20-60 kg/h
Recuperación magnetita y semi-magnéticos

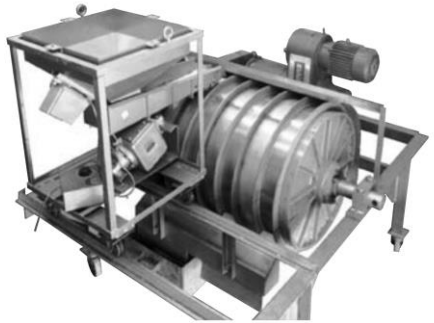
Concentrado
Fet_c
$Femag_c$

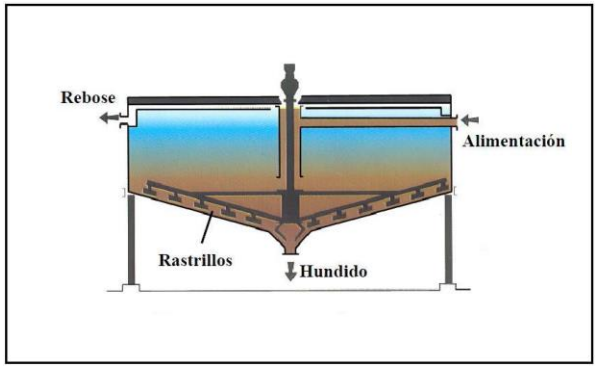
RP= peso conc./peso alim.x100
RM= $RP x Fet_c / Fet_a$
RMM= $RP x Femag_c / Femag_a$

Test LIMS en seco y separación gravitacional de minerales de Fe

- ***Separador magnético en seco:*** *separador magnético de baja intensidad 800-1.000 gauss, preconcentración de magnetita*
- ***Hidroseparador****: deslamado de magnetita*
- ***Concentrador de espiral:*** *preconcentración hematita*







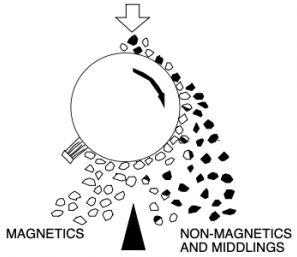
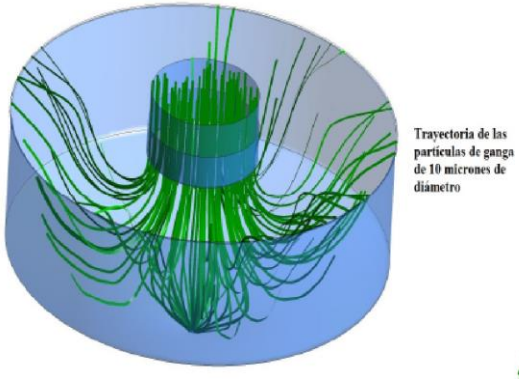


Figure 1. Operating Principle of DF Drum Separator



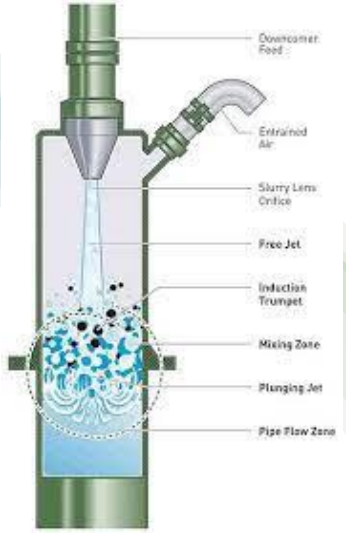
Alimentación
Fet_a

Concentrado
Fet_c

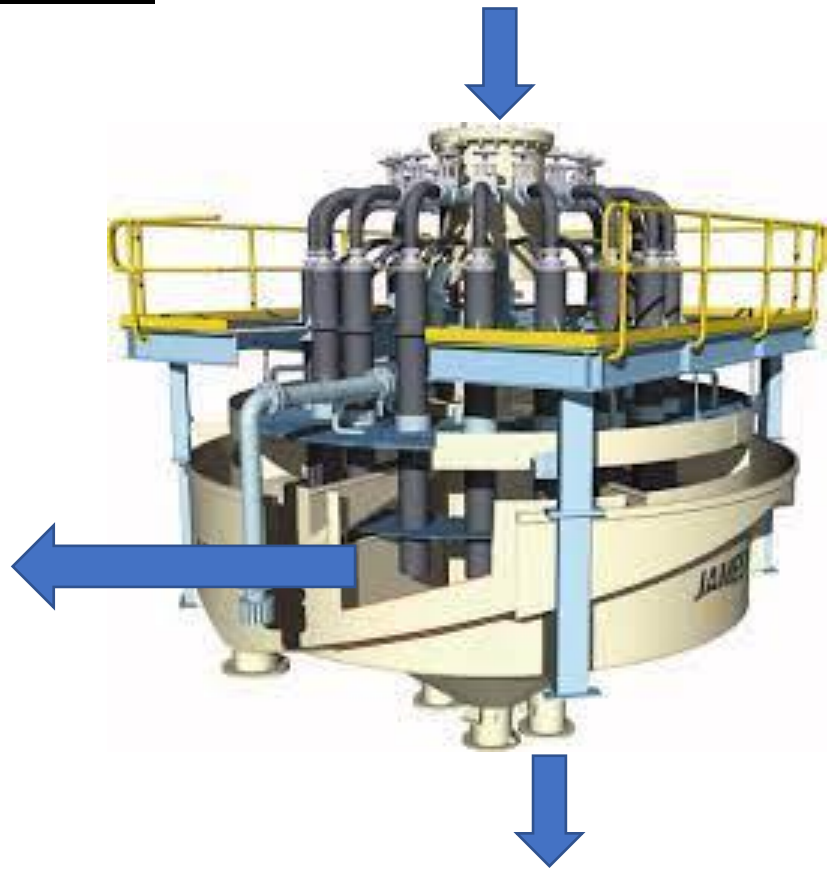
Los materiales se separan a través de la estratificación gracias a la fuerza centrífuga, el asentamiento diferencial y la migración de partículas pesadas a través del lecho y dentro de la parte interior del conducto.

Flotación inversa de minerales de Fe

- ***Concentración de minerales de hematita***
- ***Limpieza de concentrados de magnetita***
- ***Flotación celdas convencionales:*** *celdas con inyección de aire y agitación*
- ***Flotación celdas neumáticas:*** *celdas con eductor (Downcomer) de aire para generación de micro burbujas sin agitador*
- ***Reactivos de flotación:***
  - *Mono-aminas flotación SiO2*
  - *Di-aminas flotación SiO2*
  - *Acido oleico flotación fósforo (P)*
  - *Xantato flotación súlfuro (S)*
  - *Almidón, CMC depresantes de Fe*
  - *Espumante*



Alimentación
Fet_a
$Femag_a$



Concentrado de SiO2
(relave)
Fet_r

Relave
(Concentrado de Fe)
Fet_c

Flotación inversa de minerales de Fe

Planta Samarco producción >10 Mt/año

- Mineral hematita/goethita
- Molienda primaria 200 um en dos etapas
- Flotación inversa SiO2- silicatos etapa rougher en celda convencional
- Remolienda 40 um
- Etapas intermedias de deslamado
- Flotación limpieza en columna
- Espesamiento y filtrado concentrado

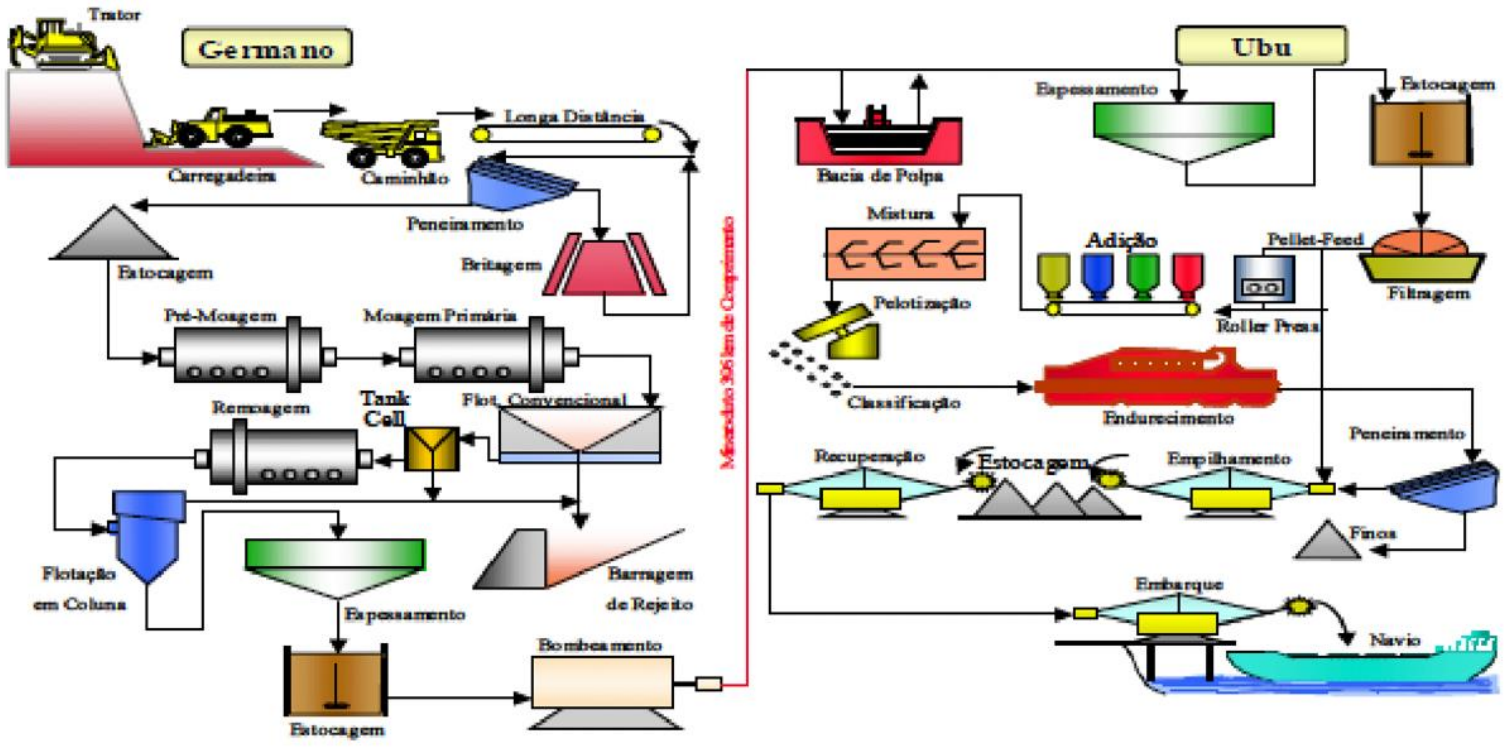
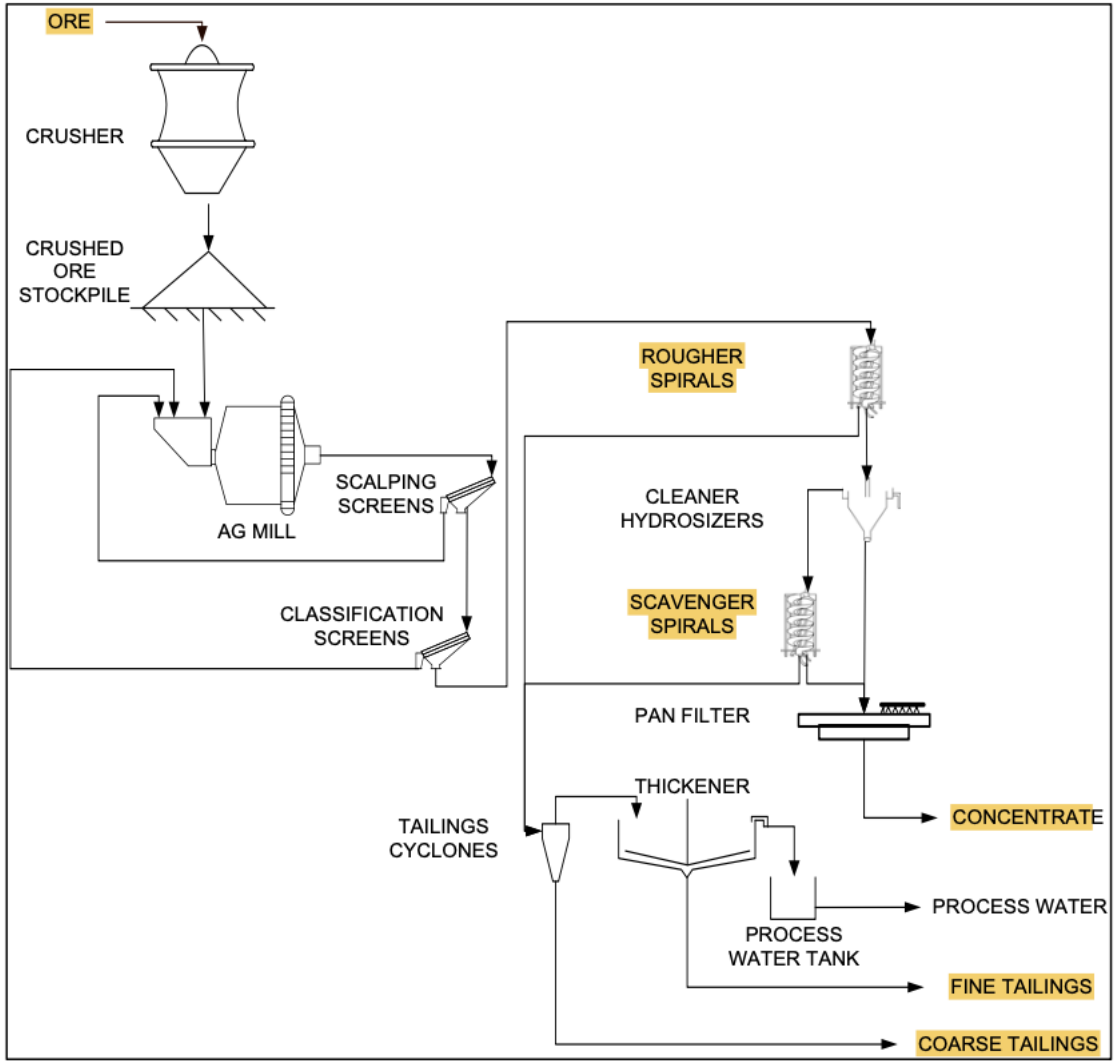


Figura 17. Fluxograma geral do processo produtivo da Samarco.

Fonte: MAPA, 2006.

Métodos de recuperación-Flowsheet para minerales de Fe

- Mineral mixto de hematita/magnetita
- Procesamiento 13,6 Mt/a mineral
- Producción 4,9 Mt/a concentrado
- Molienda 100%-850 um (20 #)
- Concentración gravitacional mediante espirales
- Producto concentrado
  - 64,3% Fe
  - 4,5% SiO2



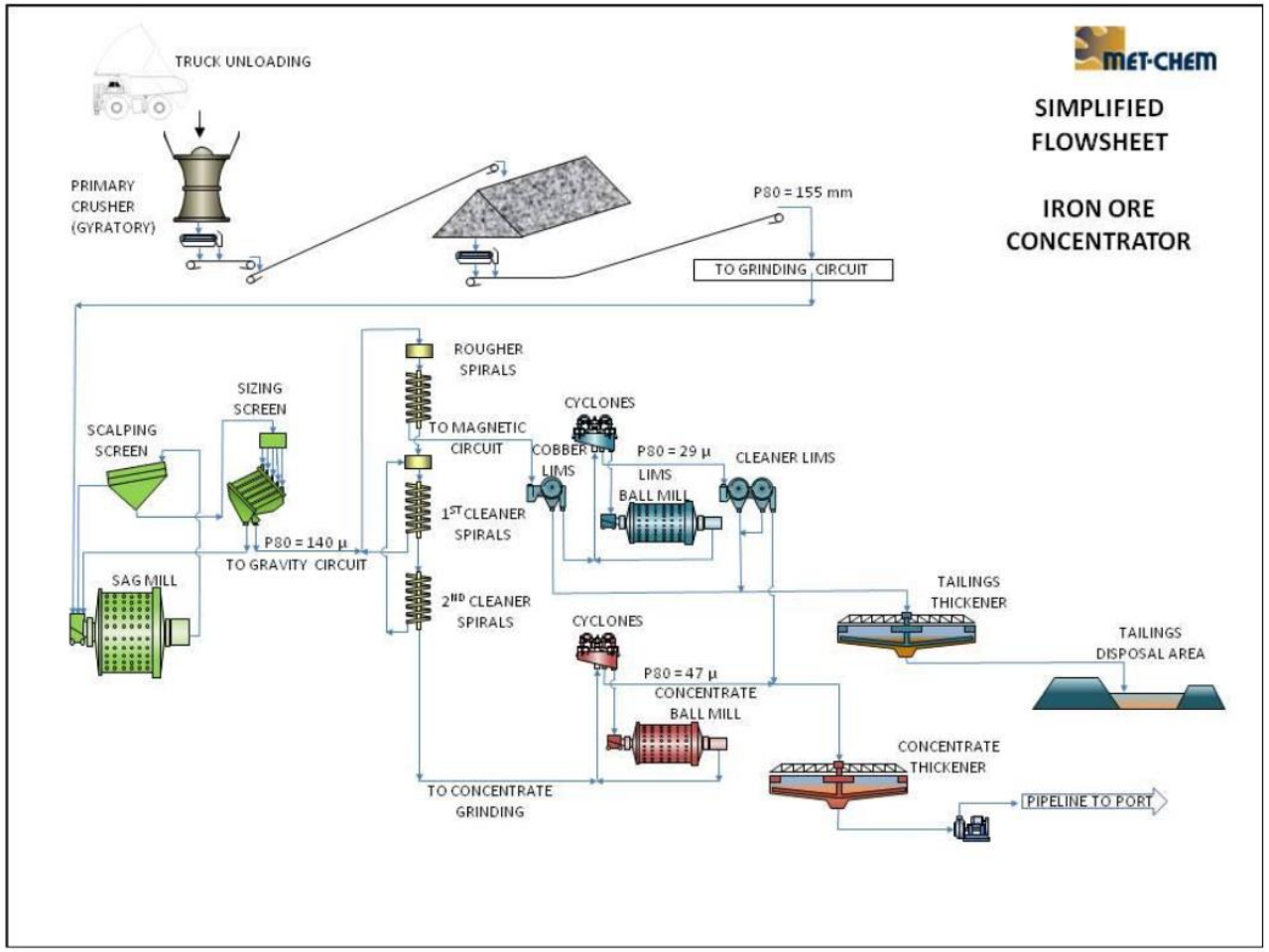
Ni 43-101 Technical Report on the Preliminary Economic Assessment (PEA) for the Lamêlée Project, Dic. 2014

Métodos de recuperación-Flowsheet para minerales de Fe

- Mineral mixto de hematita/magnetita
- Procesamiento 26,6 Mt/a mineral
- Producción 10 Mt/a concentrado
  - 8,4 Mt/a espirales
  - 1,6 Mt/a sep. magnéticos
- Molienda primaria 140 um
- Remolienda P80 47 um (325#)

- Concentración gravitacional espirales
- Concentración magnética LIMS
- Producto concentrado espirales
  - 66,6% Fe
  - 4,5% SiO2

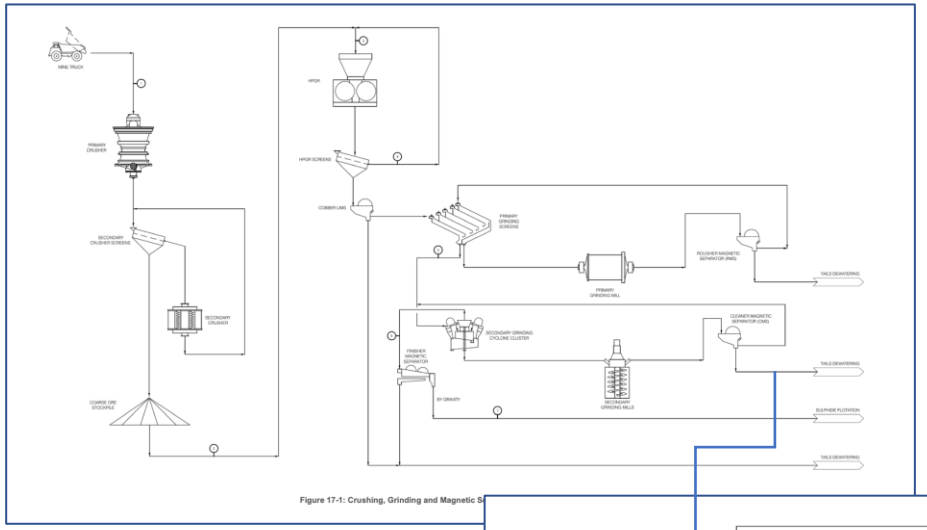
- Producto concentrado magnético
  - 68,4% Fe
  - 3,9% SiO2



OCEANIC IRON ORE CORP. NI 43-101 TECHNICAL REPORT ON A PREFEASIBILITY STUDY

Métodos de recuperación-Flowsheet para minerales de Fe

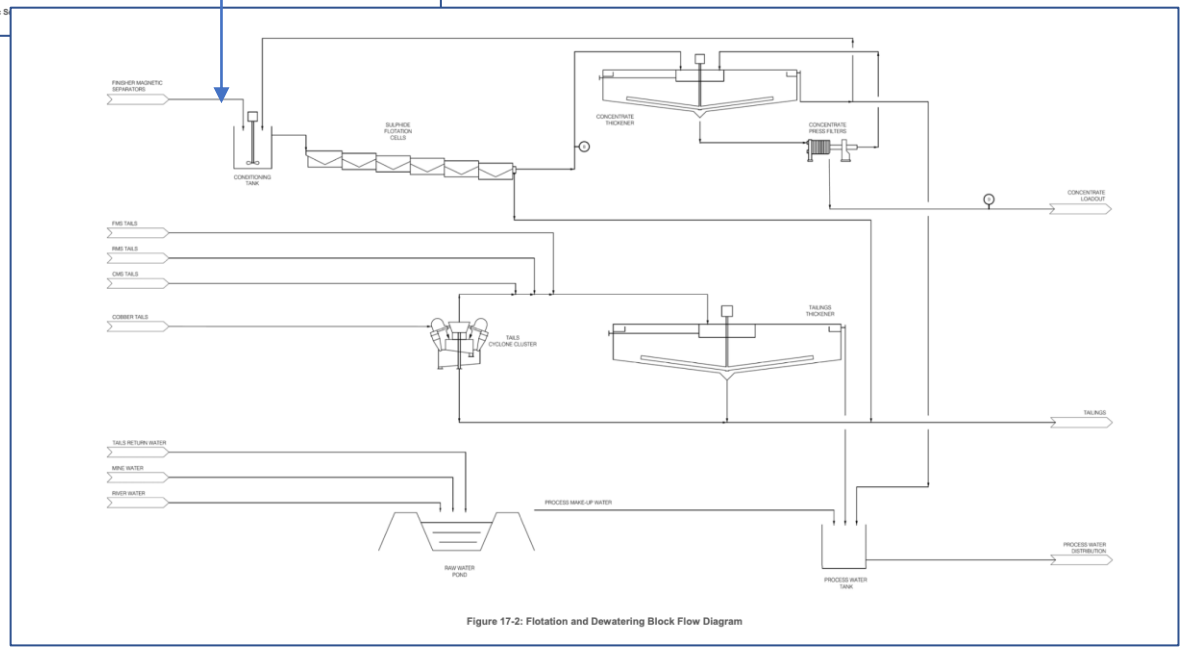
Planta separación magnética



- Mineral de magnetita
- Procesamiento 14,3 Mt/a mineral
- Producción 4,0 Mt/a concentrado
- Molienda primaria 180 um
- Remolienda P80 - 32 um (400 #)

- Concentración magnética LIMS
- Flotación inversa de azufre (S) contaminante
- Producto concentrado
  - 68,0% Fe
  - 4,5% SiO2

Planta flotación inversa de S (sulfuro)



NI-43-101 Preliminary Economic Assesment
Shymanivske Iron Ore Deposit

Reporte Capex-Opex de proyectos minerales de Fe

Proyecto	Producción Mt/año conc.	Capex total MUSD	Capex USD/tpd	Opex USD/t concentrado
1 Lamelee	4,9	817	60.800	54,8
2 Oceanic Iron	10,0	2.850	104.000	30,2
3 Shymanivke	4,0	436	40.000	31,5

Precio de los concentrados pellet feed con 68% Fe (premium)

- **Precios Platts** precio estándar o de referencia a nivel mundial para concentrado con 62% Fe
- Según estadística adjunta precio actual 161,8USD/t
- Premio VIU sobre 65% 1,5 USD/t por cada 1% 4,5
- Concentrado Premium por contrato (2-8 USD/t). 6,0

  Precio final **172,3 USD/t**

- Precio Platts a futuro para evaluación 80-90 USD/t

- Muchas gracias por su atención

- Preguntas?

Luis Bernal