

**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**EVALUACIÓN DE MEJORAS TECNOLÓGICAS EN EL PROCESO  
DE CALCINACIÓN DE MINERA LOMA DE NÍQUEL, MEDIANTE  
UN ESTUDIO DE LAS VARIABLES OPERACIONALES DE LOS  
HORNOS CALCINADORES ROTATORIOS**

**Presentado Ante la Ilustre  
Universidad Central de  
Venezuela para optar el Título  
De Ingeniero Metalúrgico  
Por el Br. Alvarez Millán, Andrés Avelino**

**CARACAS, 2003**

## ACTA

Quienes suscriben, miembros del Jurado designado por el Consejo de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales, para examinar el Trabajo Especial de Grado intitulado:

**Evaluación de mejoras tecnológicas en el proceso de calcinación de minera lomas de níquel, mediante un estudio de las variables operacionales de los hornos calcinadores rotatorios.**

presentado ante la ilustre **Universidad Central de Venezuela** por el Br. Andrés Avelino Alvarez Millán, dejan constancia lo siguiente:

Hemos leído este trabajo y participado su discusión, encontrando que el mismo es suficiente en contenido, calidad y extensión para cumplir con todos los requerimientos establecidos para optar al título de Ingeniero Metalúrgico.

En fe de lo cual se levanta la presente acta en Caracas a los \_\_\_\_\_ días del mes de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_.

\_\_\_\_\_  
Prof. \_\_\_\_\_

Tutor

\_\_\_\_\_  
Prof. \_\_\_\_\_  
Jurado

\_\_\_\_\_  
Prof. \_\_\_\_\_  
Jurado

EVALUACIÓN DE MEJORAS TECNOLÓGICAS  
EN EL PROCESO DE CALCINACIÓN DE MINERA  
LOMA DE NÍQUEL, MEDIANTE UN ESTUDIO DE  
LAS VARIABLES OPERACIONALES DE LOS  
HORNOS CALCINADORES ROTATORIOS

## INDICE

RESUMEN .....	01
INTRODUCCIÓN .....	03
MARCO TEÓRICO	
CAPITULO I. Antecedentes de la Empresa .....	08
CAPITULO II. Descripción del proceso de la planta Minera Loma de Níquel .....	17
CAPITULO III. Descripción del proceso de calcinación .....	20
CAPITULO III. Fundamentos de peletización .....	39
DESARROLLO EXPERIMENTAL	
Metodología Experimental .....	57
Procedimiento Experimental .....	58
RESULTADOS EXPERIMENTALES .....	71
CONCLUSIONES .....	95
RECOMENDACIONES .....	99
BIBLIOGRAFÍA .....	102
ANEXOS .....	103

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura N° 01.</b> Flujograma básico del proceso metalúrgico de Minera Lomas de Níquel .....	19
<b>Figura N° 02.</b> Tiempo de residencia Vs. Alimentación del horno y rotación .....	27
<b>Figura N° 03.</b> Perfil térmico del horno calcinador .....	28
<b>Figura N° 04 .</b> Esquema del área de calcinación .....	33
<b>Figura N° 05.</b> Perfil de temperatura del horno en servicio de reducción con aire terciario .....	36
<b>Figura N° 06.</b> Fuerzas que intervienen en la formación de pellas verdes .....	41
<b>Figura N° 07.</b> Influencia de la adición de agua sobre la formación de pellas verdes.....	42
<b>Figura N° 08.</b> Mecanismos alternativos de la formación de pellas .....	43
<b>Figura N° 09.</b> Perfil térmico para el quemado de pellas .....	46
<b>Figura N° 10 .</b> A-Resistencia a la compresión. B-Número de caídas Vs. % H <sub>2</sub> O .....	50
<b>Figura N° 11 .</b> Influencia de la bentonita sobre las propiedades de las pellas .....	52
<b>Figura N° 12 .</b> Efecto de la CaO(OH) <sub>2</sub> sobre la resistencia a la compresión de las pellas verdes .....	53
<b>Figura N° 13.</b> Efecto de la Ca(OH) <sub>2</sub> sobre la resistencia a la caída de las pellas verdes .....	53
<b>Figura N° 14.</b> Efecto de la Ca(OH) <sub>2</sub> sobre la resistencia a la compresión de las pellas secas .....	54
<b>Figura N° 15.</b> Esquema usado en el balance parcial de masa .....	62
<b>Figura N° 16.</b> Perfil térmico del calcinador 02. ....	67

## INDICE DE GRÁFICOS.

<b>Gráfico N° 01.</b> Porcentaje de arrastre de polvos Vs. Flujo de agua inyectado.....	72
<b>Gráfico N° 02.</b> Consumo de gas – Depresión del horno (Ventilador de tiro) Vs. Flujo de agua inyectado .....	73
<b>Gráfico N° 03.</b> Granulometría entrada del calcinador Vs. Salida del calcinador para los diferentes flujos de agua .....	75
<b>Gráfico N° 04.</b> Temperatura de los gases de salida -% apertura de la compuerta según el flujo de agua .....	76
<b>Gráfico N° 05.</b> % Aire terciario (ventilador N° 05) y pre-reducción según el flujo de agua inyectado para cada calcinador .....	76
<b>Gráfico N° 6.</b> Segregación de la alimentación de los hornos calcinadores .....	77
<b>Gráfico N° 07.</b> Análisis granulométrico del calcinador 01. Tamizaje en seco del mineral de entrada y salida del calcinador para diferentes flujos .....	78
<b>Gráfico N° 08.</b> Análisis granulométrico del calcinador 02. Tamizaje en seco del mineral de entrada y salida del calcinador para diferentes flujos. ....	79
<b>Gráfico N° 09.</b> Alimentación de los calcinadores con Trituradora de cono (abertura de 20 m.m) y trituradora de rodillo .....	80
<b>Gráfico N° 10.</b> Salida de los calcinadores con trituradora de cono (abertura de 20 m.m) y trituradora de rodillo .....	81
<b>Gráfico N° 11.</b> Propiedades de las pellas elaboradas en planta. (sin aditivos), según la temperatura inicial del choque térmico .....	82
<b>Gráfico N° 12.</b> Resistencia a la compresión de las pellas verdes en función de los aditivos químicos usados .....	84
<b>Gráfico N° 13.</b> Resistencia a la compresión de las pellas verdes (% incremento de la resistencia) Vs. Aditivos químicos usados .....	85
<b>Gráfico N° 15.</b> % Supervivencia a la caída para pellas de polvo calcinado en función del número de caída y el tipo de aditivo empleado .....	86

<b>Gráfico N° 16.</b> % Supervivencia a la caída para pellas de mineral fino en función del número de caída y el tipo de aditivo empleado .....	86
<b>Gráfico N° 17.</b> % Supervivencia a la caída para pellas de mezcla polvo calcinado-mineral fino, en función del número de caída y el tipo de aditivo empleado .....	87
<b>Gráfico N° 18.</b> %Pre-reducción y consumo de gas de los calcinadores desde el mes de diciembre de 2002 hasta marzo 2003. ....	92
<b>Gráfico N° 19.</b> Producción de mineral calcinado entre los meses de diciembre de 2002 y marzo 2003.. ....	93

## **RESUMEN**

**Alvarez M, Andrés A.**

### **EVALUACIÓN DE MEJORAS TECNOLÓGICAS EN EL PROCESO DE CALCINACIÓN DE MINERA LOMA DE NÍQUEL, MEDIANTE UN ESTUDIO DE LAS VARIABLES OPERACIONALES DE LOS HORNOS CALCINADORES ROTATORIOS**

**Tutor Académico: Prof. Carlos Di Yorio. Tutor Industrial: Ing. Santiago Garmendia. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. 2003, n° 123.**

**Palabras claves:** calcinación, pre-reducción, peletización, aditivos, granulométrico.

Minera Lomas de Níquel es una planta metalúrgica del país ubicada en las proximidades de Tiara, estado Miranda, y que tiene como objetivo la producción de ferroníquel para la exportación. La calcinación es un proceso que incluye un gran número de parámetros y variables que definen la calidad del mineral calcinado y la eficiencia del proceso.

En el presente trabajo se evaluaron algunas de las variables operacionales en el área de calcinación, en función de su comportamiento ante el uso de una serie de implementaciones tecnológicas (actuales y a futuro), las cuales son: inyección de agua a la alimentación de los calcinadores, implementación de una trituradora terciaria de cono en sustitución de una trituradora de rodillos para la alimentación, y el uso de aditivos químicos en el proceso de peletización.

Para la adición de agua a la alimentación se realizó un balance de masa, en el área de calcinación y peletización, y se determinó el porcentaje de polvos arrastrados fuera del calcinador y el flujo más óptimo de inyección de agua. En el caso del uso de la trituradora de cono se realizaron análisis granulométricos en la entrada y salida de la trituradora, y en



los calcinadores, los cuales fueron comparados con análisis correspondientes a la antigua trituradora de rodillo. En el uso de aditivos químicos en el área de peletización, se realizó una serie de pruebas para caracterizar las pellas producidas en planta y obtener sus propiedades mecánicas, tales como: resistencia al choque térmico, resistencia a la compresión y a la caída; también se utilizó una serie de aditivos químicos, como son la bentonita y la cal hidratada.

Con todas estas implementaciones se esperaba mejorar las condiciones operativas de los hornos rotatorios de calcinación y del área de peletización, específicamente alcanzar los siguientes aspectos: aumentar la producción de mineral calcinado obteniendo una mejor calidad (mayor % pre-reducción), mejorar las condiciones térmicas y de alimentación en la entrada de los calcinadores y determinar el contenido de bentonita o cal hidratada necesario para obtener un óptimo en la resistencia de las pellas verdes.

El flujo más óptimo de agua fue de 5 m<sup>3</sup>/h fue el más óptimo con un aumento en el consumo de gas del calcinador y una pre-reducción constante y un menor porcentaje de arrastre de polvos. El empleo de la trituradora de cono aumenta la productividad, mejora las condiciones de alimentación de los calcinadores y la pre-reducción del mineral calcinado. La cal hidratada permitió mejorar las propiedades mecánicas de las pellas, elaboradas con finos de la planta, tanto en verde como calcinadas.

## INTRODUCCIÓN

El control de los parámetros de un proceso industrial es una actividad muy rigurosa y que debe ser realizada con el mayor grado de precisión posible, ya que, la efectividad y la calidad del mismo dependen de que tan bien sea llevado dicho control, más aún si el proceso incluye un gran número de parámetros y variables dependientes entre sí. La calcinación es un proceso, que en el ámbito industrial, incluye un gran número de parámetros y variables que definen la calidad del mineral calcinado obtenido, así como la eficiencia de esta operación y de las demás subsecuentes.

Minera Lomas de Níquel es una planta metalúrgica del país ubicada en las proximidades de Tiara, estado Miranda, y que tiene como objetivo la producción de ferromanganeso para la exportación. La eficiencia de toda planta productora de ferromanganeso, por la vía pirometalúrgica, esta fuertemente influenciada por las actividades llevadas a cabo en la calcinación. En el caso particular de Minera Lomas de Níquel ese proceso no está controlado y definido operacionalmente a nivel óptimo.

En Minera Loma de Níquel, al no poder establecerse un control bien definido de los parámetros operacionales de esta área, se produce una pérdida de eficiencia en este proceso unitario y en los demás procesos posteriores a él. Esto trae como consecuencias negativas, una pérdida de la producción, una disminución de la calidad de mineral calcinado, el desgaste de los equipos tanto en el área de calcinación como en reducción directa (proceso posterior al calcinado) y un aumento de los peligros operacionales. Esta situación conlleva a la planta a no ser competitiva óptimamente en el mercado mundial, tanto a nivel productivo como en capacidad técnica. Actualmente se están realizando de manera continua una serie de implementaciones tecnológicas en conjunto con estudios y evaluaciones de las variables operacionales con la finalidad de aumentar la eficiencia productiva y operacional de las distintas áreas que conforman a esta planta.

El presente trabajo tiene como objetivo general evaluar una serie de implementaciones tecnológicas aplicadas en el proceso de calcinación de Minera Loma de Níquel, mediante un estudio de las variables operacionales de los hornos calcinadores rotatorios con la finalidad de mejorar la producción y calidad del mineral calcinado a menores costos de operación.

Las variables operacionales en el área de calcinación fueron estudiadas, en función de su comportamiento ante el uso de una serie de implementaciones tecnológicas (actuales y a futuro), las cuales son: inyección de agua a la alimentación de los calcinadores, implementación de una trituradora terciaria de cono en sustitución de una trituradora doble de rodillos para la alimentación, y el uso de aditivos químicos en el proceso de peletización. Las variables principales a evaluar son: el flujo y granulometría de la alimentación, el perfil térmico del horno, flujo óptimo de inyección de agua, % arrastre de polvos, grado de segregación de la carga en la alimentación y calidad del mineral calcinado en base al % de pre-reducción. Para llevar a cabo lo anteriormente expuesto, se requirió lo siguiente:

- Evaluar los parámetros actuales de operación de los hornos calcinadores.
- Establecer la influencia que tiene la inyección de agua en la entrada de los calcinadores, sobre el rendimiento térmico y operacional del proceso de calcinación y en la recuperación de finos generados en los hornos calcinadores.
- Obtener un análisis granulométrico del mineral, en la alimentación y en la salida del calcinador, con las condiciones de la trituradora terciaria actual (trituradora de rodillos) y con la implementación de una nueva trituradora (de cono) en sustitución de la trituradora actual.
- Evaluar la influencia de las variables operacionales en el consumo energético del proceso, el cual está definido por la cantidad de gas natural quemado en los hornos.

- Evaluar la resistencia de las pellas al choque térmico producido en la entrada de los hornos, para formar parte de la alimentación de los calcinadores.
- Estudiar la influencia que tiene sobre las propiedades mecánicas de las pellas verdes, el uso de aditivos químicos (bentonita o cal hidratada) durante la peletización.
- Obtener un estudio de costos del proceso, en función de la calidad del mineral calcinado (medido en base al % de pre-reducción), producción (Ton/h de mineral calcinado) y consumo energético, para las condiciones actuales de operación y con las condiciones operacionales después de introducir cada una de las modificaciones técnicas al proceso.

Todo esto fue realizado en las condiciones originales de trabajo y en las nuevas condiciones de operación, durante un período de tiempo de 2 meses para cada caso. Para la adición de agua a la alimentación se realizó un balance de masa, en el área de calcinación y peletización, esto con la finalidad de determinar el porcentaje de polvos arrastrados fuera del calcinador; también se evaluó la temperatura de gases de salida, se llevó a cabo un estudio granulométrico de la alimentación y salida de mineral del calcinador, y un seguimiento de las variables de operación de los hornos rotatorios durante el cumplimiento de las pruebas. El ensayo de inyección de agua al calcinador se realizó en ambos calcinadores y con el uso de la antigua trituradora terciaria (trituradora de rodillo) y con la nueva trituradora de cono, para obtener el flujo óptimo de inyección.

En el caso del uso de la trituradora de cono se realizaron análisis granulométricos en la entrada y salida de la trituradora, los cuales fueron comparados con análisis correspondientes a la antigua trituradora de rodillo. Se utilizaron dos tamaños de apertura en la trituradora de cono. Por último, en el uso de aditivos químicos en el área de peletización, se realizó una serie de pruebas y estudios para caracterizar las pellas producidas en planta y obtener sus propiedades mecánicas, tales como: resistencia al

choque térmico, resistencia a la compresión y a la caída; se utilizó una serie de aditivos químicos, como son la bentonita y la cal hidratada, para mejorar las propiedades mecánicas donde la elaboración de pellas y evaluación de propiedades fue llevada a cabo a nivel de laboratorio.

Con todas estas implementaciones se aspiraba mejorar las condiciones operativas de los hornos rotatorios de calcinación y del área de peletización, específicamente alcanzar los siguientes aspectos:

- Aumentar la producción de mineral calcinado obteniendo una mejor calidad (6 a 9 puntos más en pre-reducción), en base de un menor consumo energético específico lo que permite obtener un mayor rendimiento del área y facilidades de alimentación para el proceso de reducción.
- Mejorar las condiciones térmicas en la entrada de los calcinadores para obtener una menor o ninguna degradación de mineral y/o pellas por choques térmicos, lo que permitirá mejoras en la alimentación de los hornos.
- Tener un estudio de las variables del proceso, en función de un registro y lineamiento de las mismas, para determinar el comportamiento que presentan ante las diferentes implementaciones técnicas y el efecto que tiene esto en el control del proceso de calcinación de la planta.
- Determinar el contenido de bentonita o cal hidratada necesario para obtener un óptimo en la resistencia de las pellas verdes. También, conocer el efecto de la abrasión y el choque térmico sobre la degradación de las pellas y regeneración de finos en la alimentación de los calcinadores.

Finalmente, con las implementaciones técnicas ya mencionadas se aspiró mejorar la operación de los hornos calcinadores de Minera Loma de Níquel, obtener un mejor perfil térmico de mayor estabilidad según las implementaciones aplicadas, todo esto con la finalidad de tener mayor eficiencia en el proceso de calcinación de la planta; dicha eficiencia medida en función del % de pre-reducción y la producción de mineral calcinado obtenido al más bajo consumo energético posible. Además esto permitiría mejorar las condiciones de materia prima en el proceso de reducción, beneficiando los procesos unitarios subsecuentes.

## **MARCO TEÓRICO**

### **CAPITULO I. ANTECEDENTES DE LA EMPRESA**

#### **Identificación de la empresa**

Minera Loma de Níquel, C.A. filial del grupo Anglo American, es una empresa que se encarga de la explotación y procesamiento del mineral de Níquel proveniente del yacimiento Loma de Hierro, enclavado entre los municipios Guaicaipuro, del estado Miranda, y Santos Michelena, del estado Aragua.

#### **Reseña Histórica**

Desde los años 40, y durante tres décadas después, empresas mineras internacionales, realizaron exhaustivos estudios para determinar el potencial minero de Venezuela, pero entre 1975 y 1990, la actividad privada en este aspecto, se redujo notablemente debido a la instauración de un régimen impositivo con gravámenes demasiado onerosos para las explotaciones mineras.

Los cambios históricos que han sacudido al mundo a finales de la década pasada, y que llevaron a una apertura de las barreras, tanto políticas como económicas, están transfigurando a Latino América, cuya expectativa de crecimiento es de un 5% a un 8% en los años noventa, con más de 250 billones de dólares de capital extranjero en inversiones durante el decenio. La mayor parte de esta inversión se realizará dentro del sector energético y el sector minero.

Dentro de este contexto, Venezuela toma un nuevo rumbo a partir de 1990, y busca reducir su tradicional dependencia de las exportaciones petroleras, reactivando el sector minero, el cual posee inmensas perspectivas de desarrollo. Al mismo tiempo se liberaliza la economía y un nuevo reglamento que grava con un máximo de 30% las actividades

económicas, promueve las inversiones privadas en minería y otros sectores productivos y de servicios.

Esta política ha promovido el ingreso de empresas y capitales internacionales, interesados en el amplio potencial minero que ofrece el territorio venezolano, y se encuentran trabajando activamente, tales como Placer Dome, de Canadá, en Oro y Diamantes; Monarch, Inglaterra, en Oro y Diamantes; Young Group, Inglaterra, en Carbón; Shell Chemical, Holanda, en Carbón y Anglo American, Inglaterra, en Níquel.

El depósito de Loma de Níquel, situado a 80 kilómetros al sudoeste de Caracas, en los Estados Miranda y Aragua (ver Anexo 1), fue descubierto durante los años 40, y está localizado en el sector noreste del cinturón Niquelífero de Tinaquillo, el cual, además de significar el mayor depósito de níquel del país, también incluye manifestaciones de otros metales básicos y minerales industriales, de interés tanto para la exportación hacia el mercado mundial, como para el abastecimiento nacional.

Las exploraciones efectuadas en Loma de Níquel indican que este yacimiento contiene alrededor de 38,5 millones de toneladas de material con un contenido de 1,48% promedio de níquel. Los estudios fueron realizados por las empresas INCO de Canadá, Societé Le Nickel de Francia y el Gobierno Venezolano.

Más de 21.500 metros de perforaciones para determinar la riqueza del yacimiento fueron hechas durante los años sesenta, y al concluir estos estudios de factibilidad, los cálculos estimados, de manera conservadora pronosticaban la extracción de 1.700.000 toneladas de material por año, de los cuales resultaría una producción de 20.000.000 de kilogramos de níquel anuales. Estas estimaciones se esperan ampliar y mejorar sensiblemente al término de las exploraciones que se realizan actualmente para verificar la extensión del yacimiento.

Desde la adjudicación de las concesiones sobre el depósito de Loma de Níquel se han realizado intensos trabajos para obtener y evaluar muestras de más de 500 calicatas



(test pits) y de más de 2.500 metros de perforaciones efectuadas con taladros tipo auger (taladro en tirabuzón) y con bocas de diamante, confirman los estudios anteriores en más de un 90%.

En los depósitos de lateritas, usualmente del 40% al 60% de los costos operativos, corresponde al costo de la energía necesaria para la extracción del níquel, mediante la reducción, fundición y refinación de la materia prima mineral, obteniéndose como producto final una aleación de ferroníquel. Esta participación tan alta de la energía en los costos de producción, se convierte en una ventaja competitiva muy importante para el proyecto de Loma de Níquel, si se toma en cuenta el costo de esta energía en nuestro país, en comparación con otras áreas productoras de níquel a nivel mundial.

Al mismo tiempo, la explotación de Loma de Níquel se ve favorecida por su excelente localización, muy cercana a la infraestructura necesaria para su desarrollo, que sumada a estas facilidades energéticas que ofrece Venezuela, convierten la operación en un proyecto productor de níquel muy rentable.

En efecto, el yacimiento se encuentra a 8 kilómetros de una línea eléctrica de alta tensión, por el Sur, y un gasoducto cercano por el Norte. El agua necesaria se obtiene de los ríos locales, mediante obras hidráulicas especializadas, construidas en las inmediaciones del yacimiento.

Las áreas donde se localizan las lateritas de níquel, son naturalmente sin forestación, y se cubren sólo de gramíneas, debido a que la concentración mineral en la zona no permite el crecimiento de vegetación boscosa. Aún así, para la explotación de Loma de Níquel, se trabaja en un programa de conservación ecológica, respetando y cuidando las áreas de bosques que se encuentran dentro de la concesión, y que contempla un adecuado control de desechos, para asegurar de este modo la no - contaminación del ambiente.

Loma de Níquel está situada apenas a 20 kilómetros de la Autopista principal que une Caracas con Valencia, la cual transita el cinturón industrial venezolano, y el

proyectado ferrocarril de los Valles del Tuy. Por autopista, queda a 150 kilómetros de Puerto Cabello, uno de los puertos más importantes del país, así como a 100 kilómetros del puerto de La Guaira, el principal de Venezuela, lo cual facilita enormemente el transporte del producto hacia los mercados internacionales (ver anexo 2).

La producción de Loma de Níquel, estimada en 18 mil toneladas al año de ferroníquel equivaldría de un 2,5% a un 3% del aporte mundial de este valioso metal de aleación siderúrgica, fundamentalmente dirigido a la producción de una amplia gama de aceros inoxidables.

En el año 1970, el Ministerio de Minas e Hidrocarburos asumió los derechos sobre el yacimiento y mediante decreto, declaró afectado un polígono de aproximadamente 7.000 hectáreas por el desarrollo del Yacimiento Niquelífero Loma de Hierro. En diciembre de 1992, el Ministerio de Energía y Minas concede a la empresa Cofeminas, C.A. los derechos para la explotación del yacimiento.

El estudio de factibilidad fue financiado y gerenciado por el grupo Anglo American importante grupo internacional compuesto por los siguientes subgrupos: Anglo Gold, Anglo Platinum, Anglo Coal, Anglo Base Metals, Anglo Industrial Materials, Anglo Ferrous Metals, Anglo Forest products y De Beers, y desarrollado por Tecnoconsult, empresa venezolana de Ingeniería de Consulta.

Con la incorporación de Cofeminas, C.A. al grupo Anglo American, en 1996, cambia su razón social por la de Minera Loma de Níquel, C.A., empresa operativa responsable de desarrollar el proyecto. El grupo Anglo American ha acumulado significativa experiencia en la explotación minera de níquel desde 1962, a través del desarrollo de las minas Morro de Níquel y Codemin, ambas en Brasil.

De acuerdo con el plan minero, el yacimiento será explotado a cielo abierto, mediante la construcción de terrazas con una altura de 5 m entre ellas y un ángulo máximo de taludes de 34 grados.

El programa de explotación, apilamiento y manejo de mineral está diseñado para una producción máxima de 1,2 millones de toneladas secas al año, durante cerca de 30 años, con un porcentaje de níquel que variará entre el 1,78% y el 1,0%, con un promedio de 1,48%.

De esta manera, el grupo Anglo American y Minera Loma de Níquel, C.A. asume su compromiso con el progreso de Venezuela, siempre en la búsqueda de nuevos horizontes en la especialidad minera, con el respaldo de la más moderna tecnología y de un personal compenetrado con los objetivos de superación que ese reto impulsa, y con la convicción de su calidad para la competencia en el concierto mundial.

## **Visión de la Empresa**

La empresa Loma de Níquel tiene como visión ser reconocida mundialmente como una gran empresa, por sus niveles internacionales de productividad y rentabilidad en la producción de níquel.

## **Misión de la Empresa**

Loma de Níquel es una es una empresa competitiva, dedicada a la producción y mercadeo de níquel, a costos competitivos, mediante:

- La inversión en mejoras tecnológicas.
- El respeto por nuestra gente, el medio ambiente y la comunidad.
- El compromiso con la mejora continua.

## **Objetivo General de la Empresa**

El grupo Anglo American y Minera Loma de Níquel, C.A. asume su compromiso con el progreso de Venezuela, siempre en la búsqueda de nuevos horizontes en la especialidad minera, con el respaldo de la más moderna tecnología y de un personal compenetrado con los objetivos de superación que ese reto impulsa, y con la convicción de su calidad para la competencia en el concierto mundial.

## **Objetivos Específicos de la Empresa**

- Preservar el entorno físico en el cual se realizan las operaciones de explotación, dando el respectivo respecto que se merece la comunidad y mantener el sentido ecológico.
- Orientar las acciones de manera proactiva, con profesionalismo y carácter innovador hacia los adelantos tecnológicos y gerenciales.

- Enfocar la labor a la obtención de los mejores resultados, elevando continuamente los niveles de desempeño individual y grupal a fin de mantener plenamente satisfechos a clientes internos, externos y accionistas.
- Interactuar con clientes internos y externos, proveedores, comunidad y accionistas por la transparencia y el cumplimiento de los acuerdos y compromisos.
- Brindar a su personal el ambiente de reconocimiento, apoyo, formación e igualdad de oportunidades que favorezcan su desarrollo profesional, así como las condiciones de trabajo que aseguren la integridad personal de cada uno de los empleados.
- Orientar la colaboración, participación apertura y búsqueda de los mejores resultados, mediante el estímulo al aporte creativo de cada empleado, dentro de un ambiente de cooperación y comunicación entre las diferentes áreas de la organización.

### **Valores de la empresa**

#### ***Trabajo en Equipo:***

- Cooperación interpersonal e interdepartamental.
- Comunidad estrecha y clara, vertical y horizontal
- Estimulo al aporte de sugerencias e ideas nuevas

#### ***Conservación del Medio Ambiente y Respeto por la Comunidad:***

- Establecer y divulgar políticas de conservación de medio ambiente.
- Fomentar procesos que reduzcan la emisión de desperdicios y contaminantes.
- Mantener organizado el sitio de trabajo.
- Respetar las costumbres de las comunidades vecinas

### ***Respeto por el Individuo:***

- Respetar las diferencias raciales, culturales y religiosas.
- Propiciar retribuciones salariales competitivas acorde al mercado.
- Reflejar objetividad y equidad en la evaluación de desempeño de cada individuo, reconociendo los méritos personales.
- Mantener en todo momento un trato digno con colegas y colaboradores.
- Propiciar condiciones de trabajo que preserven la calidad de vida laboral.
- Utilizar implementos de seguridad industrial según lo establecido por las normas.

### ***Honestidad:***

- Cumplir con compromisos y acuerdos externos e internos
- Mantener la confiabilidad respecto a la información interna de la organización.
- Cumplir con todas las normas y procedimientos establecidos.
- Respetar el ordenamiento legal del país en todas las decisiones.

### ***Desarrollo Continuo:***

- Promover conductas proactivas.
- Mantenerse actualizado en los cambios tecnológicos y gerenciales.
- Ser flexibles ante la necesidad de los cambios internos y externos.
- Tomar decisiones basadas en criterios técnicos.
- Utilizar óptimamente los recursos disponibles.

### ***Excelencia:***

- Caracterizar la conducta cotidiana del trabajo por la búsqueda de agregación de valor en todas las tareas y actividades.
- Utilizar de manera racional los equipos y recursos asignados.

- Esmerarse por superar las metas asignadas.

***Control de Impacto Ambiental:***

- Minera Loma de Níquel esta enmarcada en una filosofía de desarrollo sustentable y de mínimo impacto ecológico de las reservas minerales. Se tiene previsto todo un plan de reforestación y restauración de las áreas afectadas. Todas las emisiones de gases, líquidos y polvos son tratados y minimizados a rangos inferiores a las regulaciones ambientales vigentes. Las aguas de escorrentías y cuerpos de aguas aledaños son monitoreados para el control de la calidad de los mismos. Las áreas para depósitos de escorias y otros desechos sólidos están confinadas y manejadas con criterio de mínimo impacto ambiental.

## **CAPITULO II. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE LA PLANTA MINERA LOMA DE NIQUEL**

### **Extracción del Mineral de la Mina**

El yacimiento consiste de una mina a cielo abierto ubicada en la parte superior de la planta procesadora a 4.5 km aproximadamente, la cual es explotada usando el método de excavaciones por terrazas, de 5 metros de altura y pendientes de 34 grados. La excavación se realiza por medio de palas excavadoras, luego el mineral es extraído y cargado en camiones para el transporte del mineral a la primera de fase del proceso o preparación de mineral.

### **Preparación de Mineral**

El mineral es separado en una criba fija; la fracción mayor a 250 mm es reducida a menos de 250 mm por una trituradora de mandíbulas. Esta fracción se une con la pasante de la criba y es enviada por correas transportadoras a una trituradora de rodillos, donde es reducido hasta alcanzar un tamaño máximo de 60 mm. Se utiliza un apilador automático, para la preparación de dos pilas (90.540 TMS cada una), siguiendo el método de homogenización tipo Windrow<sup>1</sup>.

Un recuperador de cangilones automático, recoge de forma continua el mineral para llenar un silo de 25 toneladas que sirve de fuente de alimentación al horno secador. Una vez secado el mineral (humedad de salida de 21 %), este pasa a una última etapa de reducción de tamaño máximo de 15 mm en una trituradora de rodillos doble (actualmente se emplea una de cono), para luego ser almacenado en una pila cubierta de 12.000 toneladas métricas secas (TMS).

---

<sup>1</sup> Windrow es un sistema de apilamiento y homogenización de mineral que consiste en un pila de sección transversal triangular formada por quince pequeñas pilas, lo que permite una composición homogénea del almacenado.



### **Calcinación del Mineral**

El mineral, proveniente de pila seca, pasa por un proceso de calcinación con la finalidad de eliminar la humedad restante y el agua absorbida químicamente, además de reducirlo químicamente (pre-reducción<sup>2</sup>). Se utiliza carbón como agente reductor. Esto se realiza en dos hornos rotativos, uno para cada línea, a una temperatura de 800 °C.

El mineral fino recolectado en las estaciones de desempolvado de planta (electrofiltros), es enviado a la planta de peletización, donde se aglomera con agua, sin aditivos químicos y una porción de mineral fino del área de secado, para su reciclaje a la alimentación de los calcinadores en forma de pellas.

### **Reducción - Fusión**

El mineral pre-reducido y calcinado es introducido en el horno de fusión reductora, donde la generación de un arco eléctrico sobre la carga de mineral genera el calor para su fusión a aproximadamente 1650 °C. En el proceso, se crean dos fases: una de menor densidad llamada escoria, y otra más pesada llamada fase metálica, la cual contiene una proporción importante de Ni y Fe.

La escoria, representa aproximadamente el 70% de la carga, y la misma es granulada durante su colada por una corriente de agua. La fase metálica, es colada cada cuatro horas en cucharas para su posterior refinación<sup>3</sup>.

### **Refinación**

Después de que el metal es colado del horno de reducción en la cuchara precalentada, se inicia la inyección de oxígeno y cal en forma controlada para la eliminación del carbono y del fósforo. El fósforo eliminado pasa a ser parte de la escoria y el carbono se elimina en forma de dióxido de carbono.

---

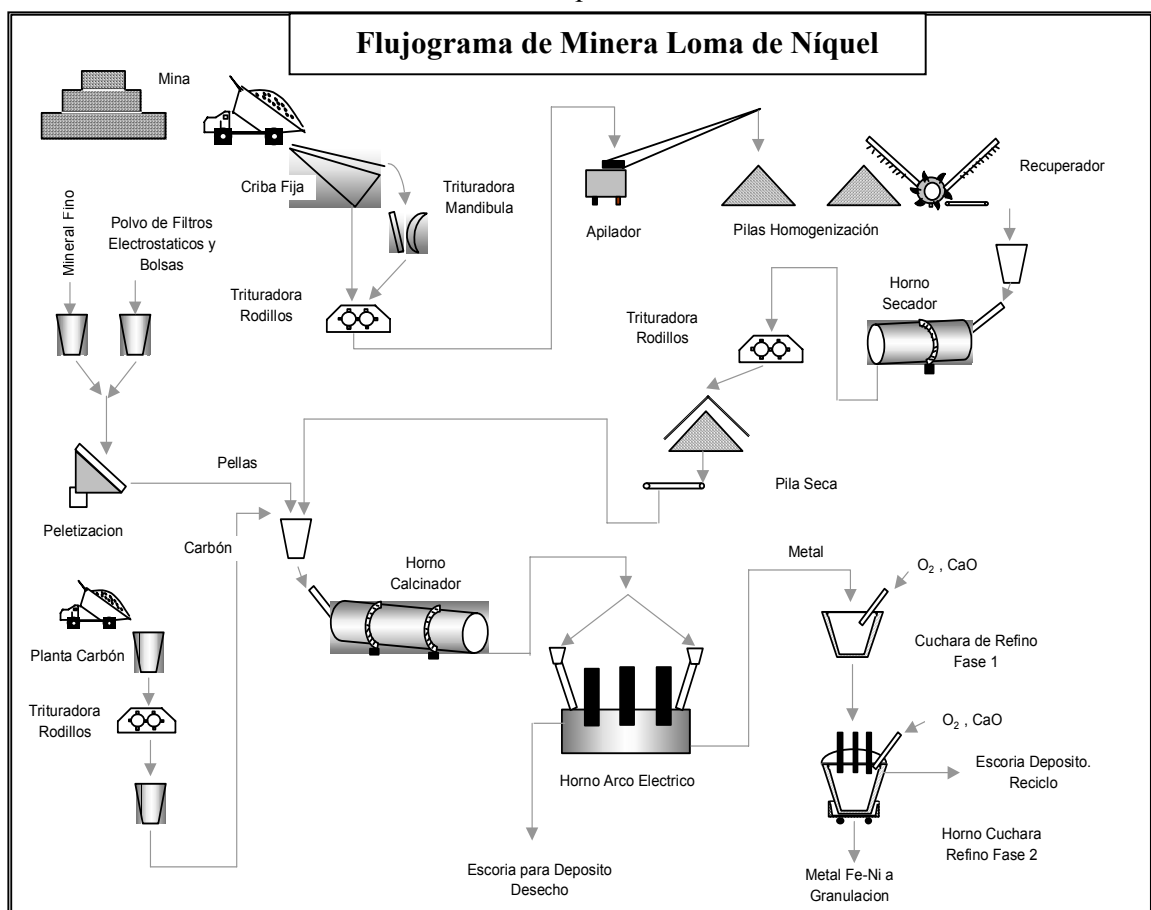
<sup>2</sup> Pre-reducción: proceso de reducción química del mineral que consiste en el paso de un óxido a otro de menor grado de oxidación. En el caso de mineral de níquel es el paso a NiO<sub>2</sub> a NiO y de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a FeO.

<sup>3</sup> Refinación es la eliminación de impurezas como Azufre, Fósforo, Carbono y Silicio según los requerimientos del cliente.

Posteriormente la cuchara es integrada a un sistema de electrodos, en donde es desoxidado el metal, con la adición de aluminio a una temperatura de 1600 °C. Con la inyección de una mezcla de ferrosilicio, cal y nitrógeno, se elimina el contenido de azufre, el cual pasara a la escoria. La escoria es retirada de la superficie del metal refinado antes de la colada final.

La ferro-aleación obtenida (FeNi) es granulada en un tanque especial (tanque de granulación), secada, clasificada por tamaño y almacenada para su posterior expedición a los clientes.

**Figura N° 01 .** Flujograma básico del proceso metalúrgico de Minera Lomas de Níquel.



### **CAPITULO III. DESCRIPCION DEL PROCESO DE CALCINACION**

Marcador no definido.

#### **1.- Sistema de Alimentación:**

La carga alimentada en los hornos de calcinación está compuesta por mineral, pellas y carbón mineral. El mineral proviene de la pila de mineral seco, desciende por gravedad a través de 4 tolvas (382-1381-03 al 06)<sup>1</sup> ubicadas debajo de la pila, las que a su vez desembocan en cuatro alimentadores de frecuencia variable (382-1326-01 al 04)<sup>1</sup>. Los alimentadores 01 y 02 agregan el mineral en la cinta transportadora 382-1311-02 que en operación normal conduce la carga al Calcinador N° 1, mientras que los alimentadores 03 y 04 agregan el mineral sobre la cinta transportadora 382-1311-03 que conduce la carga al Calcinador N° 2. Sobre estas cintas transportadoras también se agregan las pellas producidas en la Planta de Peletización (Área 490) a través de las cintas transportadoras 490-1311-06 y 07 respectivamente.

El Carbón Mineral de la Planta de Carbón (Área 550) también es agregado sobre estas cintas mediante dos alimentadores de frecuencia variable (550-1326-01 y 02), cada uno de los cuales suministra carbón a cada calcinador.

Una vez que la carga abandona las cintas transportadoras 382-1311-02 y 03 pasa a través de unos diverter (desviadores de flujo de abertura variable), cada uno de estos diverter se encuentra al final de las cintas transportadoras antes mencionadas. El flujo normal de operación agrega la carga directamente al ducto de alimentación de los calcinadores, sin embargo, de estar activado uno de los diverter, estos permiten la desviación total o parcial de la carga proveniente de una de las cintas transportadoras hacia la cinta transportadora de giro reversible 382-1311-06, la cual a su vez agrega la carga desviada al ducto de alimentación del otro calcinador. En tal sentido, con la activación de uno de los diverter y la cinta transportadora reversible se puede desviar total o parcialmente

---

<sup>1</sup> Ver los códigos y su descripción en el anexo # 03.

la carga de alimentación de uno de los calcinadores al otro. Esto permite tener cierta flexibilidad en cuanto al mantenimiento de las cintas transportadoras y alimentadores de una u otra línea sin parar la producción de mineral calcinado.

## 2.- Hornos calcinadores

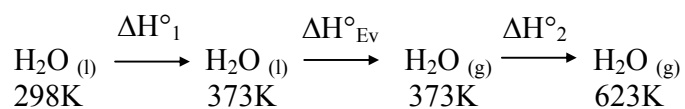
Los hornos calcinadores son hornos cilíndricos rotatorios donde se llevan a cabo las reacciones anteriormente descritas. Minera Loma de Níquel cuenta con dos líneas de producción, es decir, con dos hornos calcinadores de una longitud de 120 metros, un diámetro de 5 metros y una inclinación de 3 grados. Ambos calcinadores funcionan en contracorriente, la carga alimentada avanza en dirección descendente (producto de la rotación e inclinación del horno), mientras que los gases producidos por la combustión lo hacen en sentido contrario.

El tiempo de residencia<sup>1</sup> de la carga dentro del horno depende de la velocidad de rotación del mismo, sin embargo, en condiciones normales de operación, ésta debe mantenerse estable a 0,8 rpm logrando un tiempo de residencia de aproximadamente 4 horas. Este tiempo es suficiente para lograr un calentamiento homogéneo y constante garantizando la calidad del calcinado producido y evitando choques térmicos que alteren las características físicas del mineral, como por ejemplo, la fractura de las partículas del mismo por la liberación brusca del agua de constitución.

## 3.- Reacciones que ocurren en el calcinador

### 3.1. Secado:

Eliminación de la humedad o agua físicamente combinada. Esto se produce a temperaturas mayores a los 120° C, y debido a las altas temperaturas y tiempo de residencia a las que el mineral está expuesto esta eliminación se lleva a cabo en un 100%.



<sup>1</sup> Tiempo de permanencia de la carga del mineral dentro del calcinador.

$$\Delta H^{\circ}_1 = C_p \Delta T = 1 \text{ Kcal/Kgr}^{\circ}\text{K} (373 - 298)^{\circ}\text{K} = 75 \text{ Kcal/Kgr}$$

$$\Delta H^{\circ}_{\text{Ev}} = 11.2 \text{ Kcal/mol} / 18 \text{ gr/mol} = 622.22 \text{ Kcal/Kgr}$$

$$\Delta H^{\circ}_2 = C_p \Delta T = 1 \text{ Kcal/Kgr}^{\circ}\text{K} (623 - 373)^{\circ}\text{K} = 250 \text{ Kcal/Kgr}$$

$$\Delta H^{\circ}_{\text{Tot}} = \Delta H^{\circ}_1 + \Delta H^{\circ}_{\text{Ev}} + \Delta H^{\circ}_2$$

$$\Delta H^{\circ}_{\text{Tot}} = 325.62 \text{ Kcal/Kgr}$$

### 3.2. Deshidratación:

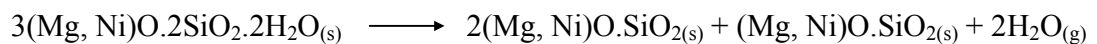
Eliminación del agua químicamente combinada con la molécula de mineral. Esta reacción no se lleva a cabo en su totalidad, sin embargo, el proceso debe garantizar pérdidas de agua hasta alcanzar valores por debajo del 0,5%. Este proceso también es llamado pérdida de fuego.

Las reacciones comienzan a partir de 150° C, sin embargo, la cinética de la reacción aumenta enormemente a temperaturas cercanas a los 650° C, temperaturas a las cuales se elimina la mayor cantidad de agua químicamente combinada. La deshidratación del mineral ocurre a través de tres reacciones, la deshidratación de la Garnierita, Goetita y Calcedonia. Asumiendo que el mineral de Minera Loma de Níquel es similar al de Codemin (tomando en cuenta que la variación en la composición no altera los resultados de forma considerable), tenemos:

Composición Probable del Mineral:

- Garnierita:  $3(\text{Mg, Ni})\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = 67.94\%$
- Goetita:  $\text{FeO} \cdot \text{OH} = 20.18\%$
- Calcedonia:  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O} = 3.19\%$

- Deshidratación de la Garnierita



$\Delta H^\circ_{\text{form}}$  :

$$\text{Garnierita} = -1043 \text{ Kcal/mol}$$

$$\text{Enstatita} = -370.0 \text{ Kcal/mol}$$

$$\text{Forasterita} = -520.3 \text{ Kcal/mol}$$

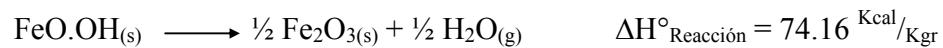
$$\text{Vapor} = -57.8 \text{ Kcal/mol}$$

$$\Delta H^\circ_{\text{Reacción}} = \Sigma(\Delta H^\circ_{\text{Prod}}) - \Sigma(\Delta H^\circ_{\text{React}})$$

$$\Delta H^\circ_{\text{Reacción}} = (-520.3 - 370 - 2(57.8)) + 1043 = 37.1 \text{ Kcal/mol}$$

$$\Delta H^\circ_{\text{Reacción}} = 37.1 \text{ Kcal/mol} / 0.277 \text{ Kgr/mol} = 133.95 \text{ Kcal/Kgr}$$

- Deshidratación de la Goetita:



- Deshidratación de la Calcedonia: Se puede despreciar.

#### Calor Necesario para la Deshidratación del Mineral

$$\Delta H^\circ_{\text{Reacción}} = 133.95 \text{ Kcal/Kgr} (0.6794) + 74.16 \text{ Kcal/Kgr} (0.2018) = \mathbf{105.97 \text{ Kcal/Kgr}}$$

### **3.3. Pre-Reducción:**

Consiste en la eliminación parcial del oxígeno combinado químicamente al hierro y al níquel. Para lograr la pre-reducción de los óxidos de hierro y níquel es necesaria la adición de Carbón como agente reductor. Estas reacciones comienzan a temperaturas cercanas a los 300° C, acelerándose y completándose a temperaturas por encima de los 700° C. Se requiere alcanzar una pre-reducción del 80% en cuanto al hierro se refiere, mientras que para el níquel, debido a su bajo contenido en el mineral, sólo se logra pre-reducir cerca de un 10%. Las reacciones de pre-reducción son las siguientes:

#### **3.3.1 Pre-reducción de hierro**



$\Delta H^\circ_{\text{form}}$  :

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 = -196 \text{ Kcal/mol} \quad \text{FeO} = -63 \text{ Kcal/mol} \quad \text{CO} = -26 \text{ Kcal/mol}$$

$$\Delta H^\circ_{\text{Reacción}} = \Sigma(\Delta H^\circ_{\text{Prod}}) - \Sigma(\Delta H^\circ_{\text{React}})$$

$$\Delta H^\circ_{\text{Reacción}} = 2(-63) - 26 + 196 = 44 \text{ Kcal/mol} / 160 \text{ gr/mol} = 0.275 \text{ Kcal/gr}$$

$$\Delta H^\circ_{\text{Reacción}} = 275 \text{ Kcal/Kgr}$$

Cálculo de la Temperatura de Inicio de Reacción:

$$\Delta G^\circ = 39630 - 52.19.T = 0 \text{ (Ecuación en Equilibrio)}$$

$$T = 39630 / 52.19 = 664^\circ\text{K}$$

$$T = 390^\circ\text{C}$$



$\Delta H^\circ_{\text{form}}$  :

$$\text{Fe}_2\text{O}_3 = -196 \text{ Kcal/mol} \quad \text{FeO} = -63 \text{ Kcal/mol} \quad \text{CO}_2 = -94 \text{ Kcal/mol}$$

$$\Delta H^\circ_{\text{Reacción}} = \Sigma(\Delta H^\circ_{\text{Prod}}) - \Sigma(\Delta H^\circ_{\text{React}})$$

$$\Delta H^\circ_{\text{Reacción}} = 2(-63) - 47 + 196 = 23 \text{ Kcal/mol} / 160 \text{ gr/mol} = 0.144 \text{ Kcal/gr}$$

$$\Delta H^\circ_{\text{Reacción}} = 143.75 \text{ Kcal/Kgr}$$

Cálculo de la Temperatura de Inicio de Reacción:

$$\Delta G^\circ = 19433 - 31.59.T = 0 \text{ (Ecuación en Equilibrio)}$$

$$T = 19433 / 31.59 = 615^\circ\text{K}$$

$$T = 342^\circ\text{C}$$

Como las reacciones de Pre-Reducción requieren que el hierro esté en forma de Hematita es necesario para ello que hayan concluido las reacciones de deshidratación que transforman la Goetita en Hematita. Es por ello que la pre-reducción ocurre a temperaturas cercanas a los 650°C, y a estas temperaturas la reacción más favorable y estable es la primera, en la cual se forma CO.

### 3.3.2 Pre-reducción del níquel



$$\Delta H^\circ_{\text{form}} : \\ \text{NiO} = -58 \text{ Kcal/mol} \quad \text{CO} = -26 \text{ Kcal/mol}$$

$$\Delta H^\circ_{\text{Reacción}} = \Sigma(\Delta H^\circ_{\text{Prod}}) - \Sigma(\Delta H^\circ_{\text{React}})$$

$$\Delta H^\circ_{\text{Reacción}} = -26 + 58 = 32 \text{ Kcal/mol} / 75 \text{ gr/mol} = 0.426 \text{ Kcal/gr}$$

$$\Delta H^\circ_{\text{Reacción}} = 426 \text{ Kcal/Kgr}$$

Cálculo de la Temperatura de Inicio de Reacción:

$$\Delta G^\circ = 31610 - 44.4.T = 0 \text{ (Ecuación en Equilibrio)}$$

$$T = 31610 / 44.4 = 711 \text{ °K}$$

$$T = 439 \text{ °C}$$



$$\Delta H^\circ_{\text{form}} : \\ \text{NiO} = -58 \text{ Kcal/mol} \quad \text{CO}_2 = -94 \text{ Kcal/mol}$$

$$\Delta H^\circ_{\text{Reacción}} = \Sigma(\Delta H^\circ_{\text{Prod}}) - \Sigma(\Delta H^\circ_{\text{React}})$$

$$\Delta H^\circ_{\text{Reacción}} = -47 + 58 = 11 \text{ Kcal/mol} / 75 \text{ gr/mol} = 0.146 \text{ Kcal/gr}$$

$$\Delta H^\circ_{\text{Reacción}} = 146 \text{ Kcal/Kgr}$$



Cálculo de la Temperatura de Inicio de Reacción:

$$\Delta G^{\circ} = 11413 - 23.8.T = 0 \text{ (Ecuación en Equilibrio)}$$

$$T = 11413 / 23.8 = 480 \text{ }^{\circ}\text{K}$$

$T = 207 \text{ }^{\circ}\text{C}$
------------------------------------

Adicionalmente a la eliminación parcial de los gases asociados al mineral y, producto del proceso mismo de calcinación, se logra producir mineral calcinado a una temperatura aproximada de 950° C, con un porcentaje de carbono residual o Carbono Fijo de aproximadamente 1,5%.

Tales características son necesarias para lograr una mayor eficiencia del proceso de reducción así como también completar las reacciones químicas en el mismo. En tal sentido, cuanto mayor sea la temperatura del mineral calcinado producido, (obviamente dentro de los límites operacionales) mayor será el aprovechamiento térmico y eléctrico en el horno de reducción (KRUSS POLYSIUS, 2000). El carbono fijo resultante es necesario para completar las reacciones de reducción, tanto del hierro como del níquel, de tal forma de lograr separar la aleación de interés del resto llamado escoria. En resumen, se pueden enumerar las características que debe tener el mineral calcinado como objetivos del proceso de calcinación:

1. Humedad: 0 %.
2. Pérdida de Fuego (PF): máx. 0,5 %.
3. Pre-Reducción de Hierro (P-R): 80 %.
4. Carbono Fijo (CF): 1,5 %.
5. Temperatura de Salida de Mineral: 950° C.

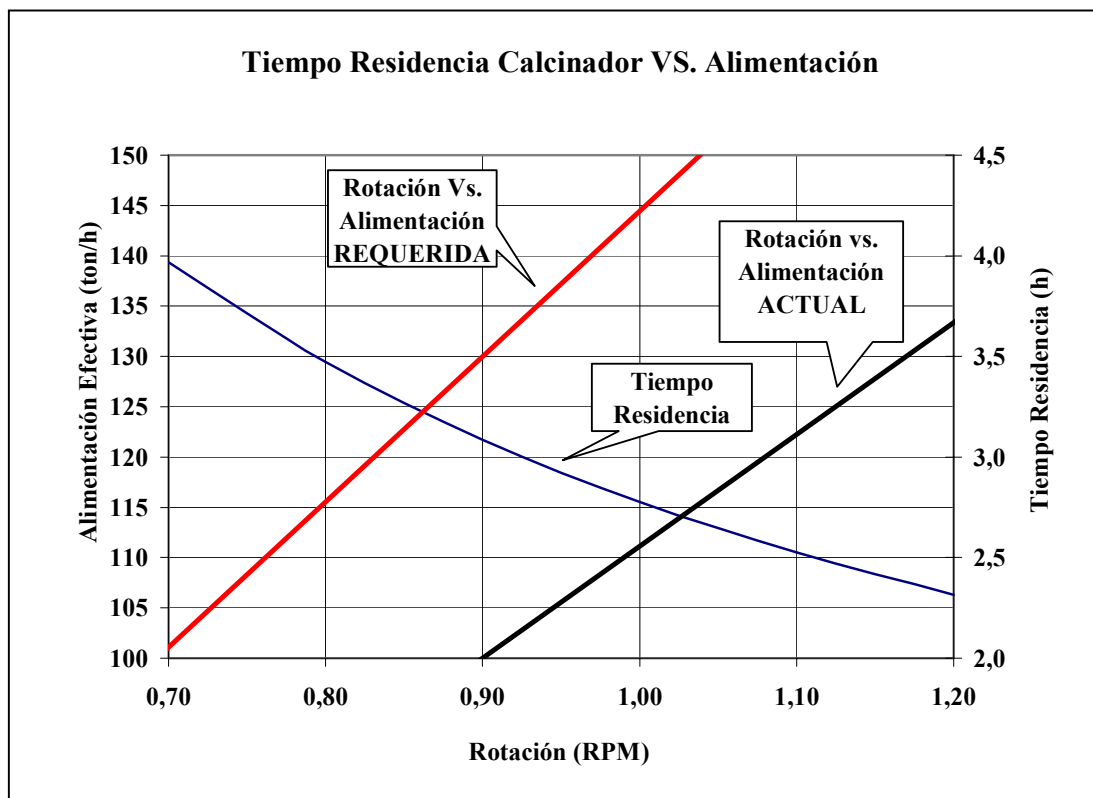
#### **4.- Variables que afectan la calidad del calcinado**

##### **4.1. Tiempo:**

El tiempo de residencia del mineral dentro del horno influye directamente sobre la cantidad de gases liberados ya que las reacciones de secado, deshidratación y pre-reducción poseen una cierta cinética, por lo que, a mayor tiempo de residencia se logra la mayor completación de las mismas y en consecuencia un mejor producto calcinado. El tiempo de

residencia varía en función de la velocidad de rotación del horno de forma inversamente proporcional.

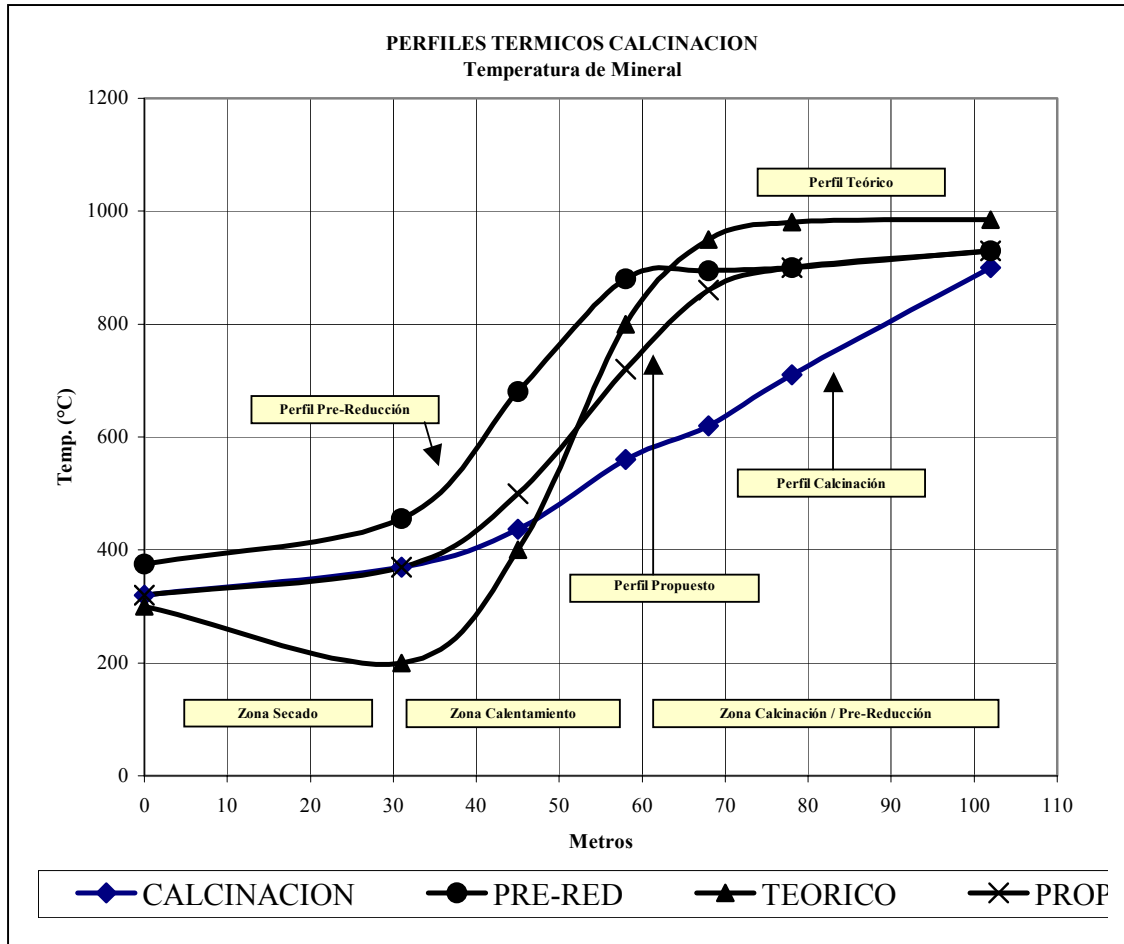
**Figura N° 02.** Tiempo de residencia Vs. Alimentación del horno y rotación



#### 4.2. Temperatura:

Como se explicó anteriormente las reacciones de secado, deshidratación y pre-reducción requieren de una temperatura mínima para que comiencen a ocurrir y la cinética aumenta con el aumento de la temperatura. El perfil térmico del horno varía según la combinación de múltiples factores como: cantidad de combustible inyectado, cantidad de aire primario, secundario y terciario, potencia del ventilador de tiro, etc.

**Figura N° 03.** Perfil térmico del horno calcinador.



### 4.3. Granulometría:

La granulometría es un factor que influye en la velocidad de reacción y por tanto en el grado de completación de las mismas. A menor granulometría las reacciones ocurren con mayor velocidad ya que es un proceso que ocurre de afuera hacia adentro y se aumenta el área de contacto entre las partículas de mineral, el carbón y los gases. Sin embargo, una granulometría muy baja aumentaría el arrastre de material por la exhaustión, es por ello que debe operarse dentro de un rango granulométrico.

La granulometría depende del proceso de preparación de mineral por lo que no puede ser controlada en el área de calcinación, el límite superior está establecido por las trituradoras, mientras que el límite inferior depende de las características del mineral y del propio proceso de trituración.

## **5.- Sistema de Recolección de Polvos**

Los gases de salida, debido a la velocidad que poseen, arrastran consigo las partículas de mineral y carbón de menor peso, es decir, arrastran polvos. Existen cuatro variables que principalmente afectan el grado de arrastre de polvos en el calcinador:

- Velocidad con que salen los gases y que depende de la succión producida por el ventilador de tiro y la válvula Celosía. Cuanto mayor sea la succión generada por el ventilador de tiro y la apertura de la Celosía, mayor será el arrastre de polvos.
- Humedad del mineral y el carbón alimentado. Cuanta mayor humedad contengan, tanto el mineral como el carbón alimentado, mayor peso neto tendrá estas partículas por lo que su arrastre se verá dificultado.
- Perfil térmico del horno calcinador. Con aumentos bruscos de la temperatura interna del horno se producen fraccionamientos de las partículas de mineral debido a la velocidad de desprendimiento del agua químicamente combinada. Estos fraccionamientos además de que disminuyen la granulometría del mineral haciendo más fácil su arrastre, fluidizan el mismo, haciendo que las partículas menores queden expuestas al flujo de gases.
- Resistencia mecánica de las pellas. Si las pellas alimentadas no poseen una resistencia mecánica adecuada las mismas se desmoronarán por lo que la aglomeración de polvos lograda no tendrá ningún efecto, los mismos serán nuevamente arrastrados en un proceso cíclico.

Debido a las regulaciones ambientales y el alto contenido de níquel en los polvos es de suma importancia recuperar los mismos, es por ello que los gases al salir del calcinador pasan por un sistema de recolección de polvos. El sistema de recolección de polvos consiste en una cámara de expansión y posteriormente un filtro electrostático.

## **6. Sistema de Exhaustión de Gases**

Para garantizar la eficiencia del sistema de combustión y la correcta formación de la llama es necesario crear una depresión entre la salida y la entrada del calcinador, es decir, se debe producir una succión desde la entrada del calcinador que garantice la salida de los gases inyectados y generados dentro del horno.

Esta succión es realizada por un ventilador de tiro (ver anexo N° 05) de 280 KW, capaz de mantener un flujo de 399.000 Nm<sup>3</sup>/h. La succión producida por este ventilador puede ser variada por medio de una Válvula Celosía, ubicada entre el ducto de salida de gases del calcinador y el filtro electrostático. Dicha válvula es capaz de abrirse o cerrarse total o parcialmente produciendo mayor o menor succión respectivamente. Es importante mantener en todo momento de la operación esta depresión, evitando contraflujos de gases que además de perjudicar la operación y la calidad del calcinado producido, facilitan enormemente la formación de anillos y deteriora el recubrimiento refractario.

La posición de la válvula celosía influye enormemente en la forma de la llama, en el perfil térmico del horno y en el arrastre de polvos por los gases de salida. En tal sentido, una mayor apertura de la válvula genera un mayor grado de succión que trae como consecuencias:

- Alargamiento de la llama.
- Distribución del calor hacia la entrada del horno y por consiguiente mayores temperaturas en esta zona.
- Mayor pérdida de calor por el aumento de la temperatura en los gases de salida.
- Mayor arrastre de polvos.

Por otro lado, una menor apertura de la válvula genera menor succión y por lo tanto los efectos son inversos:

- Acortamiento de la llama.
- Concentración de calor en la salida del calcinador, por lo que se facilita la formación de anillos.
- Menores pérdidas de calor por la disminución de la temperatura en la entrada del horno y en los gases de salida.
- Menor arrastre de polvos.

## **7.- Sistema de Control de Peso, Flujo, Temperatura, Presión y Análisis Químico:**

Para llevar el control de todas las variables de operación en el área de calcinación se cuenta con instrumentos de medición capaces de monitorear y registrar las mismas. En tal sentido, se puede llevar un control estadístico con el registro historial de dichas variables. La medición de dichas variables se realiza por medio de instrumentos ubicados en los equipos, mientras que el monitoreo y registro de las mismas se realiza desde los paneles de control ubicados en la sala de calcinación.

De esta forma, se puede alterar directamente algunas de las variables como flujos de gas, aire o alimentación, actuando sobre las válvulas y balanzas que permitan ajustar los valores establecidos. Otras variables como la temperatura, presión y composición de gases son consecuencia de los ajustes anteriores y no son modificadas directamente, son resultado de la operación misma

### **7.1. Control de Peso:**

Para el control de peso de la carga alimentada se cuenta con balanzas en los alimentadores de mineral y en las cintas transportadoras (382-1311-02 / 03 y 06). La adición de carbón se controla con balanzas ubicadas en los alimentadores de carbón (550-1326-01 y 02). La producción de mineral calcinado es pesada en los contenedores al ser este transportado por el puente grúa a los silos de alimentación de los hornos de reducción.

## **7.2. Control de Flujo:**

Para el control de flujo del gas natural, aire primario, secundario, terciario diesel y aire secundario auxiliar se cuenta con instrumentos de medición y registro de dichas variables. Estas variables pueden ser monitoreadas y alteradas a través de los paneles de control, realizando los ajustes correspondientes en los esquemáticos presentados en pantalla.

## **7.3. Temperatura:**

Para el monitoreo y registro de las temperaturas internas del horno se cuenta con 8 termocuplas ubicadas dentro del calcinador y distribuidas a lo largo del mismo. La temperatura interna del horno puede ser variada indirectamente con el ajuste de la llama mediante los flujos de gas natural y aire y la variación de la válvula celosía.

## **7.4 Presión:**

Para el control de la presión interna del horno se cuenta con instrumentos capaces de medir y registrar dicha variable. De esta forma se puede garantizar la extracción de los gases evitando contraflujos.

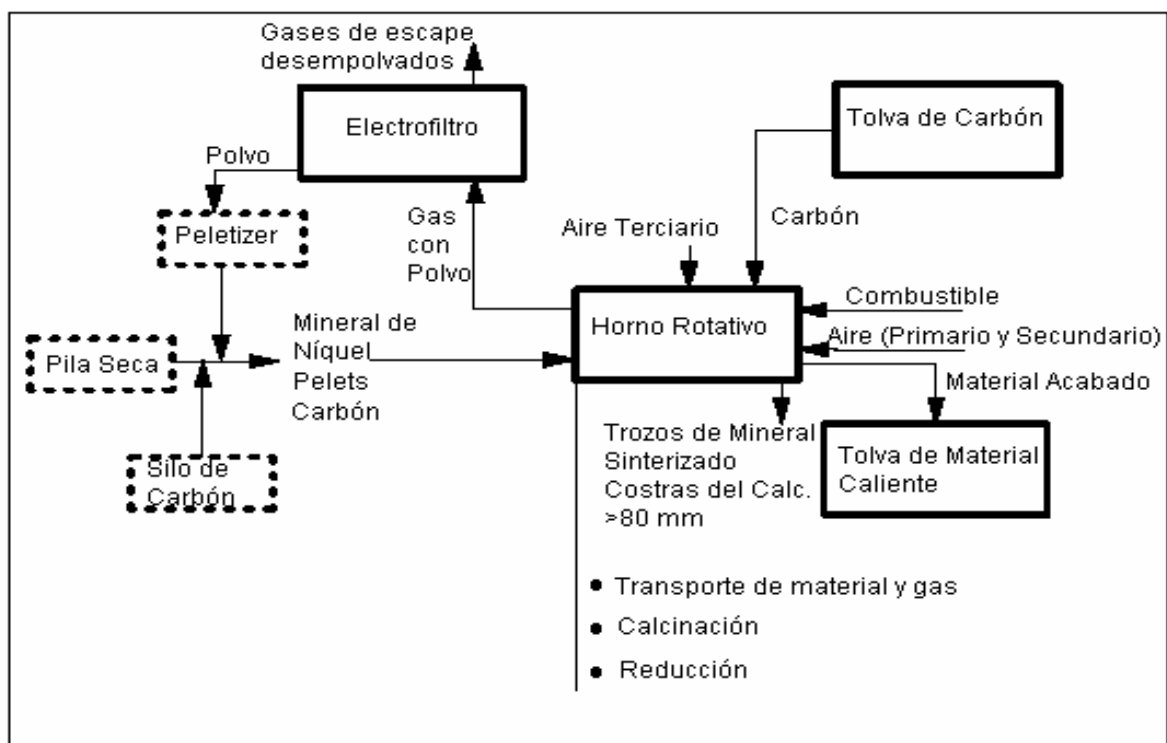
## **7.5. Análisis Químicos:**

Los gases de salida son analizados para llevar un mejor control de la operación, en tal sentido se tiene el monitoreo y registro de CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>.

## 8. Tareas técnicas de procesos

La tarea de la instalación es el tratamiento térmico de mineral de níquel previamente secado junto con carbón y pelets, que se aportan al mineral desde una instalación de peletización. Los pelets se componen de mineral menudo cribado y del polvo de los electrofiltros de los hornos rotativos, que de esta forma se aporta de nuevo al proceso.

Figura N° 04 . Esquema del área de calcinación.



La instalación de horno rotatorio ha sido concebida para 2 tipos de servicio:

- Servicio como instalación de calcinación:** En este tipo de servicio no se aporta carbón y el quemador trabaja con excedente de aire.
- Servicio con instalación de reducción:** En este tipo de servicio se aporta carbón y el quemador trabaja con defecto de aire. Los componentes combustibles en la atmósfera del horno son quemados mediante la aportación de aire de combustión adicional al proceso por parte de los ventiladores de aire terciario.



**a.- Servicio como instalación de calcinación (Sin aire terciario)**

En el servicio como instalación de calcinación se aporta toda la cantidad de calor a través del quemador de horno rotatorio. En la zona más caliente del horno, el mineral no debería ser calentado por encima de los 950 °C, para permanecer por debajo del punto de reblandecimiento del mineral y, de esta forma, reducir al mínimo las costras en el horno. Suponiendo que el 15 % de la alimentación se descarga como polvo y se expulsan 10,4 t/h de agua de hidratación, se obtiene con la potencia nominal una descarga de horno rotativo de 79,6 t/h. Se debe intentar conseguir una temperatura de descarga de 900 °C con una parte de agua de hidratación del 0,3 %.

Este modo de servicio, sin embargo, no está sujeto a ninguna garantía. Suponiendo que la temperatura del gas caliente no debe superar los 1.400 °C, se obtiene con un valor cp de 0,4 kcal/Nm<sup>3</sup> \*°C un volumen de gas caliente de 114.000 Nm<sup>3</sup> /h ó una necesidad de aire de 106.500 Nm<sup>3</sup> /h, es decir, a una altura de emplazamiento de 900 m y 26 °C de temperatura ambiente media, se necesitan aprox. 130.000 Nm<sup>3</sup> /h de aire. Con el ventilador de aire primario y los ventiladores de aire secundario 1 y 2, se encuentran instalados en total 149.000 Nm<sup>3</sup> /h.

Pero también en el servicio de calcinación han de estar en funcionamiento los ventiladores de aire terciario con una potencia mínima, para evitar que se produzca un sobrecalentamiento de los tubos de insuflación.

Los primeros aprox. 35 m del horno rotativo desde la entrada hacen las veces de zona seca. Después de una zona de transición de entre 15 m y 20 m, el mineral se habrá calentado entonces a una temperatura de 600 °C, en la que comienza la deshidratación. Debido a la humedad del 15 % se ha tomado como base una temperatura de gas de escape de 300 °C para el dimensionamiento del lado de gas de escape. Para mejorar el intercambio de calor en la zona seca, ésta ha sido provista de un revestimiento de estambre.

En el balance de cantidad de gas de escape se ha tenido en consideración un factor de excedente de aire de 1,1. Este factor de excedente de aire tiene en consideración el excedente de aire en el área del quemador y el aire de infiltración en la carcasa de entrada y da como resultado en el gas de escape un contenido de oxígeno de aprox. 6 %. Bajo esta premisa se obtiene una cantidad de gas de escape de 163.000 Nm<sup>3</sup> /h correspondiente a aprox. 380.000 Nm<sup>3</sup> /h (referido a la altura emplazamiento de 900 m y una temperatura de gas de escape de 300 °C).

**b.- Servicio con instalación de reducción:**

Para conseguir la reducción en el mineral, se añaden aún 5,5 Ton/h de carbón reactivo (el 4 – 5 % de la carga) a las cantidades de material anteriores. Ha de seguir ajustándose una atmósfera reductora del horno, es decir, el quemador ha de trabajar con defecto de aire.

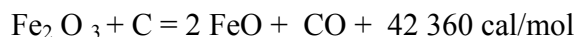
En total se tienen a disposición con ello cuatro combustibles para el calentamiento del horno rotativo. Estos son:

- El combustible (gas o diesel-oil) en el quemador,
- Los componentes volátiles del carbón
- El monóxido de carbono de la reducción,
- y una parte pequeña de carbono.

Según el contenido de oxígeno en la atmósfera del horno, se quema también un poco de carbono. Al aumentar la cantidad de carbón y equilibrar la cantidad de aire, se influye también la reducción y se modifica la necesidad de combustible en el quemador.

Se requiere una reducción parcial de la parte de mineral de hierro, que se encuentra en el mineral como hematita Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> . Según la garantía se han de reducir el 80 % de la hematita a wustita (FeO). El níquel se encuentra en forma de óxido de níquel NiO y se reduce rápidamente debido a su escasa afinidad al oxígeno.

De modo simplificado, los procesos de reducción se pueden representar de la forma siguiente:



Para conseguir el grado de reducción requerido del 26 %, se han de descomponer aprox. 1,6 Ton/h de oxígeno. Se requiere que 1,2 % es decir, aprox. 1,0 Ton/h de carbono permanezcan en el material de descarga. La parte de agua de hidratación residual que permanece en el material de descarga no debe sobrepasar el 0,3 %.

**Figura N° 05.** Perfil de temperatura del horno en servicio de reducción con aire terciario

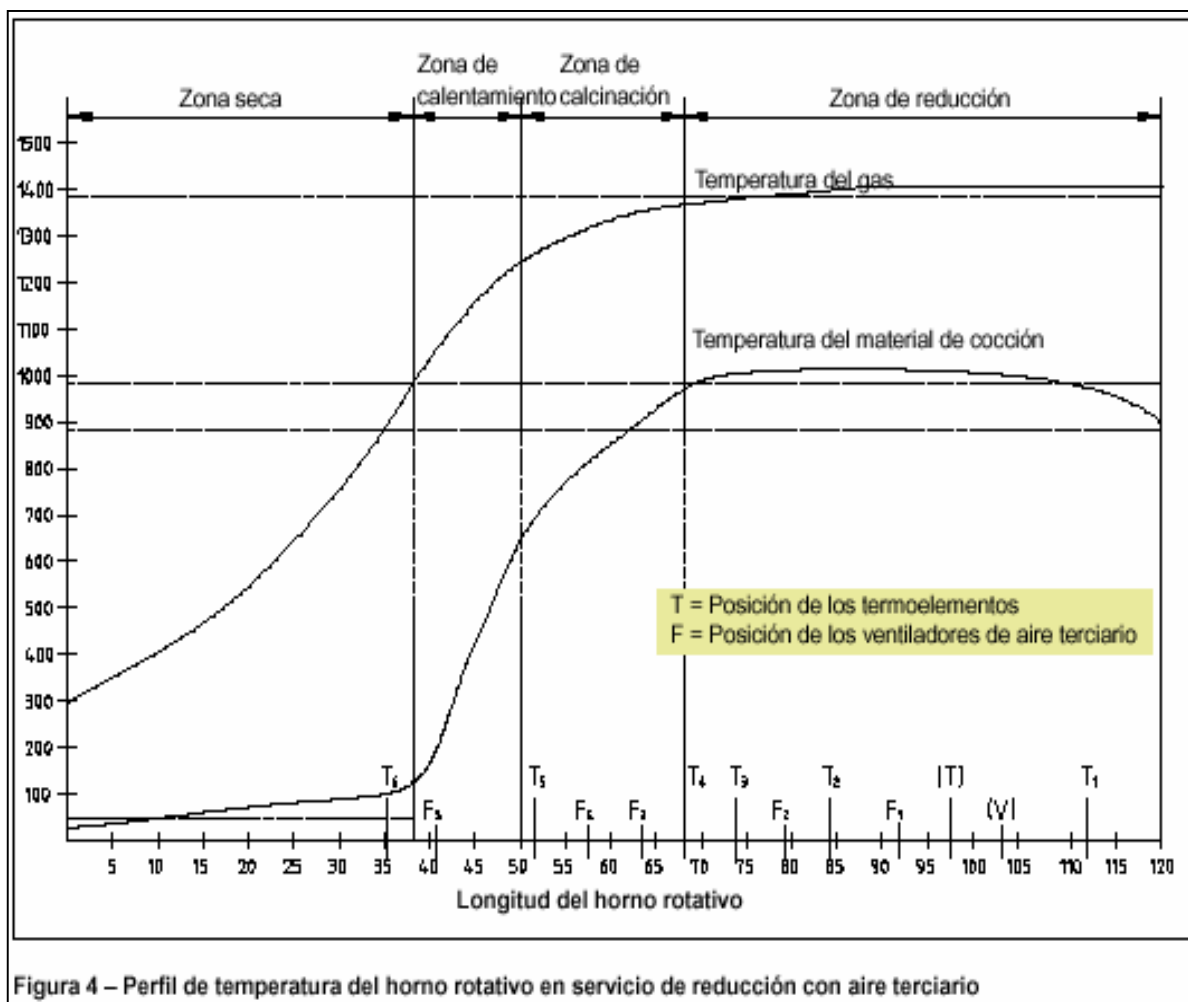


Figura 4 – Perfil de temperatura del horno rotativo en servicio de reducción con aire terciario

Suponiendo que la ceniza de carbón sea descargada con el polvo, el rendimiento de descarga será del 79,6 t/h.

De los combustibles, se quema el gas natural (de forma alternativa dieseloil) en el quemador. Los otros combustibles (componentes volátiles del carbón, excedente de carbono y monóxido de carbono) son liberados en el horno rotativo a partir del centro de la zona de calcinación y sobre todo en la zona de reducción, es decir, aprox. 70 m del horno rotativo y quemado por aire que se aporta a través de los ventiladores de aire terciario. Para alcanzar este ajuste, el quemador deberá trabajar con llama larga, es decir, alta cantidad de aire axial.

En la práctica se ha demostrado que no se consigue una combustión completa de los gases combustibles. Con un contenido de oxígeno de aprox. 4 % hay que esperar componentes combustibles de + 0,5 % CO y + 0,2 % H<sub>2</sub> (valor límite inferior) en el gas de escape. Oxígeno (O<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO) e hidrógeno (H<sub>2</sub>) son medidos en la entrada de horno y son parte de la conexión de seguridad para la protección del electrofiltro. Se produce una alarma, cuando el contenido de CO alcanza el 2 % ó el contenido de H<sub>2</sub> el 1 % (valor límite medio). Con 3% CO ó 2% H<sub>2</sub> (valor límite superior) tiene lugar la desconexión del electrofiltro incluidas puesta a tierra y desconexión de la instalación de combustión abriéndose al mismo tiempo la tapadera de chimenea auxiliar y cerrándose la compuerta gas de escape.

En el balance de cantidad de gas de escape se ha tenido en consideración un factor de excedente 1,25. Este factor de excedente considera también los componentes de gas combustibles, el vapor de agua de todo el aire de combustión, el aire falso que entra en el cierre de la entrada de aprox. 5 % y el aire excedente que se aporta principalmente a través de los soplantes de aire terciario 4 y 5, para alcanzar el contenido de oxígeno de aprox. 4 % en el gas de escape que se ha mencionado antes.

Bajo las condiciones antes mencionadas se calcula un volumen de gas de escape de 147.000 Nm<sup>3</sup> correspondientes a aprox. 343.000 Nm<sup>3</sup>/h (referido a la altura de emplazamiento de 900 m y una temperatura de gas de escape de 300 °C).

## **CAPITULO IV. FUNDAMENTOS DE PELETIZACIÓN**

### **Parte I. Fundamentos de peletización.**

La peletización es un proceso de aglomeración que consiste en la formación de pellas verdes por acción de la rotación el mineral fino o concentrado finamente molido, y al cual se le adicionan otros elementos para favorecer a la aglomeración de las partículas. Las pellas son bolas producidas de concentrados y menas naturales de hierro de diferentes mineralogía y composición química, tiene algunas características generales como son:

- Distribución de tamaño uniforme con intervalos entre 9 a 15 m.m de diámetro.
- Alta y frecuente porosidad de 25-30%.
- Alto contenido de hierro de más del 63%
- Prácticamente no tiene perdidas por ignición o volatibilidad.
- Alta y uniforme resistencia mecánica.
- Baja tendencia a la abrasión y un buen comportamiento durante el transporte.
- Suficiente resistencia mecánica para soportar los esfuerzos térmicos bajo una atmósfera reductora.

Para obtener estas propiedades y tomando en cuenta la gran variedad de materia prima, el proceso de peletización envuelve tres etapas principales:

1. Preparación de la materia prima.
2. Formación de pellas verdes.
3. Quemado de pellas verdes.

#### **1. Preparación de la Materia Prima.**

La preparación consiste en establecer una serie operaciones aplicada a la materia prima para obtener condiciones físicas adecuadas y así tener un proceso óptimo de

peletización, esto depende de las características y cantidad de producción requerida. Las etapas se basan en: el secado de mineral, molienda de mineral y mezclado del fino con los aditivos.

Durante el secado se requiere controlar la humedad del mineral de hierro para establecerlo entre un 8 al 15 %. La molienda del mineral es muy importante, ya que el proceso de peletización y las propiedades de las pellas están fuertemente influenciadas por las características granulométricas del mineral finamente molido (área superficial, tamaño y forma de partícula); se requiere tener un 100% pasante malla 200 (75 micras) y con una distribución de tamaños mínima de un 60% menor a malla 325 (44 micras).

La influencia de la granulometría sobre las propiedades mecánicas de las pellas verdes y quemadas radica en que las partículas de menor tamaño poseen mayor área de contacto (mayor área superficial) lo que propicia a formar mayores puntos de enlace en la estructura de la pella, que sumado con la estructura del grano y la calidad superficial permite obtener mayor resistencia en los pelets.

## **2. Formación de Pellas Verdes.**

Consiste en aglomerar el mineral ya preparado, mediante el uso de agua y aglomerantes y/o aditivos, y la aplicación de una serie de fuerzas co-activas denominadas mecanismos de enlace. Esto es llevado en tambores, conos, o discos peletizadores.

Los factores decisivos en la formación de pellas verdes y de sus propiedades pueden ser divididos en los siguientes grupos:

- a) *Fuerzas físicas:* fuerzas de Van der Waals, magnéticas o electrostáticas.
- b) *Factores que dependen de la superficie:* tamaño de partícula, distribución de tamaños y área superficial de la partícula, y estructura cristalina.

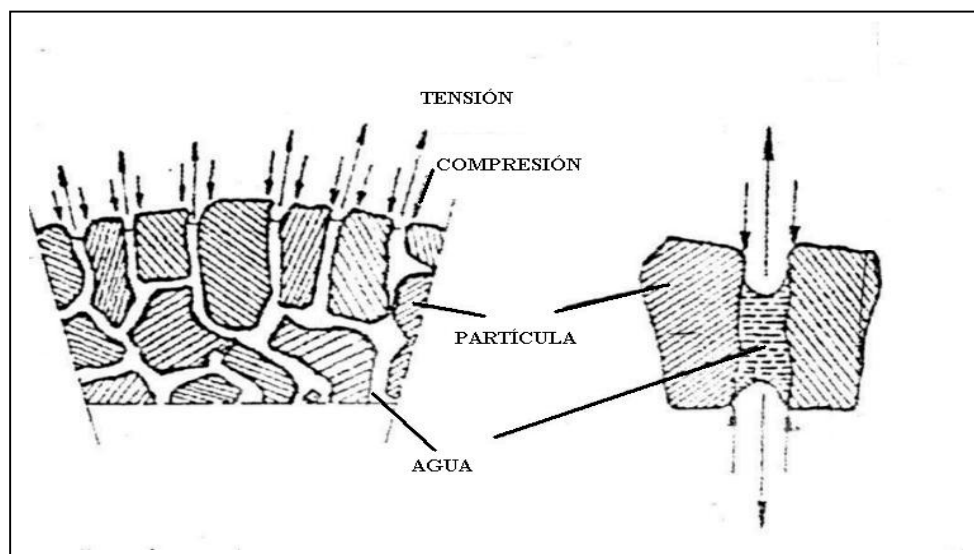
- c) *Factores que dependen del material:* mojabilidad, capacidad de absorción debido a la estructura porosa, grado de hinchamiento de los componentes, propiedades químicas.
- d) *Fuerzas capilares y de tensión superficial:* debido a la adición del líquido aglomerante, tales como: agua o aditivos.

**Mecanismos de formación de pellas**

Durante al formación de pellas se presentan una serie de mecanismos, estos son: nucleación, crecimiento y consolidación.

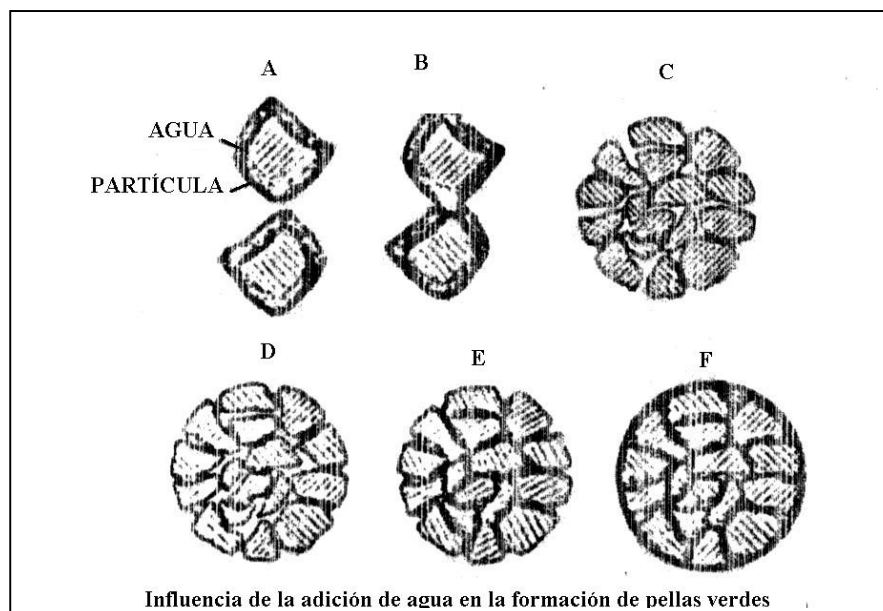
Nucleación: las partículas entran en contacto con el agua inyectada, mojando su superficie; se forma una capa de agua sobre las partículas (ver figuras N° 06 y 07, abajo) y al chocar con otra se adhieren debido a la tensión superficial del agua. Al entrar en contacto varias partículas forman los núcleos, las fuerzas de adhesión y capilaridad actúan en esta etapa fuertemente. Adicional, el movimiento rotatorio induce a la unión de más partículas y a establecer la forma esférica creando así núcleos más estables.

**Figura N° 06.** Fuerzas que intervienen en la formación de pellas verdes





**Figura N° 07.** Influencia de la adición de agua sobre la formación de pellas verdes.



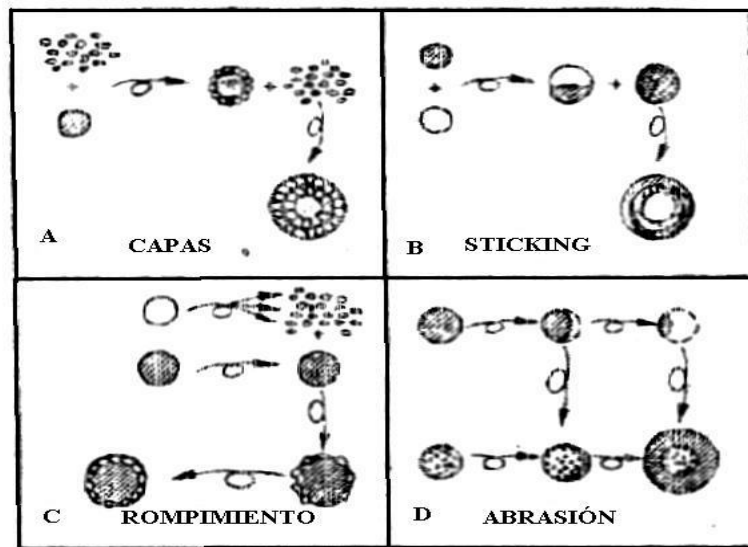
Crecimiento: El crecimiento de los núcleos puede darse por diversas maneras:

- A) Adhesión: las capas se forman por la adhesión de muchas partículas alrededor de los núcleos.
- B) Rompimiento: algunas pellas se rompen durante la rotación constante que sufren dentro de los equipos peletizadores, liberando partículas que se adhieren a los núcleos más estables y fuertes.
- C) Sticking: dos núcleos se encuentran y se adhieren debido a la acción de la rotación y a la presión generados sobre ellas.
- D) Abrasión: un núcleo débilmente formado se degrada debido a la abrasión que se produce durante la rotación, liberando partículas que otro núcleo captura formando capas sobre esta última.

Cabe destacar, que el movimiento de rotación y el choque entre pellas propician la aparición de estos mecanismos que son necesario para establecer una calidad óptima de pellas, así como también, regula la sobrevivencia de las pellas con mejores propiedades

mecánicas. La adición de agua permite aumentar o disminuir la rapidez del crecimiento, el punto de alimentación en el disco también permite controlar el crecimiento y el número de núcleos.

**Figura N° 08.** Mecanismos alternativos de la formación de pellas



### 3. Quemado de Pellas Verdes (Piroconsolidación)

La utilización directa de las pellas verdes en procesos metalúrgicos es muy poco frecuente debido a la baja resistencia mecánica que tiene las pellas para los esfuerzo a que serán sometidos. Las pellas serán transportadas, soportarán caídas y hasta tratamientos térmicos bajo atmósferas controladas. Todo esto disminuye la probabilidad de supervivencia de las pellas, por consiguiente se requiere mejorar la resistencia mecánica.

La piroconsolidación consiste en someter las pellas a un calentamiento progresivo y un posterior enfriamiento según un perfil térmico adecuado (obtenido bajo experimentación), esto con la finalidad de formar fases dentro de la estructura de las pellas incrementando sus propiedades mecánicas y obteniendo una alta porosidad. Las etapas del

quemado de pellas son: Secado, pre-calentamiento, calentamiento, quemado, enfriamiento. Las propiedades finales de la pella van a depender mucho del tiempo y las velocidades de calentamiento y enfriamiento respectivas.

**Secado:**

Consiste en eliminar el contenido de agua absorbida en la pella por evaporación y con el uso de gases calientes. Las diferentes fuentes del agua son:

- Agua proveniente de los intersticios entre partículas, por ejemplo la absorbida en los poros y capilares.
- El agua absorbida en los poros de las partículas.
- Agua absorbida físicamente (humedad). Y parcialmente combinada en forma química.
- Agua proveniente de los aditivos y aglomerantes.

Las velocidades de secado deben ser adecuadas para evitar el agrietamiento y rompimiento de las pellas por choque térmico y salida brusca de los gases de evaporación. El agua absorbida por capilaridad es la que se libera primeramente, posteriormente se produce la evaporación del agua por humedad y la absorbida químicamente, la cual se produce desde el interior hacia el exterior de la pella. Si la velocidad de desprendimiento de vapor en la superficie y capas de la pella son menores a las de la evaporación interna, se someterá a los pelets a fuertes esfuerzos que pueden provocar su agrietamiento. La porosidad también influye, ya que si el agua en los poros de las pellas no se liberan rápidamente se tiene el mismo efecto.

Las fases del proceso de sacado de pella son:

*Fase I:* El agua se evapora a velocidad constante en la superficie de la pella, el proceso continúa hasta que la humedad del interior de la pella es emitida a una suficiente rapidez por fuerzas capilares o de difusión a la superficie. Esta etapa esta caracterizada por

la evaporación de agua superficial. La velocidad constante de secado esta influenciada por los siguientes factores:

- Contenido de humedad y temperatura del gas de secado.
- Volumen del gas evaporado y velocidad de escape sobre la superficie de la pella.
- Superficie de la pella.

*Fase II:* esta caracterizada por la evaporación del agua capilar del interior de las pellas. Depende de la velocidad de difusión, resistencia a la salida de gases, porosidad de la pella.

*Fase III:* esta caracterizada por la evaporación del agua higroscópica o combinado químicamente.

#### **Pre calentamiento:**

En esta etapa se inicia la consolidación de la pella verde (mayor resistencia a la compresión después de secado, ver tabla N° 01 ). Se utiliza para evitar un choque brusco de temperatura entre las etapas de secado (120–400°C) y el quemado (1200-1400°C), que pueda disminuir la calidad de los pelets. En esta etapa se descomponen los hidratos, carbonatos y sulfatos, así como también se oxida parcialmente la magnetita y los sulfuros presentes.

**Tabla N° 01 . Resistencia a la compresión de pellas verdes y secadas.**

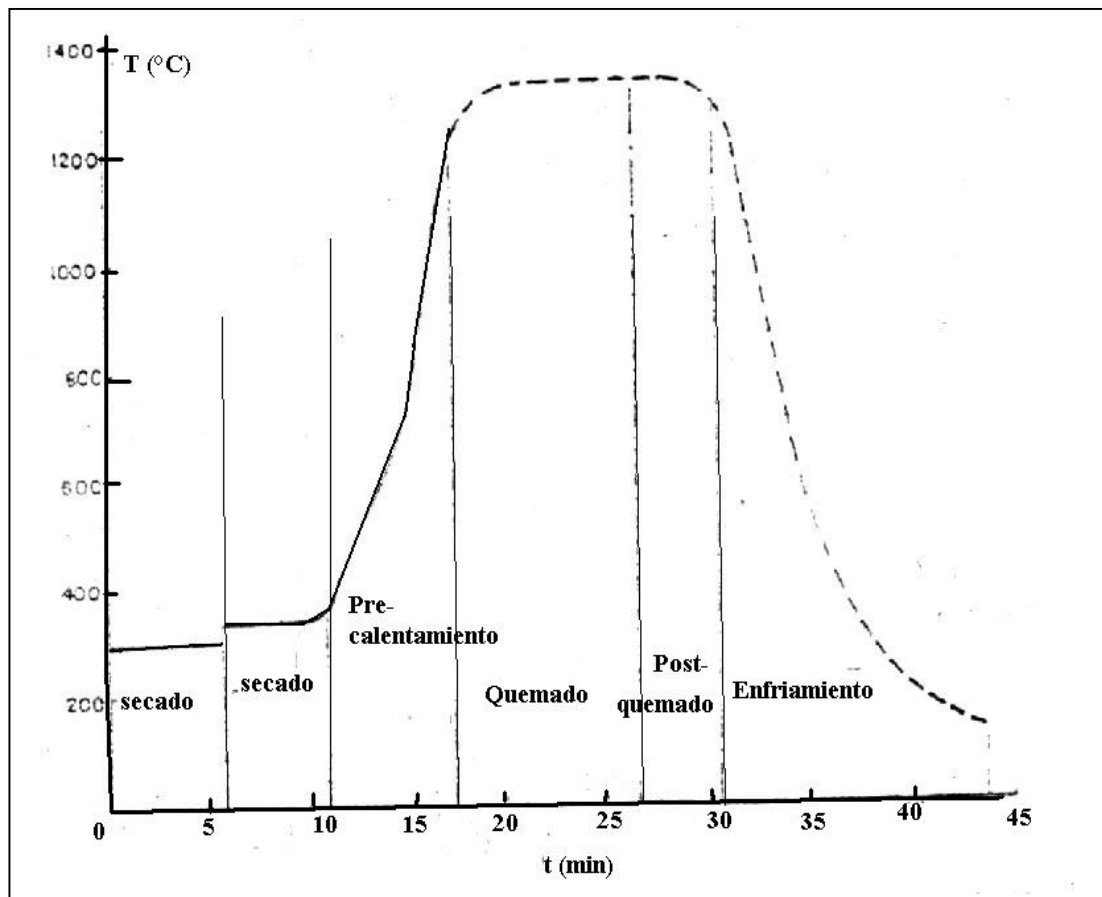
N°	Tipo de mena	Resistencia a la compresión					
		Sin aditivo		Con 0,5 % Bentonita		Con 1% Bentonita	
		verde	seco	verde	seco	verde	seco
1	Concentrado de magnetita	11	7	12	20	13	33
2	Conc. Artificial de Magentita	11	4	10	23	-	-
3	Hematita especular	12	4	10	20	11	35
4	Hematita	14	30	16	70	-	-

### Quemado:

Esta etapa se lleva a cabo entre 1250 a 1350 °C. Se produce los enlaces definitivos en la estructura de la pellas, gracias a las reacciones de los aditivos y los componentes de la ganga formando fases, que son:

1. Cambio en la estructura cristalina.
2. Fases de fusión intergranular proveniente de la reacción de los aditivos con la ganga.

**Figura N° 09.** Perfil térmico para el quemado de pellas.



**Enfriamiento:**

Consiste en la disminución progresiva de temperatura hasta alcanzar la temperatura ambiente; es muy importante controlar la velocidad de enfriamiento ya que de ello depende la estructura física de la pella, la composición de las fases, la presencia de esfuerzos internos y la cristalinidad de la microestructura de los pelets. Si la velocidad de enfriamiento es muy alta se puede generar esfuerzos internos dentro de la estructura de la pella, por los diferentes coeficientes de expansión de las fases presentes, disminuyendo la resistencia final de las pellas.

**Parte II. Fuerzas de Atracción (Partícula-Partícula) que Intervienen en la Formación de Pellas Verdes.**

Las fuerzas que intervienen en la aglomeración de partículas dependen de las características físicas de la partícula y de la naturaleza del proceso físico por la cuál ellas interactúan. Los mecanismos que participan son:

- 1. Fuerzas de atracción intermolecular:** Son llamadas fuerzas de Van der Waals, aparecen en un intervalo muy pequeño hasta un máximo de 1000 Å. Son afectadas por cualquier cambio en la superficie lisa intermolecular disminuyendo rápidamente la fuerza de atracción, por consiguiente no son de gran relevancia en el sistema de atracción de partículas ya que estas son de superficie rugosa y mayores de 1000 Å generalmente.
- 2. Fuerzas Electrostáticas:** Estas fuerzas de atracción siempre están presentes en los sistemas de partículas que tienen una interacción cercana y continua. Se producen la fricción de partículas y por el contacto. Pueden crear adhesión inicial del material en el estado seco.
- 3. Modos de puente líquido:** existen tres mecanismos de contribución en los cuales las capas de líquido producen fuerzas de cohesión entre partículas.
  - a. Capas de líquido adsorbidas sobre partículas.
  - b. Puentes líquidos móviles.
  - c. Aglomerantes viscoso o adhesivos.

a.- *Capas de líquido adsorbidas sobre partículas:*

Considerándose dos partículas cercanas y presente solo una película superficial adsorbida e inmóvil se tiene que:

- Las imperfecciones superficiales son alisadas con lo que se incrementa el aprovechamiento del área de contacto partícula-partícula.
- La distancia interparticular efectiva disminuye permitiendo que las fuerzas de atracción intermolecular y las electrostáticas intervengan en la cohesión de partículas.

b.- *Puentes líquidos móviles:*

Estos intervienen cuando las partículas se tocan produciendo puentes líquidos con las capas adsorbidas, incrementándose las fuerzas de cohesión. Existen tres estados de saturación líquida que se describen a continuación:

1. Estado pendular: Cuando el agua está presente solo en los puntos de contacto de los granos donde la tensión superficial mantiene los granos unidos. El número de contacto en cada partícula es una función de la distribución de tamaños y de la geometría superficial de las mismas. Las fuerzas de cohesión son el resultado de la tensión superficial y la presión de succión negativa generada por la curvatura del menisco líquido en la interfase aire-líquido.
2. Estado capilar: cuando todos los poros están llenos de agua, pero la superficie no está cubierta por una película coherente. La remoción de agua producirá una curvatura en la superficie del agua en los poros y una elevación de la succión potencial de la pella. En este estado las fuerzas de cohesión son de tres a cuatro veces mayor que en el estado pendular.
3. Estado funicular: se presenta cuando algunos poros están llenos de agua. La fuerza de cohesión tiene una magnitud intermedia entre el estado pendular y capilar.

### **Parte III. Parámetros de Formación de las Pellas Verdes**

#### **1. Distribución de tamaños y área superficial específica de la materia prima.**

Generalmente se requiere que el mineral de hierro tenga una distribución de tamaños entre 90 – 100% menor a 74 micras (pasante malla 200), un rango entre 65 y 98% menor de 45 micras (malla 325). Los valores más adecuados según la práctica para el área superficial dependen del tipo de mineral, para hierro especular oscila entre 1600 y 1800  $\text{cm}^2/\text{gr}$  y para concentrados de magnetita 1600 a 2300  $\text{cm}^2/\text{gr}$ .

Si se emplea una amplia gamma de distribución de tamaños para un polvo, la nucleación tomará lugar inicialmente por coalescencia en modo de preferencia y la velocidad de crecimiento llegará a un máximo, luego disminuirá por la ausencia de colisiones efectivas de partículas.

Si se emplea una distribución de intervalo pequeño, el crecimiento por capas inicialmente será por coalescencia, a medida que aumenta el tamaño de partícula también aumentará las colisiones y se van formando capas que favorecen la compresión de la pella. Las velocidades e crecimientos siempre se mantienen constantes.

#### **2. Contenido de humedad.**

La humedad tiene un efecto aglomerante en la formación de pellas verdes, influyendo en las propiedades granulométricas y mecánicas de estas. Se tienen diferentes condiciones iniciales para la formación de pellas referidos al contenido óptimo de humedad requerida:

- Mezcla de granos esta seca. Requiere añadir gran cantidad de agua.
- Pulpa filtrada que no contiene la óptima cantidad de agua. Se debe ajustar el valor.
- Pulpa filtrada que contiene el óptimo contenido de humedad.

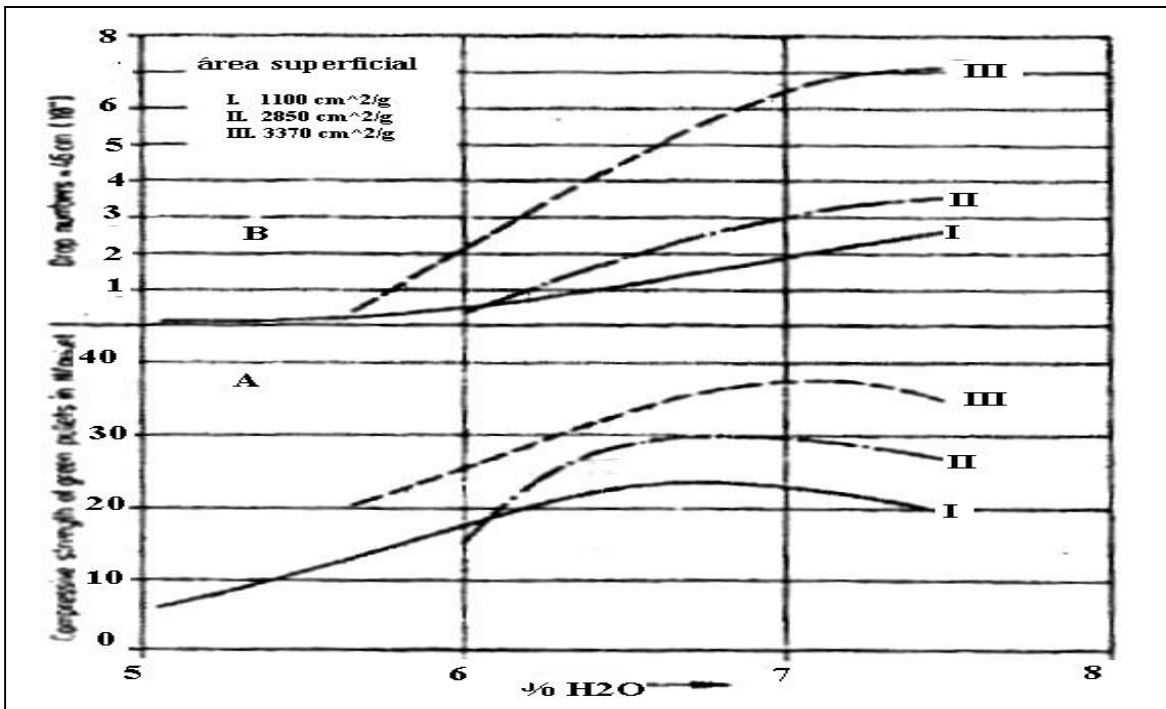


- Exceso de agua. Debe ser secado parcialmente.

El contenido óptimo de humedad tiene influencia sobre la resistencia de las pellas verdes y se hace efectiva con las adecuadas propiedades granulométricas. Debido a que existen muchos factores que influyen en la calidad de las pellas, estudiar el contenido óptimo de humedad no puede ser claramente definido, sin embargo se puede determinar experimentalmente, y es función de la porosidad del mineral, el grado de molienda y el N° de Blaine. La humedad influye notablemente en los siguientes aspectos:

- La resistencia a la compresión o trituración, esta aumenta hasta un valor máximo con una leve disminución o pérdida del agua añadida.
- La resistencia a la caída aumenta con mayores contenidos de humedad.
- Influye en las fases de crecimiento durante la formación de pellas verdes.

Figura N° 10 . A-Resistencia a la compresión. B-Número de caídas Vs. % H<sub>2</sub>O



Como se observa en la figura anterior, la resistencia de las pellas verdes aumentan con el contenido de humedad hasta un punto óptimo después del cual disminuye; el número de caídas aumenta siempre con el aumento del % de humedad. Para un mismo contenido de agua, las pellas cuyas área superficial específica es mayor tendrán resistencias muchos mayores tanto a la compresión como a la caída.

### **3. Influencia de los aditivos químicos y aglomerantes:**

El propósito, naturaleza y eficiencia de los aditivos usados en peletización pueden variar de la siguiente manera:

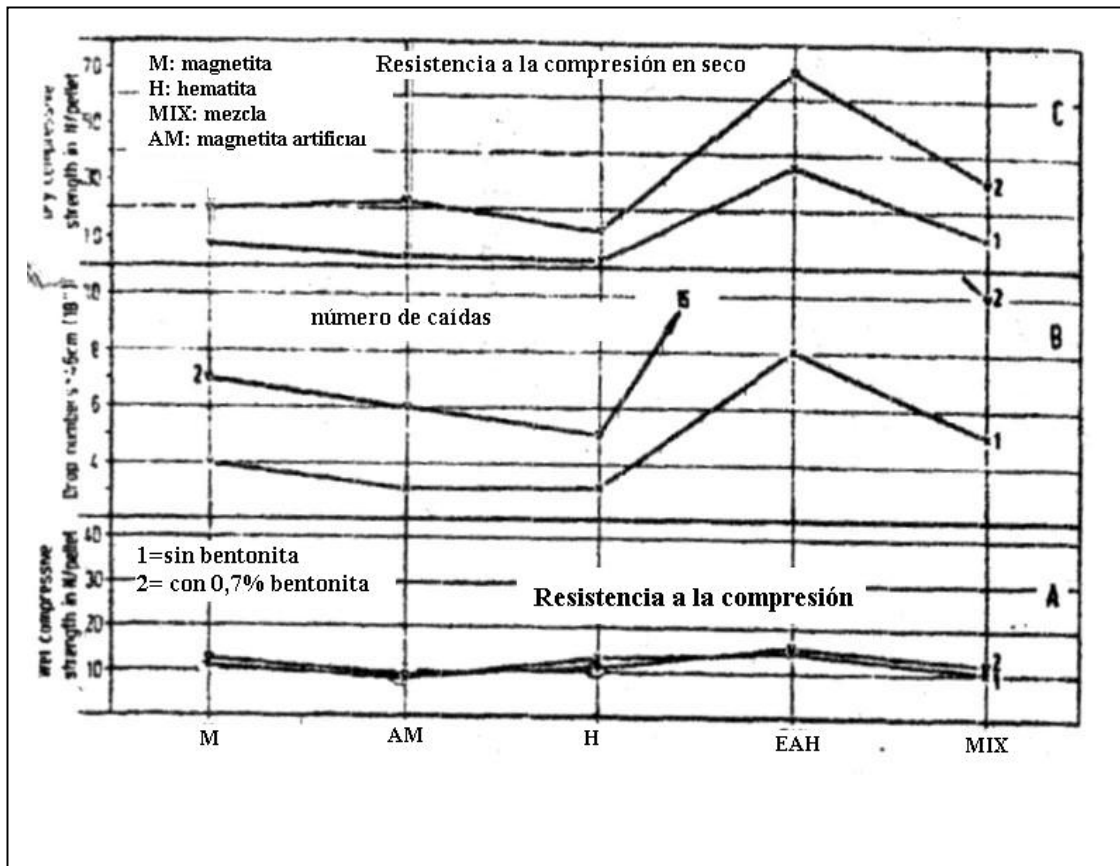
- a.- Tienen influencia en las propiedades físicas y mecánicas de las pellas verdes, secas o quemadas.
- b.- Tienen influencia sobre la composición química y propiedades metalúrgicas.
- c.- Pueden ser de tipo líquido, sólido, soluble e insolubles.
- d.- Pueden reaccionar con el agua para formar hidratos, puentes salinos o formaciones de gel con una simultanea influencia en el contenido de humedad.
- e.- Pueden formar fases con los componentes de la ganga y óxidos de hierro.

Los aglomerantes se emplean con la finalidad de favorecer, conjuntamente con el contenido de agua, la aglomeración del mineral fino. Ejemplo de ellos son la bentonita, la cal y la dolomita. Los aditivos sirven para modificar la composición química de la pella, en especial en la formación de escoria.

**Bentonita:** es un aglomerante frecuentemente utilizado en el proceso de peletización. Permite mejorar la resistencia de las pellas verdes ya que incrementa la viscosidad y la tensión superficial del agua, con lo que mejora la compactación de las pellas verdes. La bentonita está compuesta principalmente por un mineral llamado montmorillonita  $(Al,Mg)_2(OH)_2(Si,Al)_4 O_{10} \cdot nH_2O$  cuyo arreglo cristalino en capas le permite absorber grandes cantidades de agua. También posee buenas propiedades de

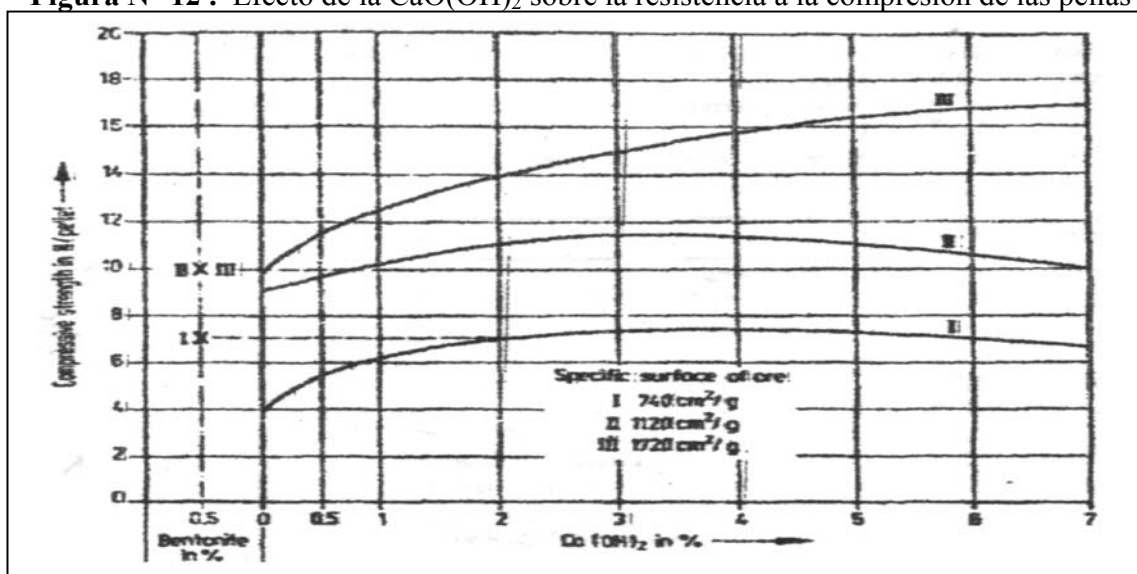
hinchamiento. La fineza de la bentonita es de aproximadamente 90% de 44 micras y con un área superficial de 800 cm<sup>2</sup>/gr.

**Figura N° 11 .** Influencia de la bentonita sobre las propiedades de las pellas



**Cal hidratada ( $\text{CaO}(\text{OH})_2$ ):** es utilizado como aglomerante y aditivo. La cal tiende a adsorber gran volumen de agua incrementado las propiedades mecánicas en las pellas, además posee una elevada área superficial específica ( $10000 \text{ cm}^2/\text{gr}$ ) con lo que se incrementa el consumo de agua y la probabilidad de contactos entre partículas.

**Figura N° 12 .** Efecto de la  $\text{CaO}(\text{OH})_2$  sobre la resistencia a la compresión de las pellas



**Figura N° 13.** Efecto de la  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  sobre la resistencia a la caída de las pellas verdes

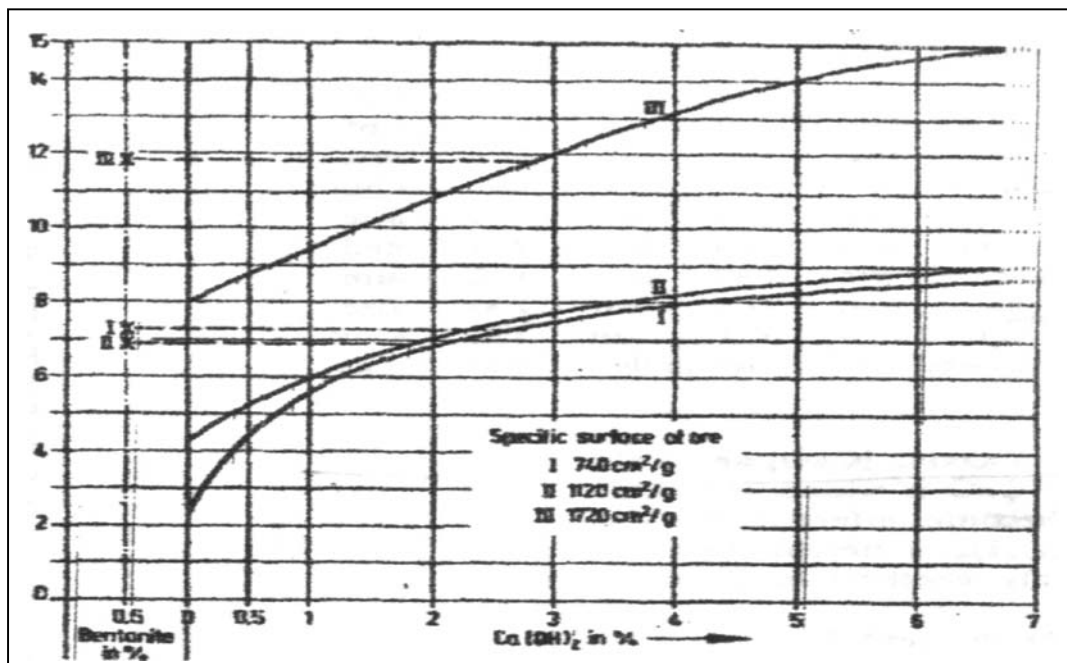
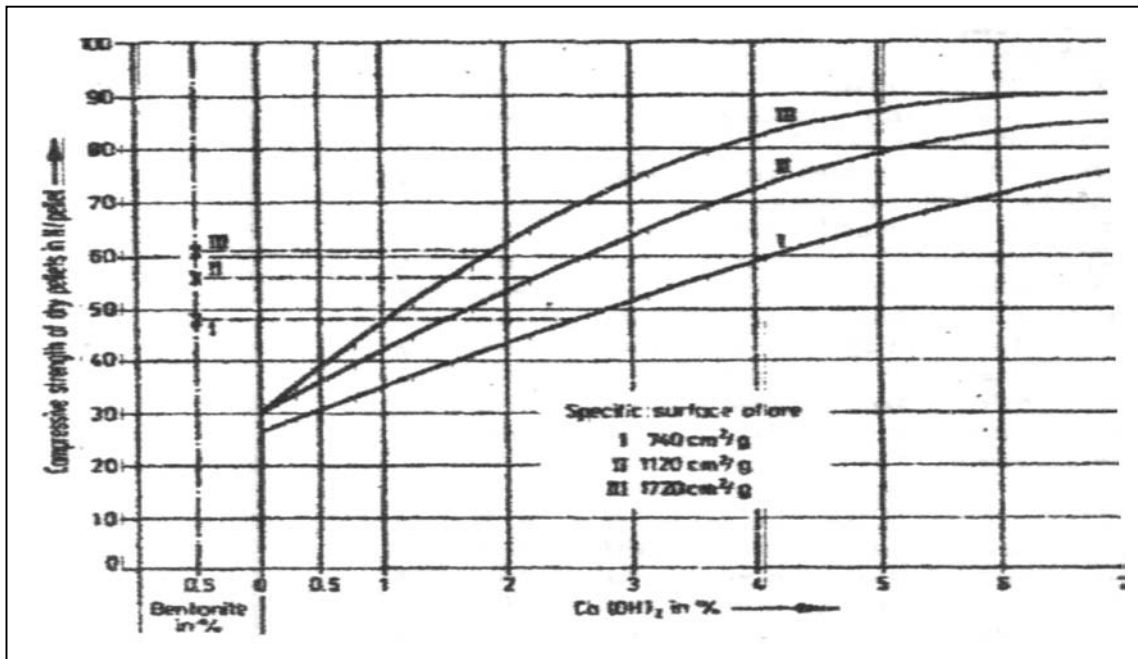


Figura N° 14. Efecto de la  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  sobre la resistencia a la compresión de las secas



#### Parte IV. Factores que intervienen en la operación del disco peletizador.

Los factores que gobiernan la operación del disco peletizador son de dos tipos: factores mecánicos y factores de proceso.

##### 1. Factores mecánicos:

1. *Inclinación del disco peletizador:* el rango común de trabajo esta entre 44 a 50°, pero la mayoría trabaja entre 45 y 47°. Este parámetro determina el tiempo de residencia de las pellas en el disco, a mayor inclinación el tiempo de residencia es menor.
2. *Velocidad de rotación:* los discos de tamaño industrial trabajan en un rango entre 4 y 7 r.p.m. A mayor velocidad el tiempo de residencia es menor, a mayor inclinación se debe trabajar con mayor velocidad.
3. *Altura de borde:* la altura de borde es el factor que determina el grado de llenado, cuando la altura es mayor el disco tiene mayor capacidad y el material permanece más tiempo en el mismo.

4. *Disposición de los raspadores:* la ubicación de los raspadores en el disco tiene una importancia vital sobre el efecto clasificador y de nucleación puesto que ellos favorecen el crecimiento de los núcleos de mineral.
5. *Área de alimentación:* el área de la alimentación del mineral debe ser opuesta al área de descarga de las pellas verdes. Cuando estas zonas están muy próximas se obtienen pellas de mayor tamaño y cuando se alejan estas zonas entonces se obtienen pellas más pequeñas.
6. *Adición de agua:* este factor ayuda a la formación de las pellas. Sin embargo debe ser en su justo valor para que no sea contraproducente. Esta adición se hace en el lugar donde esta la alimentación.

## **2. Factores de proceso:**

- 1) El grado de fineza del mineral
- 2) La rata de alimentación
- 3) Contenido de humedad.
- 4) Mineralogía del material.

### **Formación de las pellas en el disco peletizador**

Primero es necesario utilizar la mayor parte del disco para la formación de las pellas verdes. Al comienzo del trabajo, el fondo del lecho ocupará una porción por debajo del 50 % y podría elevarse hasta 90 % aproximadamente en el curso del desarrollo. Desde que comienza el proceso de peletización ocurre una clasificación de las pellas para lograr el tamaño adecuado en la descarga. Esto tiene que ver con la cantidad correspondiente de alimentación y la cantidad de pellas descargadas.

Para iniciar el proceso de peletización el disco es inclinado de tal manera que la carga de material exceda el ángulo dinámico de reposo. De acuerdo con el poder de abrasión del lecho y la resistencia a la fricción del material las partículas finas son levantadas hasta el punto de culminación desde el cual son forzadas a rodar hacia abajo por los raspadores. Por tanto las pellas son producidas en forma más temprana y ruedan hacia abajo sobre la superficie de la carga mientras se incrementa su tamaño. Los raspadores

están dispuestos de tal manera que guían la carga mientras esta rueda hacia abajo promoviendo una clasificación.

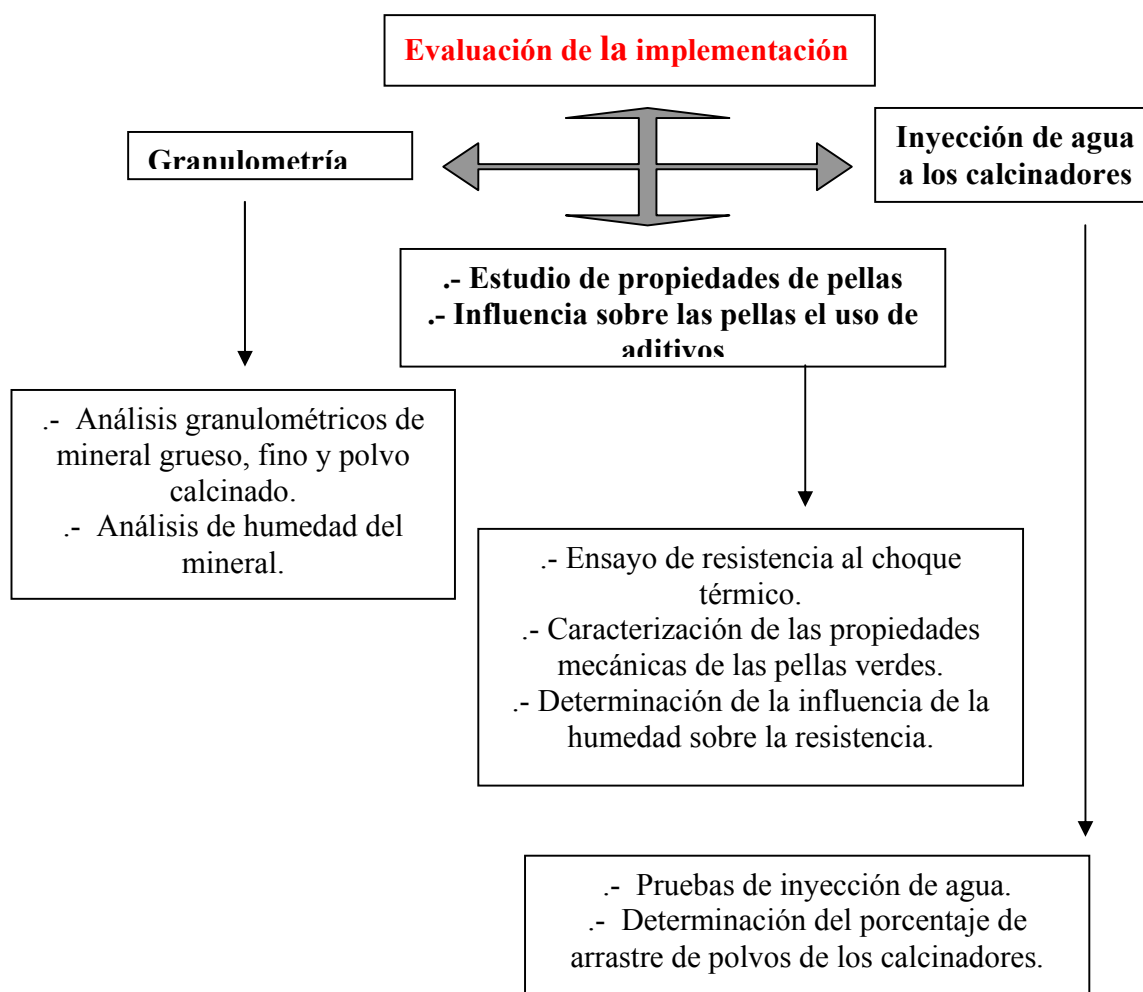
El punto de alimentación de la materia prima está localizado donde se forma los núcleos con una rotación en sentido de las agujas del reloj aproximadamente de 3 a 4 horas. Este punto puede variar para influenciar el diámetro de pellas de descarga de acuerdo a las propiedades de la mena. El agua necesaria para la formación de las pellas se agrega en el punto donde nacen los núcleos. Si se hiciera un corte transversal al disco peletizador se vería como se forman capas de acuerdo al diámetro de las pellas formadas.

## DESARROLLO EXPERIMENTAL

### CAPITULO I. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.

La metodología experimental usada se basó en la realización de una serie de pruebas, mediciones y registros de parámetros operacionales y en la evaluación de las implementaciones técnicas previstas. Los resultados obtenidos en cada una de las pruebas se estudiaron y se evaluaron en función del comportamiento del horno en los casos que involucraban al horno directamente. Las variables evaluadas y las pruebas y/o estudios realizados se presentan a continuación.

**Esquema N° 01.** Ensayos realizados en el desarrollo experimental.





En cada prueba se tomaron registros de las variables operacionales de los hornos calcinadores 01 y 02 para estudiar el comportamiento de estas ante las implementaciones en el horno; esto se lleva a cabo con la finalidad de establecer los nuevos parámetros de operación. En el caso de las pruebas de peletización se evaluaron las propiedades de las pellas producidas en planta y las elaboradas con aditivos en laboratorio.

## **CAPITULO II. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**

El procedimiento experimental utilizado depende de los ensayos realizados según la implementación tecnológica evaluado, por lo que serán expuestos de la siguiente manera:

### **Inyección de agua en la alimentación de los calcinadores.**

Consistió en introducir un sistema de inyección de agua (lanza de agua y equipo de control de flujo) en la alimentación de los calcinadores y establecer diferentes flujos de agua para determinar el comportamiento del horno y el resto del área de calcinación.

La finalidad de este ensayo fue el de disminuir el arrastre de polvos generados dentro de los hornos calcinadores y determinar el efecto de ello sobre la temperatura de los gases de salida, perfil térmico del horno, determinar el efecto de degradación de la carga (si existe) y la influencia total de estos efectos secundarios sobre la pre-reducción. Para lograr esto, se llevó a cabo una serie de ensayos que se presentan a continuación:

#### **a) Ensayo de inyección de agua**

Consistió en inyectar flujos continuos de agua de 0, 3, 5, 7 m<sup>3</sup>/h, en la entrada del calcinador, para establecer el flujo más óptimo. Se ensayaron cada uno de los flujos de manera separada. Esto fue realizado con la trituradora de rodillo en funcionamiento y con la de cono.

Posteriormente se llevo un registro de los siguientes parámetros operacionales de los hornos, con la finalidad de observar el comportamiento ante los diferentes tipo de flujos:

*Parámetros registrados:*

- a. Cantidad de pellas producidas (toneladas).
- b. Toneladas alimentadas a los calcinadores.
- c. Medición de temperatura de los polvos de salida de los calcinadores.
- d. Temperatura de los gases de salida (medidor CT17).
- e. Revoluciones del ventilador de tiro (r.p.m).
- f. Ventilador terciario # 01 y # 05 (% apertura).
- g. % Aire de Compuerta.
- h. Consumo de gas ( $\text{Nm}^3/\text{TMS}$ ).
- i. % Humedad de las pellas.
- j. % Humedad del mineral alimentado (mineral secado)
- k. Horas de operación en la condición establecida para la prueba.

Adicional, se registraron los resultados de % pre-reducción y % Pf (perdida por fuego) correspondientes a las condiciones de flujo especificadas.

**b) Determinación del % de arrastre de polvos de los calcinadores.**

Consistió en realizar un balance de masa entre las áreas de calcinación y peletización, para determinar la cantidad de polvo producido o arrastrado en la salida de los gases. Fue llevado a cabo en las diferentes condiciones de flujo de agua y con cada una de las trituradoras, por consiguiente se realizó a la par con la prueba de inyección de agua. El procedimiento para las pruebas es el siguiente:

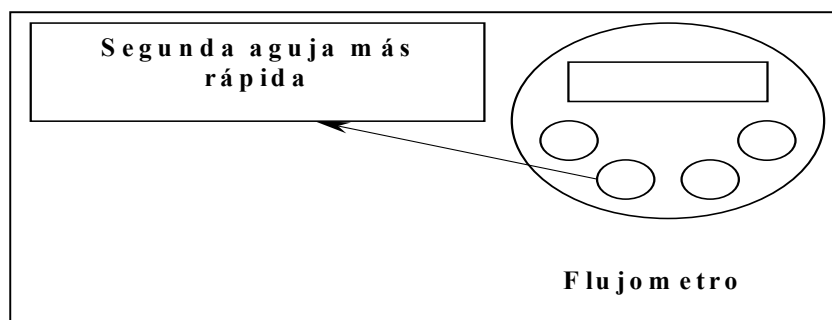
1.- Condiciones iniciales: ajustar el flujo de inyección de agua al flujo deseado, con 5 horas mínimas previas a la realización de la prueba de arrastre. Esto se lleva acabo de la siguiente manera: la segunda aguja más rápida del flujometro permitirá controlar el flujo deseado, para ello se requiere utilizar la tabla N° 02 en donde se establece el tiempo que emplea dicha aguja para dar una revolución según el flujo buscado; la llave de paso de

agua se girará de manera tal que se controle el tiempo de la segunda aguja. Esto se lleva a cabo en ambos calcinadores.

**Tabla N° 02.** Flujo de agua según el tiempo requerido por el flujometro.

<b>Flujo (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Tiempo (seg)*revolución</b>	<b>% Agua inyectado</b>
3	12	2,3
4	9	3,0
5	7,2	3,8
6	6	4,6
<b>7</b>	<b>5,14</b>	<b>5,4</b>
8	4,5	6,15
9	4	6,9
10	3,6	7,7

Ejemplo: si se requiere un flujo de agua de 7 m<sup>3</sup>/h, la llave de paso del sistema de inyección se ajustará, de manera tal, que la segunda aguja más rápida del flujometro tarde 5,14 segundos para dar 1 revolución.



NOTA: los resultados de esta prueba serán estudiados en conjunto con las granulometrías correspondientes.

2.- Antes de comenzar la prueba, se limpió completamente el patio donde se depositan las pellas en el área de peletización (disco 01 y disco 03 respectivamente). Esta limpieza se realizó con el uso de maquinarias pesadas (palas y camiones), este paso se debe realizar con

antelación para evitar pérdida de tiempo. Luego de limpiar el área no se puede producir pellas antes de comenzar la prueba de arrastre.

3.- El nivel del silo de polvo debe estar comprendido entre el 20% al 30%. Al iniciar la prueba se tomaron los valores del nivel del silo (tomar el valor cada hora durante toda la prueba, y el valor final). *Solo se puede alimentar los peletizadores con polvo de los calcinadores.* Al finalizar la prueba, el nivel del silo era el mismo al inicial, para poder desprejar los errores por generación o pérdida de masa en el sistema.

4.- Se iniciaron en cero los totalizadores de los alimentadores y se tomaron los valores cada hora durante toda la prueba, y el valor final.

5.- El muestreo se efectuó de la siguiente manera:

.- Toma de muestra en la alimentación: muestra de mineral, que corresponde a medio metro de la cinta 382-1311-02 y 03 (cinta detenida), antes de añadir el carbón. Esto es en cada línea, por separado, y cada muestra fue acumulada en 2 bolsas plásticas debidamente identificadas (una por línea).

.- Toma de muestra en la salida del calcinador: la muestra regular de calcinado caliente.

.- Ambas muestras se tomaron cada 2 horas durante el tiempo que transcurrió la prueba; al finalizar la prueba se bajaron las muestras al laboratorio para los respectivos ensayos granulométricos.

6.- Cargar esporádicamente los camiones (previamente tarados) con las pellas producidas durante la prueba y pesarlos. Al finalizar la prueba, se detuvo la producción de pellas, se debe tomar el nivel del silo y los valores de los totalizadores, cargar todas las pellas producidas y no confundirlas con las elaboradas fuera del período de prueba.

7.- En caso de tener problemas con los peletizadores, con arranque de bombas de lodo o con alimentación detenida por un largo tiempo, se tendría que detener la prueba y tomar inmediatamente todos los valores respectivos (silo de polvo y totalizadores de los alimentadores) y pesar las pellas producidas hasta el momento.

8.- Todos los datos se registraron en una plantilla, para cada calcinador y para cada prueba (véase anexo N° 07).

El balance de masa realizado entre el área de calcinación y peletización fue de tipo parcial y con la finalidad de determinar el valor numérico de la cantidad de polvo arrastrado en los calcinadores (ver figura 10). El porcentaje de arrastre de polvos se define como:

$$(\%arrastre) = \left( \frac{TMS(pellas)}{TMS(alimentadas)} \right) * 100 \quad (1)$$

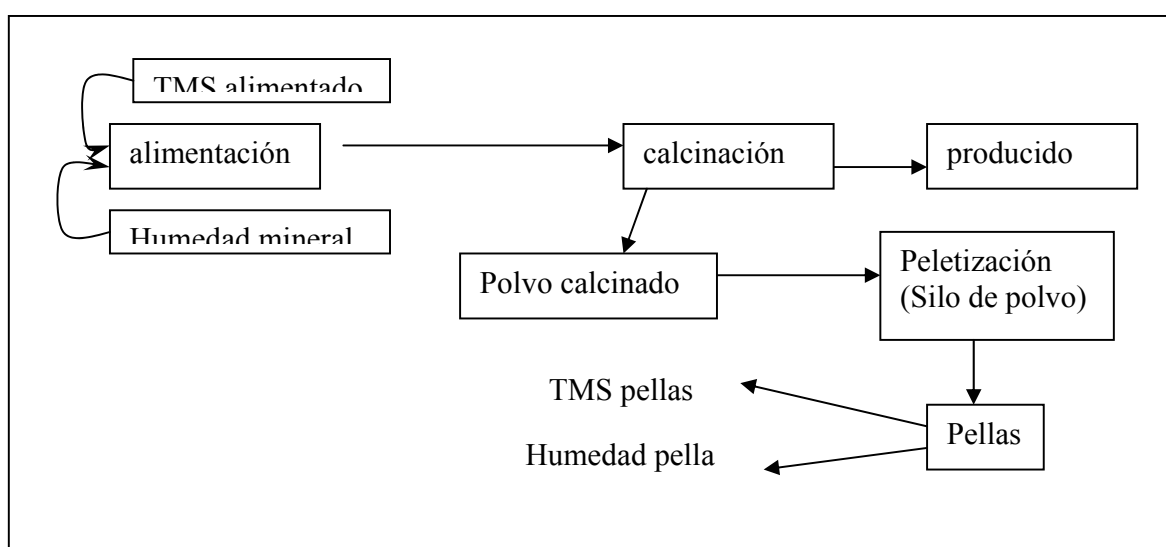
TMS (pellas): toneladas métricas secas de pellas producidas.

$$TMS(pellas) = \text{Ton pellas producidas} - \%humedad \text{ en pellas} \quad (2)$$

TMS (alimentadas): toneladas métricas secas alimentadas a los calcinadores.

$$TMS(alimentadas) = \text{Ton alimentadas} - \%humedad \text{ del mineral} \quad (3)$$

**Figura N° 15.** Esquema usado en el balance parcial de masa



## **Estudio granulométrico.**

Los diferentes estudio granulométricos realizados se llevaron a cabo con la finalidad de establecer si existe aglomeración y degradación de la carga del horno y su posible cuantificación, determinar si existe segregación en la alimentación a partir de pila seca y estudiar el rendimiento de la nueva trituradora terciaria de cono. Además los resultados de estas pruebas permiten confirmar los resultados obtenidos en los ensayos de inyección de agua.

En este sentido, se llevaron a cabo diferentes análisis esperando , de esta manera, obtener toda la información granulométrica necesaria. Estos análisis son los siguientes:

### **a) Análisis granulométrico:**

Se realizó un análisis granulométrico del mineral en la alimentación y en la salida de los calcinadores, tanto para el sistema actual de trituración terciaria basado en una trituradora de rodillos, como con la sustitución de dicho sistema por una trituradora de cono. El procedimiento realizado es el siguiente:

- 1.- Las muestras fueron divididas en dos tipos:
  - Mineral alimentado: corresponden a las muestras tomadas durante la realización de las pruebas de inyección de agua; el procedimiento de toma de muestra se explica en dicha parte. Sin embargo, los valores patrones o iniciales se obtuvieron de la base de datos de laboratorio y de pruebas anteriores realizadas.
  - Mineral calcinado: corresponden a las muestras tomadas durante la realización de las pruebas de inyección de agua; el procedimiento de toma de muestra se explica en dicho ensayo.
  
- 2.- Se realizaron tamizajes en seco y húmedo de cada acumulado diario de muestras de mineral de las pruebas de inyección. Las mallas utilizadas fueron: 100 - 50 – 37,5 – 25 –

12,5 – 6,3 – 4 – 2 – 1 – 0,5 – 0,25, todos en m.m. Los ensayos de tamizaje fueron llevados a cabo por el personal de laboratorio de la planta.

**b) Análisis de contenido de humedad:**

Fue realizado con el mineral de la alimentación y con las pellas. Este fue llevado según los procedimientos de laboratorio y que están bajo las condiciones de la norma COVENIN 1240 : 2000 (ver anexo N° 08).

**c) Estudio del rendimiento de la trituradora terciaria de cono:**

Consistió en análisis granulométricos del mineral alimentado a la trituradora terciaria, alimentación y salida de los calcinadores. Se llevó a cabo para ambas trituradoras: de rodillos y de cono, respectivamente. La toma de muestras se basó en acumulados diarios, tomados en modo de cinta transportadora detenida (medio metro de mineral en la cinta), explicado anteriormente.

Se realizaron comparaciones entre ambos sistemas y con una abertura de la trituradora de cono de 20 m.m. Adicional se registraron datos operativos en el área de calcinación y reducción para estudiar el impacto debido al cambio de granulometría.

## **Estudio de propiedades de pellas**

La finalidad de realizar un estudio de las pellas producidas en planta fue el de evaluar las propiedades de las pellas generadas en el área de peletización y establecer si éstas tiene la suficiente calidad para su incorporación en la alimentación de los calcinadores. Durante la realización de esta prueba se estudiaron las siguientes propiedades:

- Resistencia a la compresión en verde.
- Resistencia a la caída en verde
- Resistencia al choque térmico.
- Resistencia a la compresión de pellas calcinadas.
- Resistencia a la caída de pellas calcinadas

La primera resistencia evaluada fue la de la resistencia al choque térmico. Esto consistió en someter muestras de pellas, elaboradas en planta, a un perfil de temperatura similar al de los hornos calcinadores, con temperaturas iniciales de 380, 410, 450 °C, hasta 800 °C durante 3,5 horas, realizado en condiciones estáticas y en el laboratorio de la planta. El procedimiento utilizado fue el siguiente:

1.- Se tomaron muestras de pellas en el área de peletización, estas eran de tamaño uniforme comprendido entre 1,5 a 3 cm de diámetro. La naturaleza de las pellas eran de mineral fino y otras de polvo calcinado, todas ensayadas por separado.

3.- Se realizaron ensayos de:

- Resistencia a la compresión: se aplicó una presión manual a 15 pellas, de diámetros similares, entre dos placas, una correspondiente a la balanza y la otra a una lámina de metal. Se tomó el promedio de las resistencias en cada ensayo.



- Resistencia a la caída: se dejaron caer a una altura, de 100 cm. y sobre una placa metálica, 15 pellas de diámetros similares y se estableció un porcentaje de las que sobrevivieron a la caída.

2.- El resto de la muestra fue clasificada y se tomó un aproximado de 300 gr para cada ensayo. Esta fue pesada, registrado el valor y almacenada la muestra en bandeja para su uso inmediato.

3.- Se empleo una mufla a la cual se calentó a la temperatura inicial (380, 410, 440 °C). Posteriormente se introdujo la muestra correspondiente (solo pellas) y se sometió a un tratamiento térmico según el perfil del calcinador 02, que implica una temperatura final de 800 a 850 °C.

4.- Una vez enfriado el horno, las pellas calcinadas se pesaron y se determinó el porcentaje de sobrevivencia al choque térmico, de la siguiente manera:

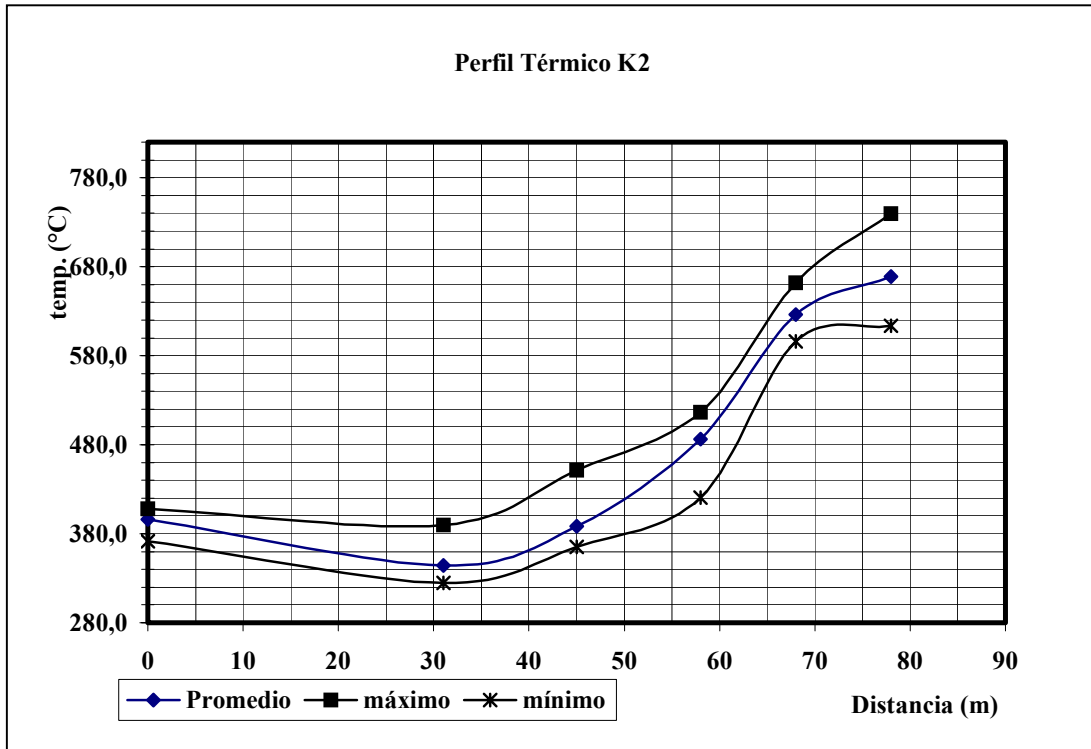
$$\% \text{ sobrevivencia} = \frac{(\text{masa inicial} - \text{masa final})}{\text{masa inicial}} * 100$$

5.- También fueron medida la resistencia a la compresión y caída de las pellas calcinadas, de la misma manera que en verde.

#### Obtención del perfil térmico del horno calcinador:

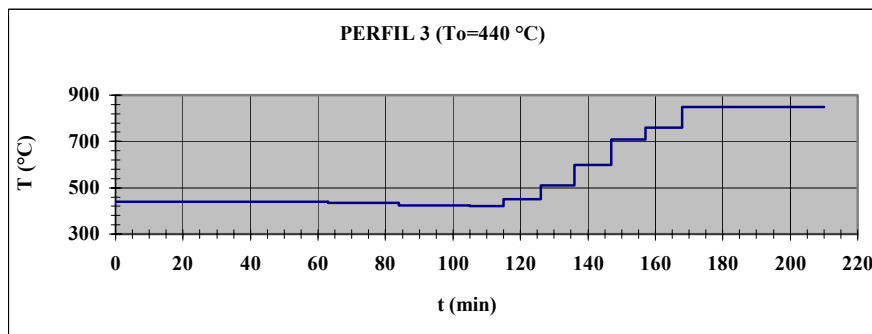
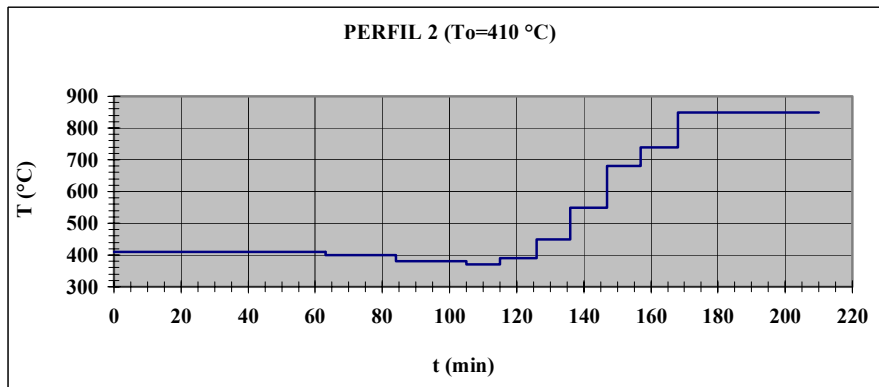
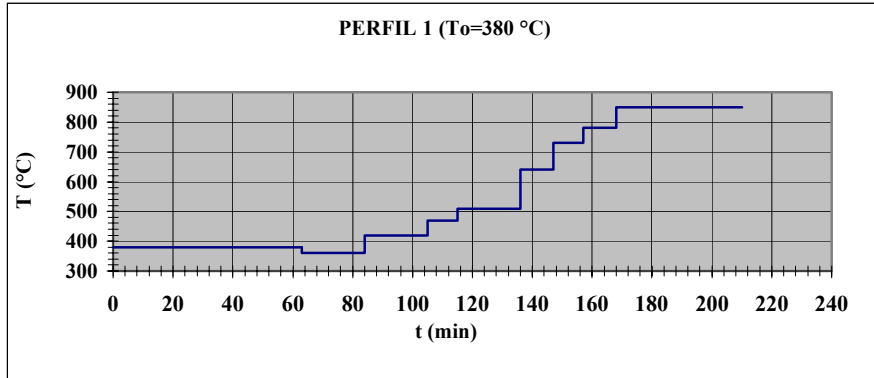
Se utilizó para ello el perfil térmico del horno calcinador 02 (K2), se registraron las temperaturas del horno mediante el sistema de control de temperatura desde la sala de operaciones de calcinación, durante varios días continuos y se determino el promedio para cada termocupla del horno, obteniéndose el siguiente perfil:

Figura N° 16. Perfil térmico del calcinador 02.



Debido a que la velocidad de calentamiento de la mufla es lineal hasta llegar al setpoint, se tuvo que realizar el calentamiento para las pruebas de manera escalonada, es decir se establece un setpoint menor durante un determinado tiempo, luego se aumenta cierta cantidad durante el tiempo respectivo y así sucesivamente hasta llegar a la temperatura final. Los siguientes gráficos nos muestran los cambios escalonados de temperatura vs. tiempo, empleados para el tratamiento térmico de las pellas a partir de las diferentes temperaturas iniciales

**Figura N° 12.** Perfiles térmicos usados durante el calcinado de pellas.



## **Determinación de la influencia sobre las propiedades de las pellas el uso de aditivos químicos.**

En el actual proceso de peletización las propiedades mecánicas de las pellas verdes son deficientes según las exigencias físicas de la planta. El número de caídas (3) y la altura de caída (desde 50 c.m. hasta 15 m aprox.), durante el transporte de las pellas al calcinador son factores que influyen en la sobrevivencia de estas. Adicional a ello una elevada temperatura de polvos en los peletizadores implica una pérdida de humedad durante la nucleación y crecimiento de pellas que se traduce como disminución de la resistencia a las caídas o impacto. A ello se añade el choque térmico que sufre las pellas al entrar al calcinador, que implica fractura y desintegración.

Estos ensayos se realizaron con la finalidad de evaluar el efecto que tiene el uso de la bentonita y la cal hidratada sobre las propiedades mecánicas de las pellas verdes y de pellas calcinadas (resistencia a la compresión y caída). Es importante destacar que las pellas elaboradas en planta difieren en propiedades, en una buena proporción, de las pellas elaboradas a nivel de laboratorio; es decir, comúnmente las pellas de planta tienen mayores valores de resistencias que las producidas en laboratorio.

Las pruebas fueron realizadas en el laboratorio de extractiva de la Universidad Central de Venezuela, y se llevó a cabo de la siguiente manera:

- Se peletizaron tres tipos de material a temperatura ambiente en un disco peletizador de 0,5 m de diámetro. El material usado fue: polvo calcinado, mineral fino y una mezcla de polvo : mineral fino a una relación de 3:1.
- Los aditivos químicos usados fueron:
  - Cal Hidratada: proveniente del silo de cal de refino, molida previamente con un tamaño pasante de 850 micras. Se usó 4% con respecto a la carga.
  - Bentonita: tipo americana y se usaron los porcentajes de 0,3% y 0,5%.

- Bentonita nacional: proveniente de tinaquillo, la cual fue secada y molida; se utilizó 1%.
- Se prepararon muestras patrones (sin aditivos) y con los aditivos químicos ya mencionados, con lo que se obtuvieron muestras de 4 kilos de 15 tipos diferentes de pellas.
- Los ensayos realizados para las pellas verdes, fueron:
  - Resistencia a la compresión: realizado en una balanza, en la cual se aplica una presión constante mediante dos placas paralelas. Se tomaron un total de 10 pellas (tamaños similares de 1,5 c.m.) para ensayar y se registro el valor promedio de resistencia
  - Resistencia a la caída: se utilizó un total de 15 pellas, ensayadas desde una altura de 1 m y sobre una placa metálica. Se registraron el número de caídas que soportaron antes de la fractura de cada pella.
- Con las pellas calcinadas se utilizó el siguiente procedimiento: se tomaron submuestras de la mezcla polvo - mineral fino ya peletizadas, posteriormente se ensayaron en condiciones dinámicas y estáticas en el horno rotatorio de reducción de pellas<sup>4</sup>, utilizando los perfiles térmicos de la figura N° 12, hasta una temperatura de 1100°C. Se utilizaron las muestras con 4% Ca(OH)<sub>2</sub>, 0,5% bentonita, 1% bentonita nacional y sin aditivos. Los ensayos realizados a las pellas calcinadas fueron:
  - Resistencia a la compresión: realizado en la máquina de ensayos universal de arenas verdes del laboratorio de fundición.
  - Resistencia a la caída: desde una altura de 50 cm y sobre una placa metálica.

---

<sup>4</sup> El horno de rotación elaborado en la tesis de grado de Maxs Ruelle y Leopoldo Rodríguez, 1985.

## RESULTADOS EXPERIMENTALES

Los resultados obtenidos en los diferentes ensayos y pruebas realizadas se presentan a continuación según el siguiente orden:

- Pruebas de inyección de agua y % arrastre de polvos.
- Comportamiento del horno ante la utilización de inyección de agua en la entrada de los calcinadores.
- Estudios granulométricos del mineral de entrada y salida de los hornos calcinadores.
- Estudio de las propiedades de pellas verdes elaboradas en planta y de pellas calcinadas en condiciones estáticas.
- Adición de aditivos químicos para mejorar la calidad de pellas verdes en el proceso de peletización de la planta (a escala de laboratorio).

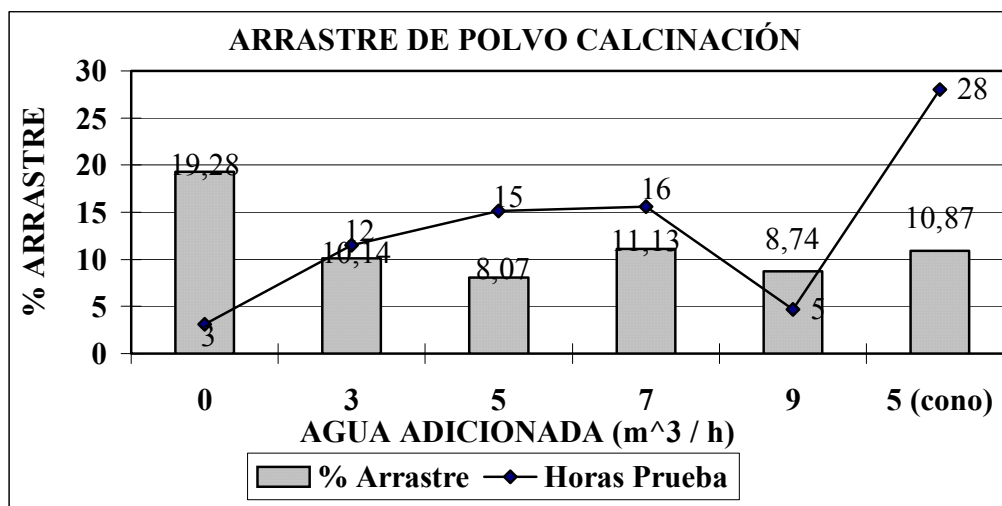
### PRUEBAS DE INYECCIÓN DE AGUA Y % ARRASTRE DE POLVOS

La siguiente tabla nos muestra los resultados promedio obtenidos de todas las pruebas realizadas para el arrastre de polvos, antes y después de la utilización de la trituradora de cono.

**Tabla N° 03. Resultados de flujo de agua Vs. % arrastre de polvos.**

<i>Flujo agua (m<sup>3</sup>/h)</i>	<i>% Arrastre</i>	<i>Total Alimentado (Ton)</i>	<i>Horas Prueba</i>
0	19,28	740,4	3
3	10,14	2760,5	12
<b>5</b>	<b>8,07</b>	<b>3630,2</b>	<b>15</b>
7	11,13	3736,5	16
9	8,74	1130,00	5
<b>5 (cono)</b>	<b>10,87</b>	<b>6728,04</b>	<b>28</b>

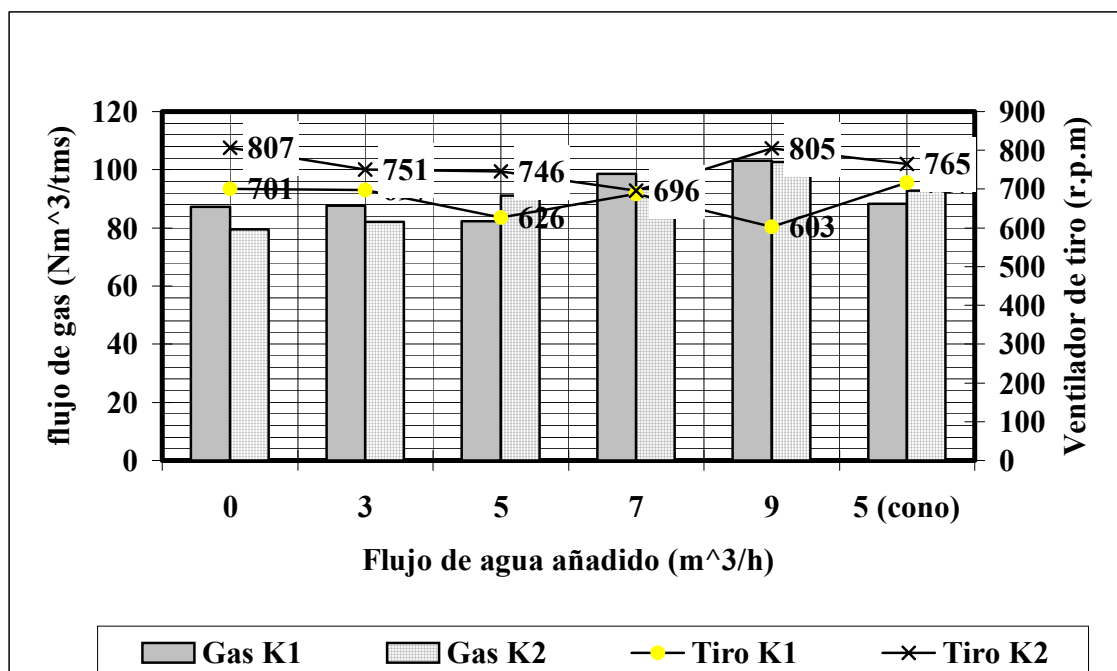
**Gráfico N° 01.** Porcentaje de arrastre de polvos Vs. Flujo de agua inyectado.



Del gráfico anterior podemos observar la influencia de la inyección de agua en la entrada de los calcinadores sobre el % de polvos arrastrados con los gases hacia el área de peletización. Se observa que a medida que el flujo de agua inyectado aumenta el porcentaje de polvos arrastrados disminuye de un 19,28% para 0 m<sup>3</sup>/h hasta un mínimo de 8,07% para un flujo de 5 m<sup>3</sup>/h (con un total de 16 horas de pruebas).

Por encima de este valor el porcentaje aumenta debido a que las condiciones del horno cambian operativamente, es decir, con la inyección de 7 o 9 m<sup>3</sup>/h el perfil térmico del horno en la entrada disminuye por lo que se requiere calentar más la sección inicial, bien sea aumentando las revoluciones del ventilador de tiro para alarga la llama, con lo que se aumenta el arrastre de finos con los gases, o aumentando el flujo de gas y disminuyendo la revoluciones del ventilador de tiro (ver gráfico N° 02) lo que tiende a producir choques térmicos en el mineral por cambios bruscos de temperatura en esta zona del calcinador. Es decir, que a medida que aumentamos el flujo de agua se requiere más gas para mantener el perfil térmico del horno, y que para evitar un sobrecalentamiento en la entrada se debe recortar la llama, reduciendo el ventilador de tiro lo que beneficia a arrastrar menos polvo con los gases.

**Gráfico N° 02.** Consumo de gas – Depresión del horno (Ventilador de tiro) Vs. Flujo de agua inyectado.



Con el uso de la trituradora de cono, el % de arrastre de polvos se incrementa desde 8,07% hasta 10,87% de arrastre; esto se debe a que el uso de la trituradora genera una mayor cantidad de finos en la alimentación de los calcinadores. El consumo de gas aumenta levemente debido a que la producción aumenta y es más continua por lo que se requiere calentar más el horno para mantener perfil térmico y así no disminuir la pre-reducción del mineral.

Al estudiar gráfico N° 03 que corresponde a la granulometría del mineral calcinado (salida de los calcinadores) podemos observar la influencia de la inyección de agua; en la entrada de los calcinadores tenemos una granulometría de 74,59% pasante de 25 m.m, y en la salida un 77,59% pasante de 25 m.m tan solo tres puntos por encima de la alimentación. También se observa que entre tamaños de 4 m.m y 0,5 m.m se incrementa el porcentaje pasante, lo que implica que existe en la condición original (0 m<sup>3</sup>/h de agua) una recuperación en la cantidad de finos entre los tamaños ya mencionados, teniendo un



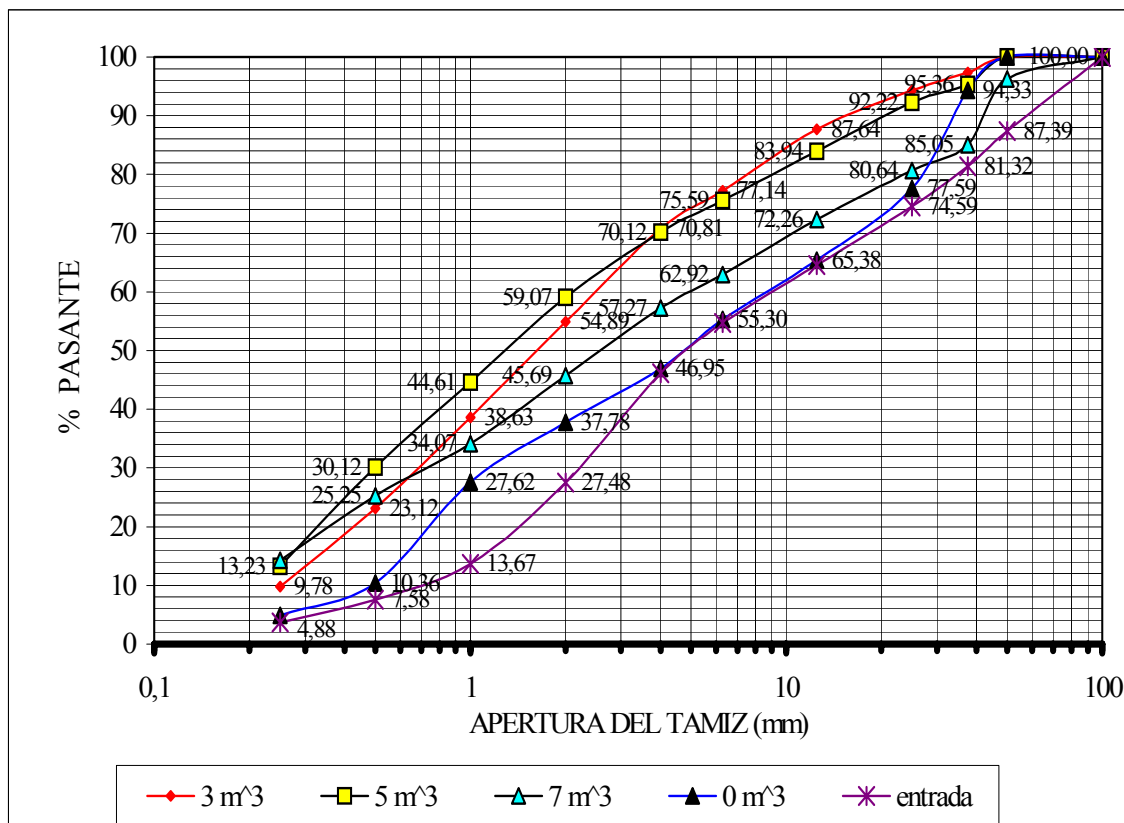
27,62% y 37,78% pasante para 1 m.m y 2 m.m respectivamente. Adicional, para 0 m<sup>3</sup>/h de agua tenemos 100% pasante 50 m.m y cuyo valor en la entrada es de 87,39% , por lo que se observa que existe una degradación del mineral dentro del calcinador posiblemente por el choque térmico.

Con el uso de inyección de agua se incrementa el porcentaje de finos recuperados en la salida del calcinador obteniéndose un 59,07% pasante de 2 m.m para 5 m<sup>3</sup>/h inyectado, un 54,89% pasante 2 m.m para 3 m<sup>3</sup>/h y un 45,69% pasante para 7 m<sup>3</sup>/h. Se observa que la inyección de 5 m<sup>3</sup>/h de agua es la condición que recupera más finos en la salida del calcinador, con un % arrastre de polvos de 8 % (tritadora de rodillos).

En la tabla N° 04, se presentan los valores obtenidos para las principales variables medidas durante la realización de las pruebas de inyección de agua a los calcinadores. En las gráficas N° 04 y 05 señalan las condiciones de aire terciario y de apertura de compuerta utilizada en cada calcinador según el tipo de flujo. El aire por compuerta se emplea para aumentar el enfriamiento de los gases de salida, en la gráfica N° 04 se observa que la temperatura de los gases de salida es mayor en el horno K2 por lo que se requiere mayor uso de la compuerta para introducir aire y enfriar más los gases, esto implica una medida falsa de la composición de los gases y un aumento del uso del ventilador de tiro.

El uso del aire terciario permite aumentar la pre-reducción ya que el horno tiene un mejor perfil reductor quemando los gases desde el inicio, por supuesto implica un aumento de los gases de salida pero un menor consumo específico de gas; en los resultados obtenidos, el aumento de agua permite cerrar el ventilador terciario en un mayor porcentaje sin alterar la pre-reducción. Según el flujo de agua inyectado no se observa una disminución de temperatura de los gases de salida para el horno 01 , por consiguiente no se logró enfriar dichos gases, en cambio en el horno 02 el uso de mayor flujo de agua implicó un aumento de la temperatura de los gases de salida . Para 5 m<sup>3</sup>/h de agua, la temperatura de los gases es la mayor, el consumo de gas aumentó levemente, el ventilador de tiro disminuyó y la pre-reducción se mantuvo con una disminución del uso del ventilador terciario.

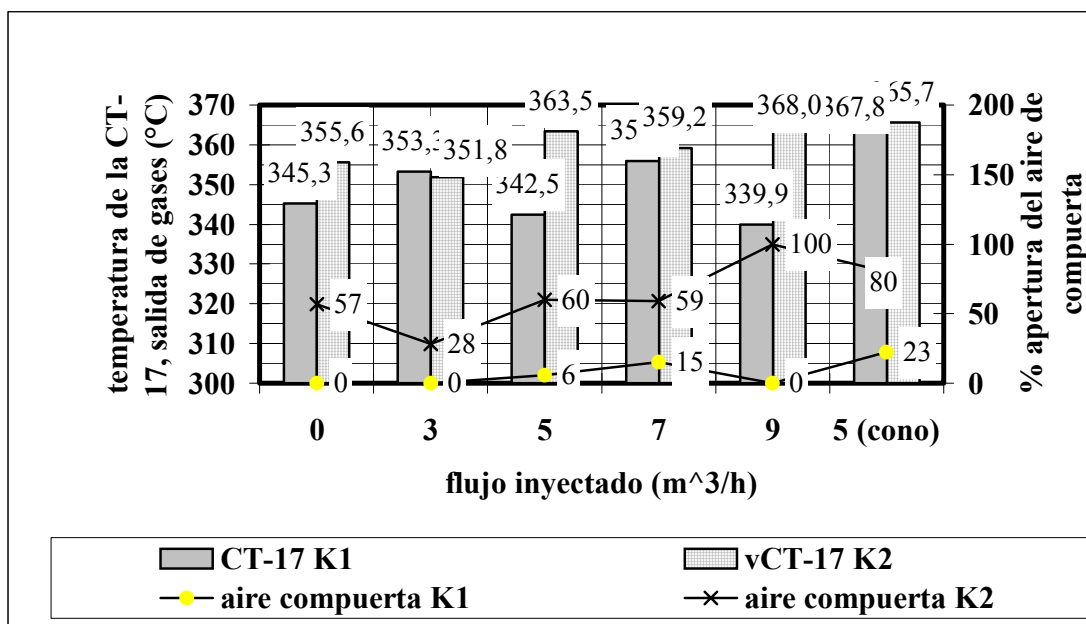
**Gráfico N° 03.** Granulometría entrada del calcinador Vs. Salida del calcinador para los diferentes flujos de agua.



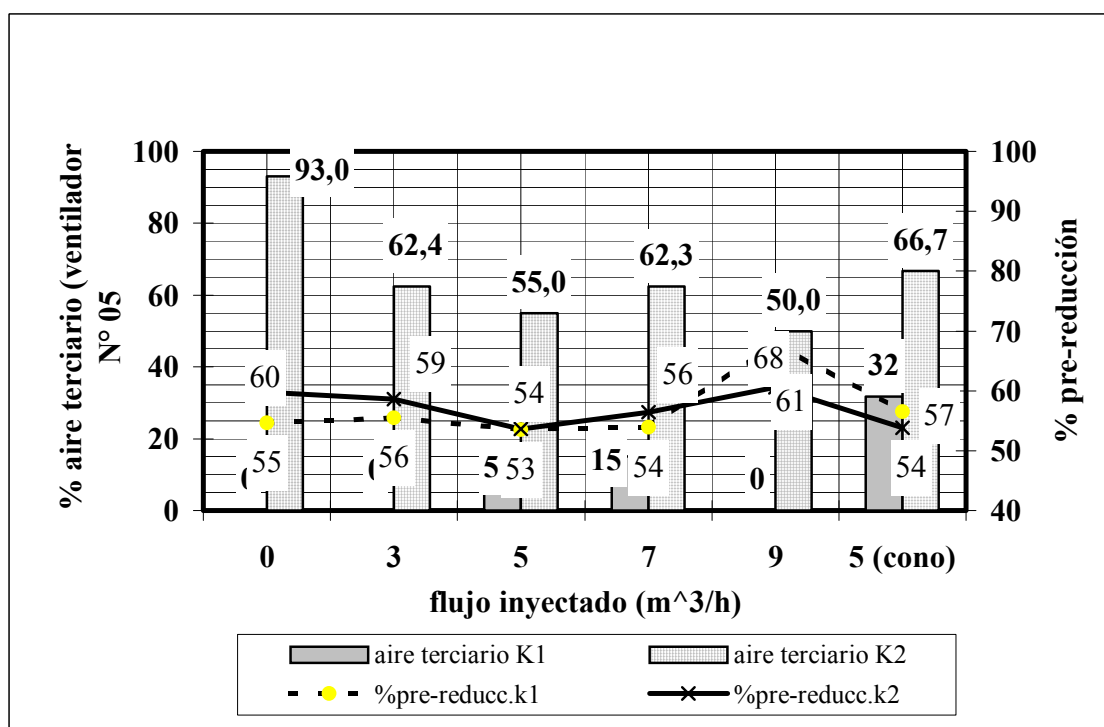
**Tabla N° 04.** Valores de los parámetros operacionales de los hornos calcinadores según el flujo de agua inyectado.

promedio	temp.gases (CT-17)		consumo gas (Nm <sup>3</sup> /tms)		%Humedad	Vent.tiro (r.p.m)		ventilador 3°- N° 05		% aire compuerta		% pre-reducción	
	K1	K2	K1	K2		PPM	K1	K2	K1	K2	K1	K2	
flujo agua													
0	345,3	355,6	87,1	79,6	20,4	701,1	806,9	0	93	0	57	54,65	59,77
3	353,3	351,8	87,6	82,1	21,2	697,1	751,3	0	62	0	28	55,53	58,58
5	342,5	363,5	82,3	91,1	20,4	626,3	746,5	5	55	6	60	53,47	53,60
7	356,0	359,2	98,6	93,4	20,6	687,9	696,1	15	62	15	59	53,98	56,42
9	339,9	368,0	103,2	102,6	20,3	603,1	805,4	0	50	0	100	67,99	60,56
5 (cono)	367,8	365,7	88,2	92,7	20,3	717,3	765,2	32	67	23	80	56,6	53,8

**Gráfico N° 04.** Temperatura de los gases de salida -% apertura de la compuerta según el flujo de agua.



**Gráfico N° 05.** % Aire terciario (ventilador N° 05) y pre-reducción según el flujo de agua inyectado para cada calcinador.



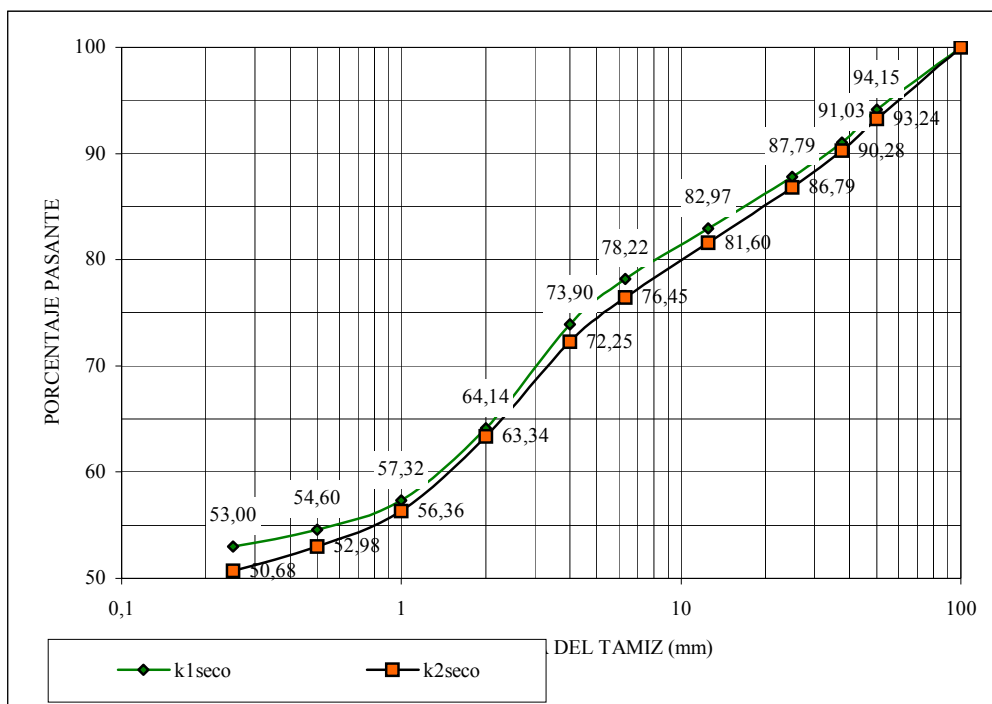
## ESTUDIOS GRANULOMÉTRICOS DEL MINERAL DE ENTRADA Y SALIDA DE LOS HORNOS CALCINADORES.

De los resultados obtenidos de los análisis granulométricos en la entrada y salida de los calcinadores, solo se utilizaron los resultados de los tamizajes en seco ya que los húmedos presentaron un alto grado de error, y se pudo determinar los siguiente:

- La recuperación de finos en la salida de los calcinadores gracias al uso de inyección de agua.
- No existen un efecto de segregación en la carga de los hornos calcinadores, entre la línea 01 y 02, proveniente de pila seca.
- Existencia de degradación por choque térmico del mineral dentro de los hornos.

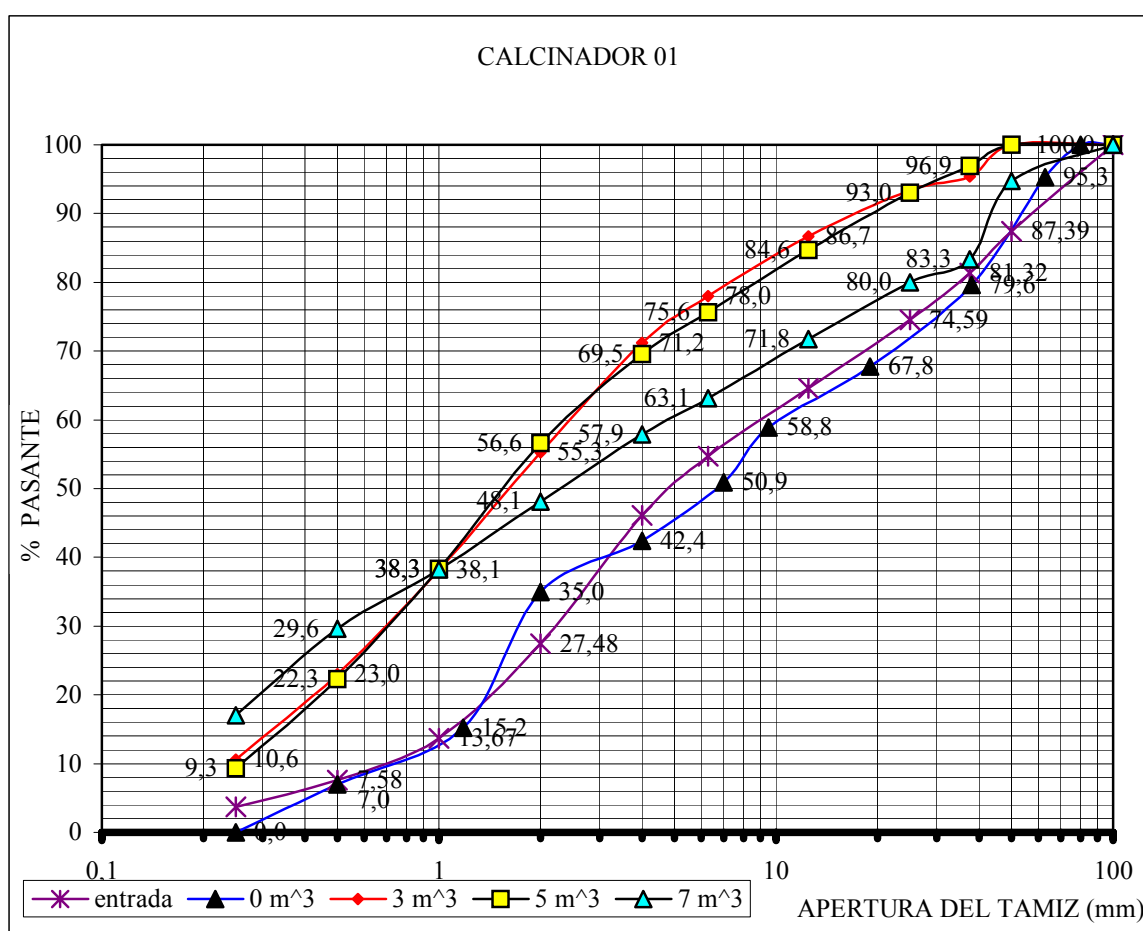
Los siguientes gráficos, nos permitió establecer de manera clara todo lo anteriormente expuesto.

**Gráfico N° 6.** Segregación de la alimentación de los hornos calcinadores.

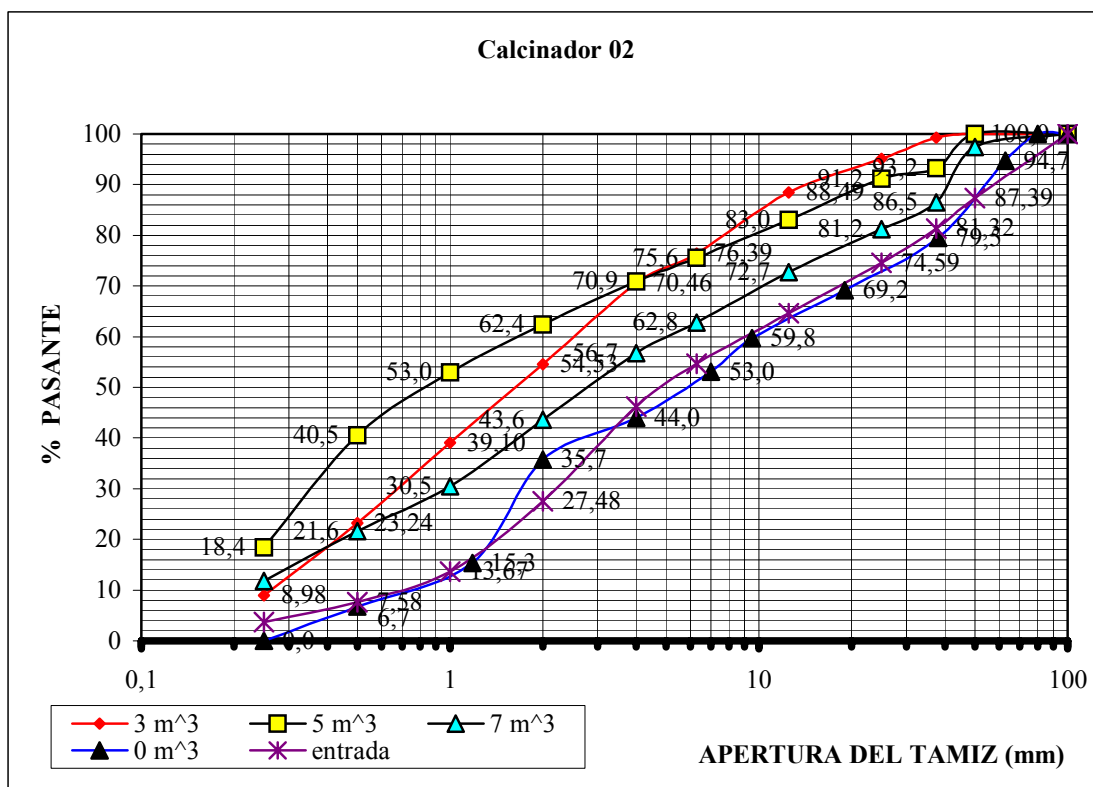


Del gráfico anterior, podemos determinar que no existe una segregación de la alimentación de los calcinadores entre la línea 01 y 02, y que por consiguiente las condiciones granulométricas son iguales en ambos calcinadores, con lo que se establece una alimentación homogénea y comportamiento de la carga similar para ambos calcinadores, es decir, que en el caso de tener mismas condiciones operacionales, la cinética de las reacciones de deshidratación y reducción serían iguales.

**Gráfico N° 07.** Análisis granulométrico del calcinador 01. Tamizaje en seco del mineral de entrada y salida del calcinador para diferentes flujos.



**Gráfico N° 08.** Análisis granulométrico del calcinador 02. Tamizaje en seco del mineral de entrada y salida del calcinador para diferentes flujos.



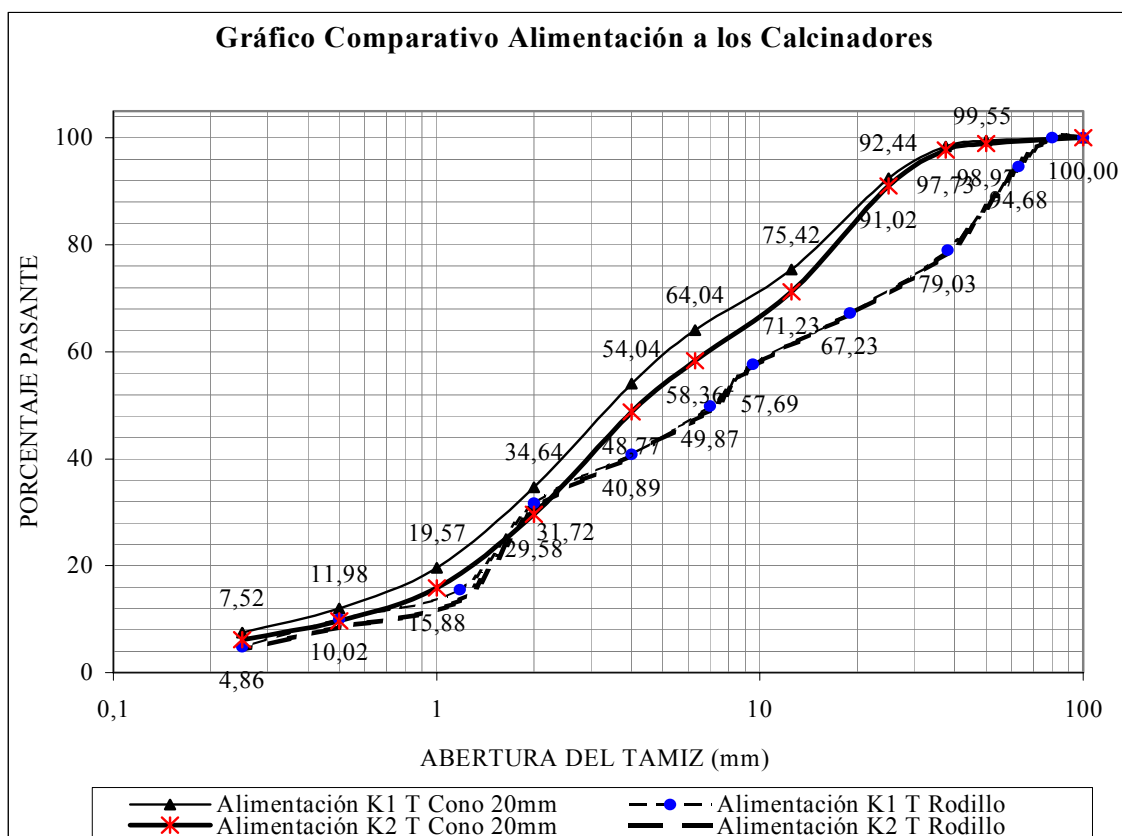
Tanto para el gráfico N° 08 y 09, la inyección de agua en la entrada de los calcinadores influye notablemente en una recuperación mayor de finos en la salida de los calcinadores. Además se observa que para 3 y 5 m<sup>3</sup>/h de agua inyectada la degradación del mineral grueso es mayor, observándose que se tiene una granulometría de la alimentación de 87% pasante de 50 m.m la cual es la misma de la salida sin la inyección de agua; mientras que con el uso de 3 y 5 m<sup>3</sup>/h y para este tamaño de partícula los porcentajes pasantes son de 100%. Con 7 m<sup>3</sup>/h el porcentaje de degradación no llega al 100% pasante de 50 m.m.

Cabe destacar que al tener mayor recuperación de finos en la salida, se obtiene un leve aumento de la producción con un porcentaje mayor de níquel, también se debe tener en cuenta que una mayor degradación de mineral dentro del horno implica una pequeña

generación de finos. A pesar de que 5 m<sup>3</sup>/h de agua inyectada generó mayor degradación y generación de finos, se disminuyó el arrastre de polvos en los gases por lo que el efecto de degradación<sup>5</sup> no tiene impacto significativo en el arrastre de polvo. También se observó que la recuperación de finos en el horno 02 es mayor (para cualquier de los tres flujos de agua inyectados) , con un 63% pasante de 2 m.m y un flujo de 5 m<sup>3</sup>/h, mientras que para el mismo flujo en el horno 01 fue de 57% pasante de 2 m.m; esto se debe a la mayor temperatura de gases de salida del horno 02.

Los siguientes gráficos corresponden al desempeño de las trituradoras terciarias (rodillo y cono).

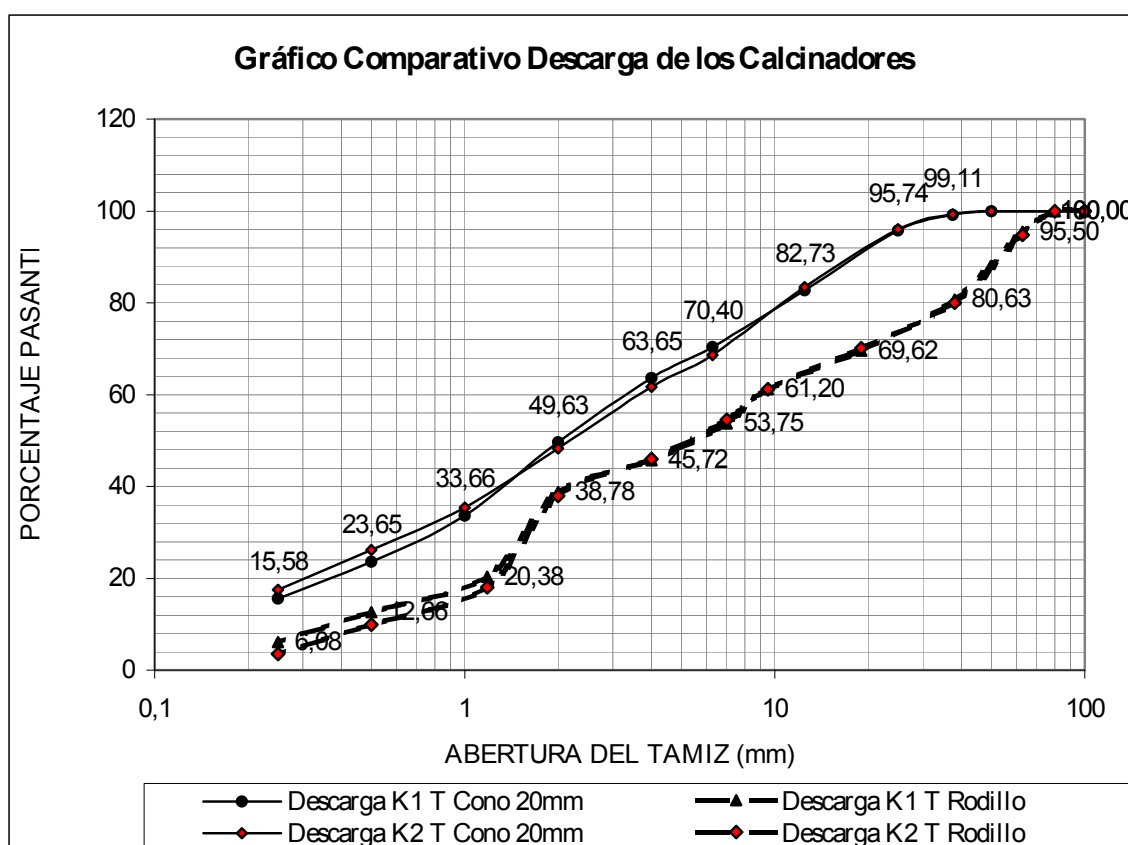
**Gráfico N° 09.** Alimentación de los calcinadores con Trituradora de cono (abertura de 20 m.m) y trituradora de rodillo



<sup>5</sup> La degradación se produce con mayores temperaturas de gases de salida.

En este gráfico se presenta la granulometría obtenida para la alimentación de los calcinadores según el tipo de trituradora terciaria empleada. Se observó que con el uso de cualquiera de ambas trituradoras no se produce segregación en pila seca y por ende en la alimentación de calcinación. También se puede observar un mayor aumento de la reducción de tamaños entre 2 m.m y 60 m.m para la trituradora de cono, mientras que la generación de finos menores a 2 m.m se mantiene constante, aunque siempre con un porcentaje algo mayor para la trituradora de cono. Esta reducción implica un aumento en la producción y en la rapidez de la cinética de las reacciones dentro del horno calcinador

**Gráfico N° 10.** Salida de los calcinadores con trituradora de cono (abertura de 20 m.m) y trituradora de rodillo



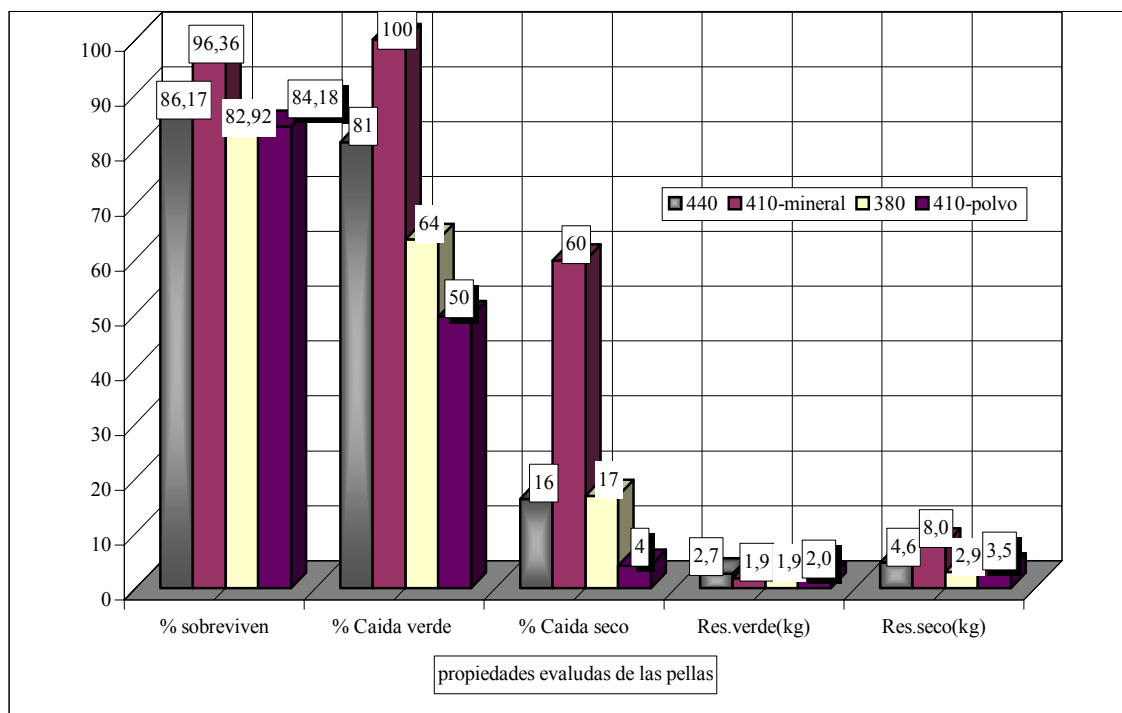


En este gráfico se puede apreciar nuevamente que no existe segregación en la carga para ambos calcinadores, lo que sí se observa es una mayor recuperación de finos para la trituradora de cono, esto se debe a que estos resultados están influenciados por la inyección de agua (5 m<sup>3</sup>/h) en la entrada de los calcinadores que disminuyó el arrastre de polvos de un 13% a un 9 % aproximadamente.

### ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES DE PELLAS VERDES ELABORADAS EN PLANTA Y DE PELLAS CALCINADAS.

Una vez ensayadas las pellas en verdes, y sometidas a los perfiles térmicos señalados en el procedimiento experimental correspondiente, se obtuvieron los siguientes resultados:

**Gráfico N° 11.** Propiedades de las pellas elaboradas en planta. (sin aditivos), según la temperatura inicial del choque térmico.



En el gráfico anterior podemos observar el efecto de la temperatura sobre el % de sobrevivencia al choque térmico (pellas no fracturadas) de las pellas después de haberse sometido a los perfiles térmicos en condiciones estáticas. A medida que la temperatura aumenta el %sobrevivencia disminuye teniéndose que para una temperatura inicial de 380 °C se obtuvo un 86%, y para 440 °C un 76 % de sobrevivencia, esta nos da una medida de cuanto polvo se genera en el calcinador tan solo por introducir pellas de la calidad de la planta, es decir si alimentamos 15 Ton/h por calcinador generamos un 24% mínimo en polvo para una temperatura de 440 °C, que recircula en el proceso, esto es equivalente a 7,2 Ton/ h entre ambos calcinadores, el cual tiene un tenor promedio de 2,1% de níquel.

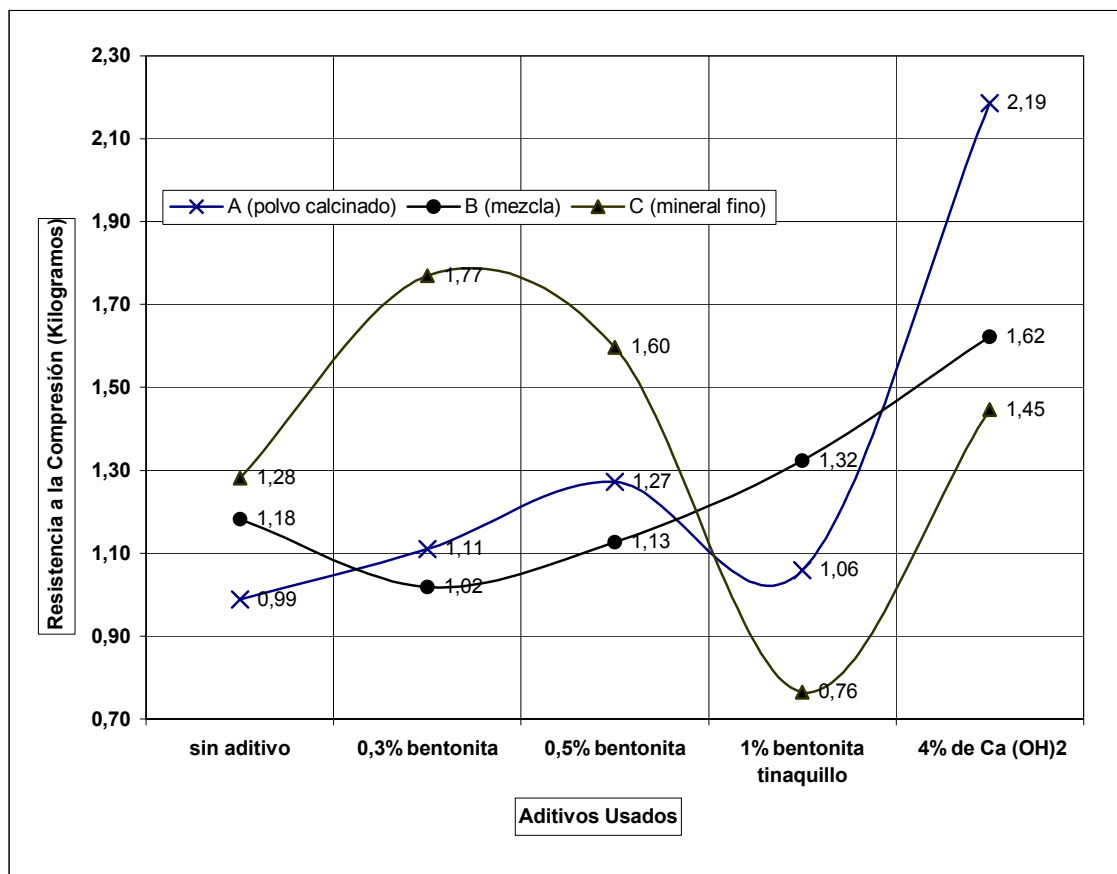
Con respecto a la resistencia a la compresión en verde tienen un promedio de 2 Kg. y que después de calcinadas levemente aumenta hasta un máximo de 4,6 Kg. para una temperatura de ensayo de 440 °C. Con mayores temperaturas de entradas o de choque se generan mayores resistencias mecánica a la compresión, esto se debe a que se originan mayores esfuerzos residuales dentro de la estructura de la pella lo que permite aumentar levemente la resistencia. La resistencia a la caída disminuye debido a que se genera pérdida del agua capilar y absorbida como humedad e hidratos y no se establecen enlaces o puentes lo suficientemente fuertes.

También se observó que las pellas de mineral fino presentaron propiedades mecánicas mejores que las de polvo calcinado, esto fue tanto en verde como en calcinadas. Se obtuvo un 100% de resistencia la caída en verde y un 60% calcinadas, el % de sobrevivencia fue de un 96% (a una temperatura inicial de 410 °C) mucho mayor que las de polvo. Luego de calcinadas se obtuvo hasta 8 Kg. de resistencia a la compresión. Esta mejora en la resistencia se debe a que las pellas de mineral fino se peletizan a temperatura ambiente por lo que los puentes producidos por las fuerzas de cohesión y adhesión son más resistentes que en las pellas de polvo calcinado (temperatura promedio de peletización de 96 – 110 °C), y también a una distribución de tamaños más amplia.

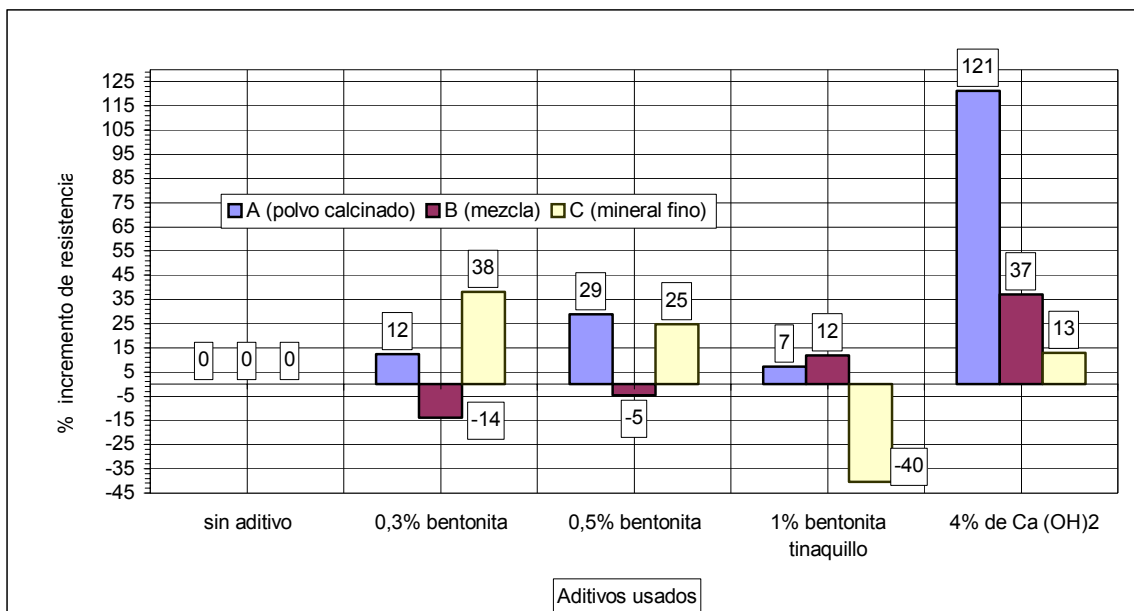
**ADICIÓN DE ADITIVOS QUÍMICOS PARA MEJORAR LA CALIDAD DE PELLAS VERDES EN EL PROCESO DE PELETIZACIÓN DE LA PLANTA (A ESCALA DE LABORATORIO).**

Los siguientes resultados corresponden a las pellas elaboradas en el laboratorio con los diferentes tipo de aditivos usados. Cabe destacar que la peletización con 7% de cal no se pudo llevar a cabo, debido a que el material nunca logró peletizar con este porcentaje.

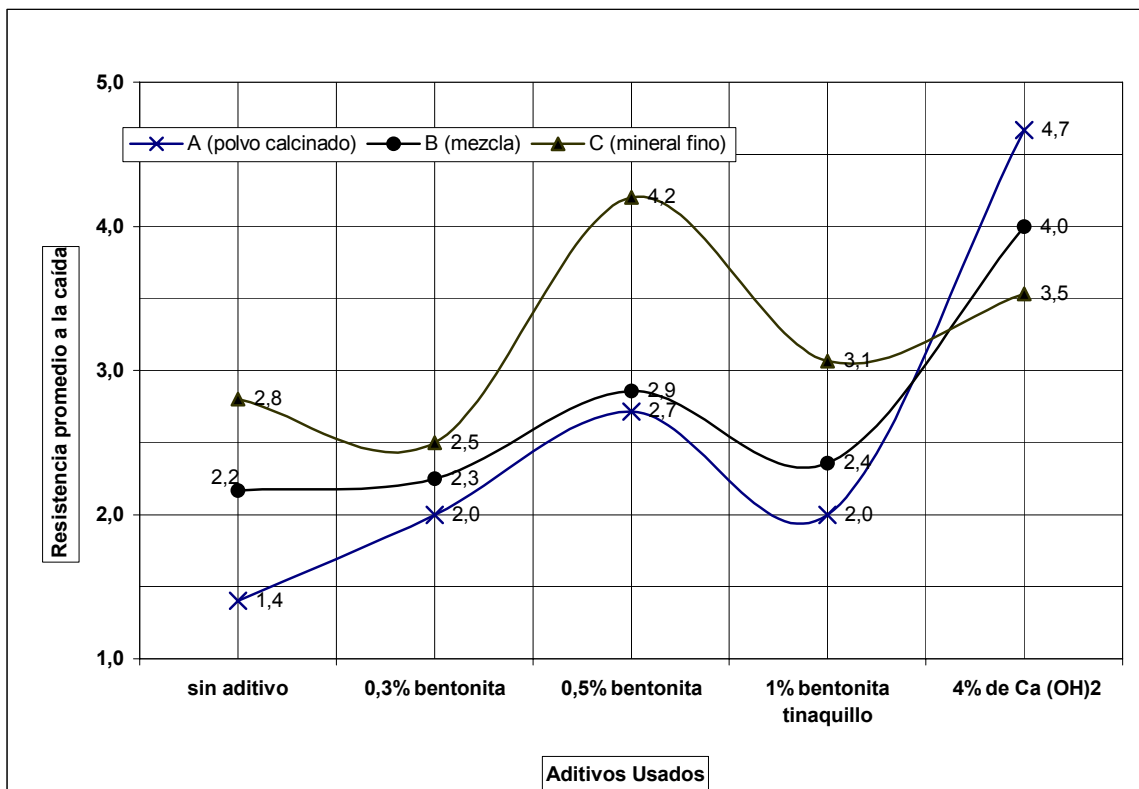
**Gráfico N° 12.** Resistencia a la compresión de las pellas verdes en función de los aditivos químicos usados.



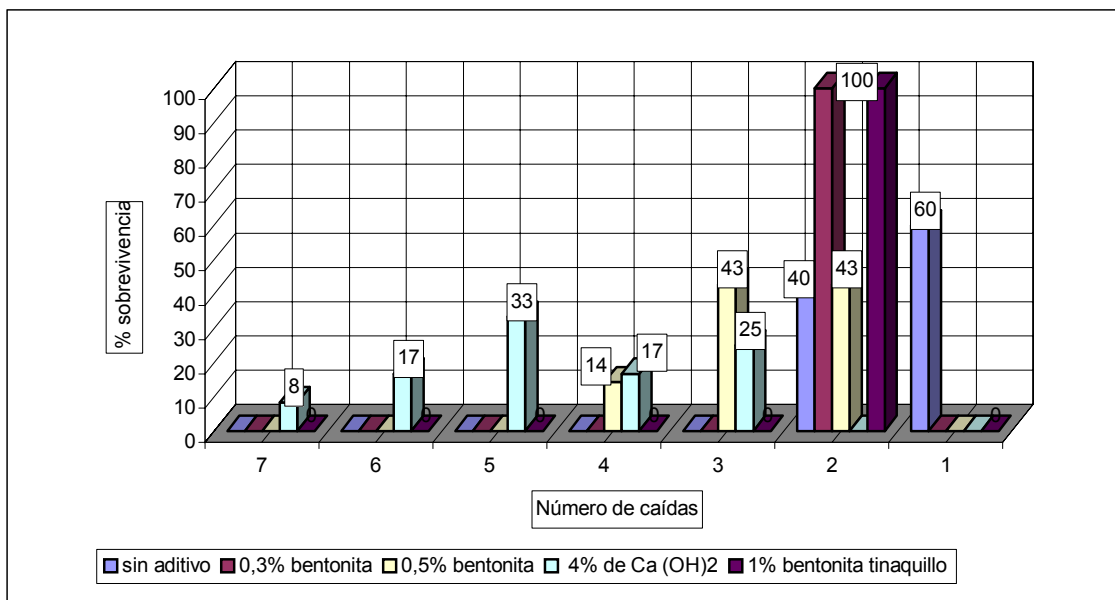
**Gráfico N° 13.** Resistencia a la compresión de las pellas verdes (% incremento de la resistencia) Vs. Aditivos químicos usados.



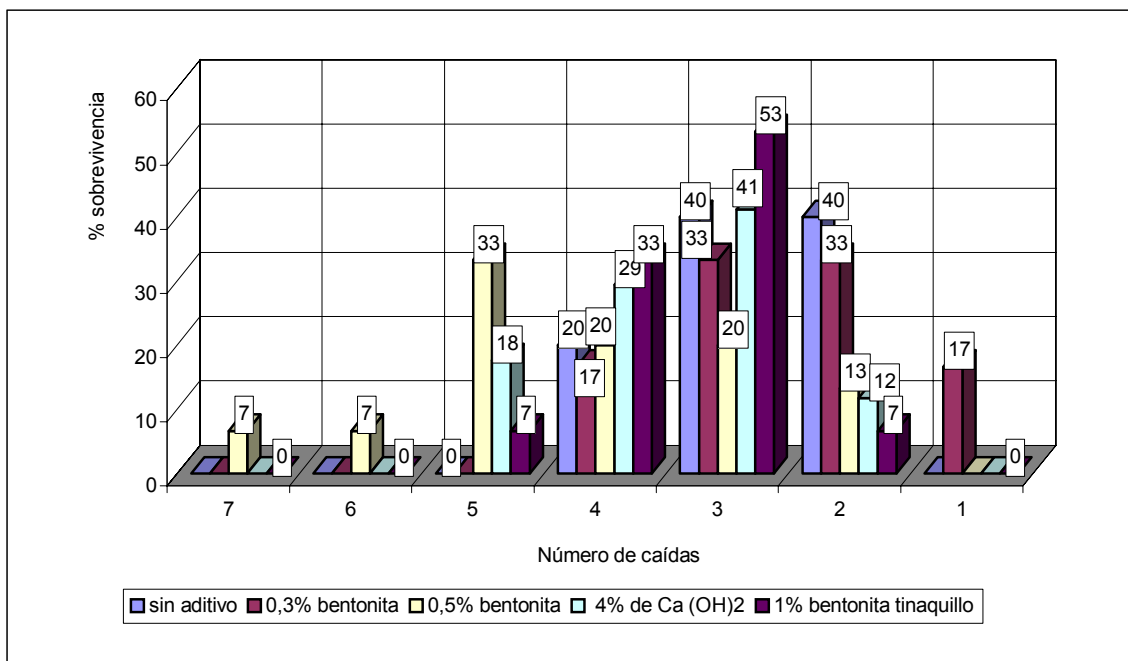
**Gráfico N° 14.** Número promedio de caídas de las pellas verdes Vs. Aditivos Químicos



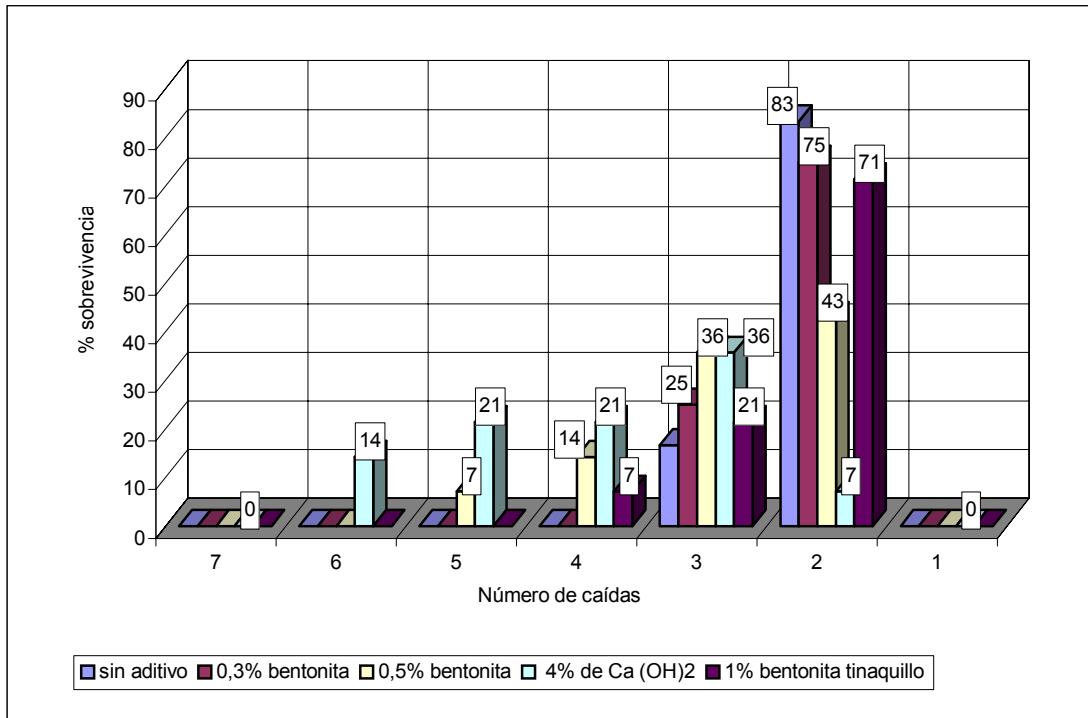
**Gráfico N° 15.** % Supervivencia a la caída para pellas de polvo calcinado en función del número de caída y el tipo de aditivo empleado



**Gráfico N° 16.** % Supervivencia a la caída para pellas de mineral fino en función del número de caída y el tipo de aditivo empleado



**Gráfico N° 17.** % Supervivencia a la caída para pellas de mezcla: polvo calcinado-mineral fino, en función del número de caída y el tipo de aditivo empleado



**Tabla N° 05.** Resistencia a la compresión de las pellas verdes según la mezcla y aditivos usados.

tipo de aditivo	resistencia compresión (kg)			% diferencia (incremento de resistencia)		
	A (polvo calcinado)	B (mezcla)	C (mineral fino)	A (polvo calcinado)	B (mezcla)	C (mineral fino)
sin aditivo	0,99	1,18	1,28	-	-	-
0,3% bentonita	1,11	1,02	1,77	12	-14	38
0,5% bentonita	1,27	1,13	1,60	29	-5	25
1% bentonita tinaquillo	1,06	1,32	0,76	7	12	-40
4% de Ca (OH)2	2,19	1,62	1,45	121	37	13

**Tabla N° 06.** Resultados de los ensayos de caída de pellas verdes según la mezcla y aditivos químicos usados.

	Número de caídas							% RESISTENCIA CAIDA								
tipo de material	A (polvo calcinado)							A (polvo calcinado)								
número de caídas	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7	máximo	promedio
sin aditivo	9	6	-	-	-	-	-	60	40	-	-	-	-	-	60	50
0,3% bentonita	-	12	-	-	-	-	-	-	100	-	-	-	-	-	100	100
0,5% bentonita	-	6	6	2	-	-	-	-	43	43	14	-	-	-	43	33
1% bentonita tinaquillo	-	2	-	-	-	-	-	-	100	-	-	-	-	-	100	100
4% de Ca (OH)2	-	-	3	2	4	2	1	-	-	25	17	33	17	8	33	20
tipo de material	B (mezcla)							B (mezcla)								
número de caídas	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7	máximo	promedio
sin aditivo	-	10	2	-	-	-	-	-	83	17	-	-	-	-	83	50
0,3% bentonita	-	9	3	-	-	-	-	-	75	25	-	-	-	-	75	50
0,5% bentonita	-	6	5	2	1	-	-	-	43	36	14	7	-	-	43	25
1% bentonita tinaquillo	-	10	3	1	-	-	-	-	71	21	7	-	-	-	71	33
4% de Ca (OH)2	-	1	5	3	3	2	-	-	7	36	21	21	14	-	36	20
tipo de material	C (mineral fino)							C (mineral fino)								
número de caídas	1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7	máximo	promedio
sin aditivo	-	6	6	3	-	-	-	-	40	40	20	-	-	-	40	33
0,3% bentonita	2	4	4	2	-	-	-	17	33	33	17	-	-	-	33	25
0,5% bentonita	-	2	3	3	5	1	1	-	13	20	20	33	7	7	33	17
1% bentonita tinaquillo	-	1	8	5	1	-	-	-	7	53	33	7	-	-	53	25
4% de Ca (OH)2	-	2	7	5	3	-	-	-	12	41	29	18	-	-	41	25

En los gráficos N° 12 y 13 podemos observar el efecto que tuvo la utilización de aditivos químicos sobre la resistencia mecánica de las pellas verdes. Se pudo observar que en las pellas sin aditivos el promedio de la resistencia está en 1,15 Kg en donde la materia prima de mineral fino obtuvo la mayor resistencia con un valor de 1,28 Kg y el polvo calcinado el menor valor de compresión.

La utilización de bentonita en un 0,3 % mejoró la condición para el polvo calcinado y para mineral fino en un 12 y 38% con respecto a la condición inicial. Con 0,5 % de bentonita americana las pellas de polvo y de mineral mejoraron con respecto a las iniciales, sin embargo, la mezcla de solo mineral y 0,3% de bentonita fino disminuyó su valor con respecto al patrón.

Con el uso de bentonita de tinaquillo no se obtuvo resultados significativos, se obtuvieron las mismas compresiones e incluso pérdida de la compresión. Esto se debe a que este tipo de bentonita no presenta hinchamiento y por ende baja plasticidad, a pesar de tener un alto poder de absorción de agua.

El uso de cal hidratada permitió incrementar en cualquiera de las tres condiciones (pellas polvo calcinado, pellas mineral fino y pellas mezcla) la resistencia a la compresión, a tal punto que se incrementaron en un 121%, 13% y 37% respectivamente, obteniéndose un máximo de resistencia promedio de 2,19 Kg.

Si analizamos por el tipo de materia prima se tiene que para el polvo calcinado la máxima resistencia se obtuvo con la cal hidratada (4%); para las pellas de mineral fino el uso de bentonita (0,3%) y para la mezcla polvo: mineral fino el emplear  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  se obtienen los mejores resultados.

El incremento notable de la resistencia a la compresión que se obtuvo por la adición de cal hidratada se debe a su alta capacidad de absorción de agua y a su alta área superficial específica. En promedio de las tres condiciones la cal presenta el mejor incremento de resistencia.

Con el gráfico N° 14 se observó el número de caída promedio que soporta las pellas verdes según la materia prima usada. El uso de bentonita al 0,3% no mejoró la resistencia, esto se debe a que la mezcla de bentonita con el mineral secado (20% humedad y granulometría muy gruesa para peletización) solo permite que predomine el mecanismo de nucleación y el crecimiento por capas de la pella se hace muy lento, esto es por que una vez formado el núcleo el mineral mezclado con la bentonita se sobresatura de agua dejando de ser permeable y disminuyendo la capacidad de crecimiento, por consiguiente solo el mecanismo de adherencia por choque de núcleos permite el crecimiento. Este mecanismo a pesar de presentar buena influencia en la resistencia mecánica (deja esfuerzos residuales de compresión), produce una alta porosidad con poros muy grandes por lo que la resistencia a la caída disminuye.



Con el uso de 0,5% de bentonita solo se logró incrementar a un número de 4-5 caídas para la mezcla de mineral, esto se debe a una mayor cantidad de bentonita que requiere más absorción de agua y da mayor plasticidad a la estructura interna de la pella. En las demás condiciones no se obtuvieron resultados positivos, ya que las características granulométricas del polvo calcinado no permite establecer enlaces suficientemente fuertes. Con la bentonita de tinaquillo se obtuvo el mismo comportamiento de la resistencia, sin embargo, en este caso el crecimiento de las pellas si se llevo a cabo por capas.

La adición de cal hidratada incremento el número de caídas promedio hasta 4,7 – 4 - 3,5 para polvo calcinado, mineral fino y mezcla polvo: mineral. Esto es gracias a la alta área superficial específica de la partícula de cal que permite establecer mayores puntos de contacto para la nucleación y crecimiento de las pellas, adicional a ello se tiene una alta capacidad de absorción de agua que mejora la resistencia al impacto.

En los gráficos N° 15, 16 y 17, observamos la distribución del porcentaje de sobrevivencia de las pellas según el número de caídas y el aditivo empleado, para el polvo calcinado, el mineral fino y la mezcla ya mencionada (un gráfico por tipo de materia prima).

Debido a que las pellas, durante su transporte en planta, tiene 3 puntos de descarga, solo la condición de 4% de cal hidratada y 0,5 % de bentonita para polvo calcinado cumplen este requerimiento, con un 100% para la cal (7 caídas máximas con 8%) y un 57 % entre 3 y 4 caídas.

Con la mezcla de mineral fino y polvo calcinado, la mejor condición la presenta el uso de cal que tiene un máximo de 6 caídas con 14 % y el 93% soportan las tres caídas. La bentonita (0,5%) mejora también la calidad de las pellas pero solo con un máximo de 7% para 5 caídas.

Para las pellas de mineral fino, todas las condiciones mejoran y pasan las tres caídas, pero solo la cal hidratada permite llegar a 7 y 6 caídas con un 14% acumulado.

Cabe destacar que las pellas de calcinado sin aditivos son las que presentan las peores propiedades en verdes y que con el uso de cal mejoran apreciablemente, tanto la resistencia a la compresión como a la caída. Operativamente la cal presentó menos problemas con los raspadores solo implicó un mayor consumo de agua; con las bentonitas en sus diferentes concentraciones se presentaron problemas con el empegostamiento y acumulación de material en los raspadores.

Un aspecto muy importante es la velocidad de peletización de las diferentes mezclas, ya que de ello depende la rapidez con que se fabrican las pellas y por consiguiente influye en la producción horaria de peletización. La bentonita tanto americana como nacional presentaron las mejores velocidades de peletización, excepto en el caso de mezcla mineral-polvo y bentonita americana donde la rapidez cayo al mínimo entre todas las condiciones. La cal hidratada presento velocidades de peletización muy lentas, siendo esta la menor, en cualquiera de las materia primas, con respecto a los otros aditivos.

En las propiedades mecánicas de las pellas después de calcinadas , la resistencia a la compresión aumentó hasta un valor promedio de 20 kg; la resistencia a la caída varió demasiado ya que algunas pellas (sin importar el tipo de aditivo) sinterizaron parcialmente por lo que no fracturaron con las caídas, mientras las que no presentaron sinterización, fracturaron en la primera caída. La siguiente tabla nos muestra la variación de la resistencia a la compresión de las pellas calcinadas según el aditivo usado.

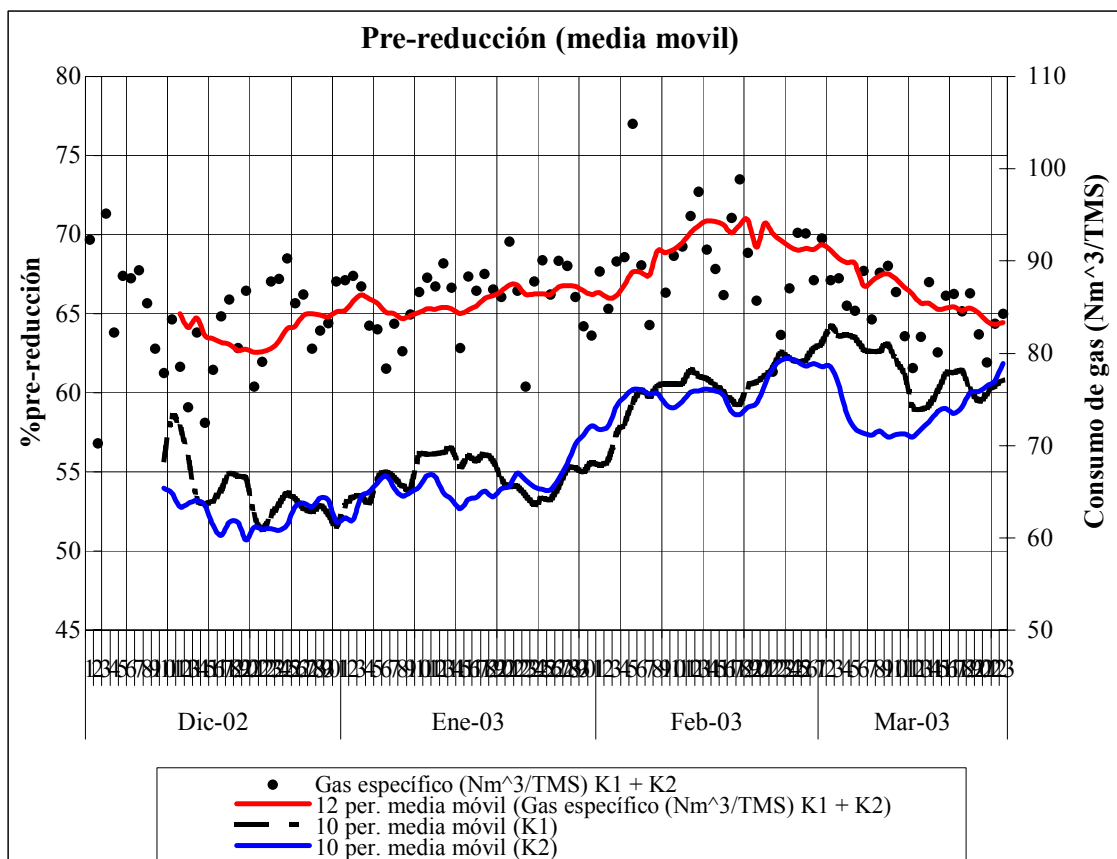
**Tabla N° 07.** Resistencia a la compresión de las pellas verdes.

<b>resistencia compresión pellas calcinadas (kg)</b>	
<b>tipo de aditivo</b>	<b>B (mezcla)</b>
sin aditivo	24,28
0,5% bentonita	14,49
1% bentonita tinaquillo	19,64
4% de Ca (OH)2	22,87

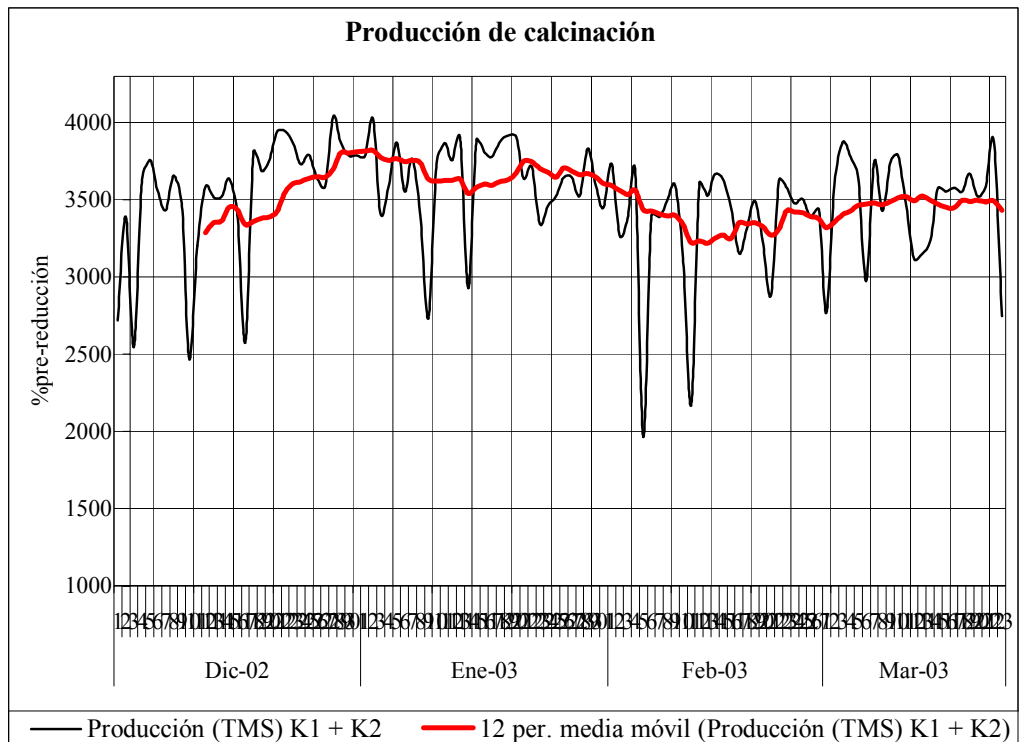
## ESTUDIO DE COSTOS DEL PROCESO.

El siguiente estudio se realizó con la finalidad de observar el comportamiento del área ante las implementaciones técnicas: trituradora de cono e inyección de agua, en función de la cantidad y calidad de mineral producido en los calcinadores, así como también el consumo de gas específico de dichos hornos. Para esto se registro los datos diarios durante los meses de diciembre de 2002, enero, febrero y marzo de 2003, y se presentaron en los siguientes gráficos:

**Gráfico N° 18.** %Pre-reducción y consumo de gas de los calcinadores desde el mes de diciembre de 2002 hasta marzo 2003. Gráfico realizado en media móvil.



**Gráfico N° 19.** Producción de mineral calcinado entre los meses de diciembre de 2002 y marzo 2003.. Tendencia por media móvil (12)



En el gráfico N° 18 podemos observar el comportamiento de la pre-reducción que tiende a aumentar en ambos calcinadores, con lo que se tiene un promedio de 53% en los meses de diciembre 2002 y enero 2003, y que aumenta para los meses de febrero y marzo a un promedio de 60%, y la tendencia continua al incremento.

Este aumento se debe a que a partir de finales de enero se implementa, de manera continua, la trituradora de cono, justo en el momento que comienza a aumentar la pre-reducción, debido a que se tiene una granulometría menor por lo que las reacciones en el mineral ocurren más rápidamente y en mayor grado; también influye la inyección de agua, que para las últimas fechas establecidas a un valor de 5 m<sup>3</sup>/h, se recupera mayor cantidad de finos los cuales han reaccionado en su mayoría, y que ya se han establecidos los cambios a nivel operativo: aumento del consumo de gas, disminución del ventilador de tiro, cierre

de las compuertas en la entrada de los calcinadores, disminución del %abertura del ventilador terciario N° 05, entre otras; por parte de los operadores de sala de control de los hornos.

Se observa que el consumo de gas específico aumenta levemente a partir de la inyección de agua, y con ello se incrementa el % pre-reducción en ambos calcinadores. En cuanto a la producción, no se observa en la gráfica N° 19 un cambio significativo, manteniéndose en un promedio de 3500 TMS al mes.

## CONCLUSIONES

Después de haber elaborado este trabajo de tesis grado, y haber realizado todas las experiencias y ensayos estipulados, he llegado a las siguientes conclusiones:

- La inyección de agua en la entrada de los calcinadores permite disminuir el % de arrastre de polvos en la salida de los gases, y con ello una mayor recuperación de finos en la salida, dichos finos poseen un contenido promedio de níquel del 2,1% lo que beneficia la calidad de la producción.
- El flujo de agua más óptimo obtenido fue el de 5 m<sup>3</sup>/h, ya que presentó el menor % arrastre de polvos con un 8%, en donde la condición inicial (sin agua inyectada) es del 19 %.
- Con un flujo de agua de 5 m<sup>3</sup>/h se obtuvo la mayor recuperación de finos en la salida con un 59,07% pasante de 2 m.m. El consumo de gas aumento ligeramente y las revoluciones del ventilador de tiro disminuyó, y la temperatura de los gases no disminuyó.
- En la alimentación de calcinación no se presentó segregación entre ambas líneas de producción, ni con el uso de una trituradora terciaria de rodillos ni con la implementación de la trituradora de cono (actual trituración terciaria).
- Se observó que para 3 y 5 m<sup>3</sup>/h de agua inyectada la degradación del mineral grueso es mayor, se tiene una granulometría de la alimentación de 87% pasante de 50 m.m la cual es la misma de la salida sin la inyección de agua; mientras que con el uso de 3 y 5 m<sup>3</sup>/h y para ese tamaño de partícula los porcentajes pasantes son de 100%. Con 7 m<sup>3</sup>/h el porcentaje de degradación no llega al 100% pasante de 50 m.m.

- Con el uso de la trituradora de cono existe un mayor aumento de la reducción de tamaños entre 2 m.m y 60 m.m, mientras que la generación de finos menores a 2 m.m se mantiene constante, aunque siempre con un porcentaje algo mayor para la trituradora de cono. Esta reducción implica un aumento leve en la producción y en la rapidez de la cinética de las reacciones dentro del horno calcinador
- Las pellas verdes producidas en planta son pobres en propiedades mecánicas, su resistencia promedio a la compresión en verde es de 2 kg incrementándose hasta 4,5 kg al ser calcinadas. No soportan las tres caídas presentes en el sistema de transporte de las pellas al calcinador, ya que el 100% fracturan en la segunda caída.
- La resistencia al choque térmico en condiciones estáticas disminuye con el aumento de la temperatura inicial; la condición más crítica la representó a una temperatura de 440 °C con un % de sobrevivencia del 76%, por lo que se devuelve al sistema de peletización un 24% aproximado de lo alimentado en pellas.
- La temperatura de peletización influye en la calidad de las pellas en verdes. Las pellas elaboradas con mineral fino tienen mejores propiedades debido a que son peletizadas a temperatura ambiente, mientras que las pellas de polvo calcinado son peletizadas a una temperatura por encima de los 90 °C, esto origina que no existan puentes líquidos lo suficientemente fuertes.
- La cal hidratada constituyó el mejor aditivo químico para mejorar las propiedades mecánicas de las pellas verdes elaboradas en el laboratorio. El mejor porcentaje empleado fue de 4%, para un 7% el material pierde la capacidad de peletizar, debido al alto consumo de agua que requiere.

- El uso de cal hidratada permitió incrementar en cualquiera de las tres condiciones (pellas polvo calcinado, pellas mineral fino y pellas mezcla) la resistencia a la compresión, a tal punto que se incrementó en un 121%, 13% y 37% respectivamente, obteniéndose un máximo de resistencia promedio de 2,19 Kg.
- Según el tipo de materia prima utilizada en el laboratorio, se tiene que: para el polvo calcinado la máxima resistencia (2,19 kg) se obtuvo con la cal hidratada (4%); para las pellas de mineral fino el uso de bentonita (0,3%) se obtuvo 1,77 kg en resistencia a la compresión, y para la mezcla polvo - mineral fino el emplear  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  se obtienen los mejores resultados (1,62 kg). Las condiciones iniciales o patrones fueron: polvo calcinado (0,99 kg), mineral fino (1,28) y mezcla (1,18 kg)
- El porcentaje de resistencia a la caída y el número de caídas se incrementó en la mejor proporción con el uso de la cal, en donde se obtuvo hasta un máximo de 7 caídas, y un 100% pellas resistentes a un número mínimo de 3 caídas (requerimientos de planta).
- Operativamente la cal presentó menos problemas con los raspadores, solo implicó un mayor consumo de agua; con las bentonitas en sus diferentes concentraciones se presentaron problemas con el empegostamiento y acumulación de material en los raspadores.
- Las implementaciones tecnológicas (trituradora de cono e inyección de agua en los calcinadores) y los cambios operacionales correspondiente al uso de estos, implicó un aumento de la pre-reducción de aproximadamente 8%, con un leve aumento del consumo de gas a un promedio de 68  $\text{Nm}^3/\text{TMS}$ ; mientras la producción se mantuvo constante a unas 3500 TMS/ día.



- La peletización con bentonita, bien sea americana o nacional, permitió realizar la peletización de manera más rápida en comparación de la cal hidratada y la condición original. Esto permite aumentar la producción de pellas .

## RECOMENDACIONES

- Se recomienda estudiar el efecto posible que tendría una inyección de agua de 6 m<sup>3</sup>/h en la entrada de los calcinadores, debido a que entre 5 y 7 m<sup>3</sup>/h se obtuvieron los menores valores de arrastre de polvos y la degradación de mineral por choque térmico posiblemente es menor.
- Se recomienda mejorar el sistema de control de inyección de agua, de tal manera que se pueda ajustar de forma más precisa el flujo de agua, ya que el sistema utilizado trae errores de precisión al depender el ajuste de la percepción del operador de campo.
- Debido a que existe mucha diferencia en los modos de operación de los hornos calcinadores por parte de los operadores de sala, se debería establecer estándares en los casos que no lo exista y aplicar los que sí hay; tomando en cuenta que el implementar cambios en los operadores (entre otros) casi nunca son bien aceptados y siempre tienen un grado de rechazo por lo que se debe ser persistente y claro con el personal de cual son las finalidades de dichos cambios.
- Realizar un estudio de la distribución combustible - aire dentro del calcinador, para poder establecer la influencia sobre el perfil térmico del horno y así obtener una mayor eficiencia al controlar el tipo de atmósfera dentro del horno, así como la cinética de las reacciones. En este estudio tratar de variar en lo posible, flujo de gas, flujo de aire primario, secundario, segundo secundario y terciario de manera independiente y dentro de los intervalos de operación.

- No realizar los tamizaje en húmedo en los análisis granulométricos ya que los resultados tienen un alto porcentaje de errores, además no da información precisa en cuanto a lo requerido: aglomeración de la carga. Solo es aplicable para la descarga del horno secador, siempre y cuando se cambie, el modo de realizar los tamizajes en húmedo para obtener mejor precisión en los resultados.
- Los resultados obtenidos en las pruebas de peletización con aditivos químicos están influenciadas por las condiciones operacionales del laboratorio y presentan una diferencia proporcional con respecto a los resultados que se tendrían al peletizar en los discos de la planta; por consiguiente se recomienda, según los resultados obtenidos en este trabajo, realizar pruebas en campo con la utilización de aditivos en la peletización y realizar un seguimiento durante su transporte, descarga dentro el horno calcinador y en salida de este para determinar la sobrevivencia de las pellas en el proceso.
- Disminuir la temperatura de peletización de los polvos hasta unos 70 °C, para ello se pueden introducir líneas de inyección de nitrógeno dentro de la tolva de polvo calcinado, o en cualquier punto accesible siempre y cuando sea un punto bajo del sistema para que el gas se caliente lo mejor posible y las partículas se enfríen mejor.
- Se recomienda estudiar el efecto de usar 0,7% de bentonita en la elaboración de pellas verdes, y de manera separada con un 5% de cal.
- Estudiar el efecto sobre las pellas que tiene las mezclas de aditivos bentonita – cal, en diferentes grados, el uso de aglomerantes sintéticos, y en especial el uso de cemento y/o mezclas de cemento-cal (preferiblemente lechada de cal que absorbe menor cantidad de agua y no reacciona con ésta). Una vez realizado este estudio ensayarlo en planta.

- Estudiar otros medios para incorporar las pellas dentro del horno, en caso tal que los aditivos no funcionen. Una de estos medios es establecer una línea alterna para la sinterización y autoreducción de pellas.
- Se recomienda realizar un estudio del Número de Blaine a cada uno de los aditivos usados, con la finalidad de determinar su efecto sobre las propiedades mecánicas y sobre las velocidades de crecimiento de pellas y la rapidez de producción.

## BIBLIOGRAFÍA

JIMENEZ, Alfredo. (Sin año). **Efecto de la Cal Hidratada sobre la Fabricación de Pellas con Mineral de Hierro.** Caracas, Venezuela.

KRUSS POLYSIUS. (Enero, 2000). **Handbook Calcination.** Australia.

LORENZO, Mario (1995). **Estudio de las Propiedades Finales de Pellas de Laterita Ferruginosa con Adición de bentonita y Cal Hidratada.** Caracas, Venezuela.

MEYER, Kurt. (1980). **Pelletizing of Iron Ores.** Alemania.

NORMA COVENIN - 1240:2000. **Minerales de Hierro y Productos Siderúrgicos. Determinación de la Humedad Higroscópica en Muestras para Análisis Químico.** 2000.

NORMA COVENIN - 2231:2000. **Minerales de Hierro y Productos Siderúrgicos. Determinación de la distribución de Tamaño por Tamizado.** (ISO 4710-1999).

NORMA COVENIN - 1943:1998. **Minerales de Hierro y Productos Siderúrgicos. Pellas. Determinación de la Resistencia a la compresión.** 1998.

NORMA COVENIN - 1941:1982. **Minerales de Hierro y Productos Siderúrgicos. Método para la prueba de Desintegración a baja Temperatura (Prueba al Tambor después de una Reducción Estática).** 1982.

# A N E X O S

# ANEXOS

Anexo N° 01. Ubicación geográfica de Minera Loma de Níquel

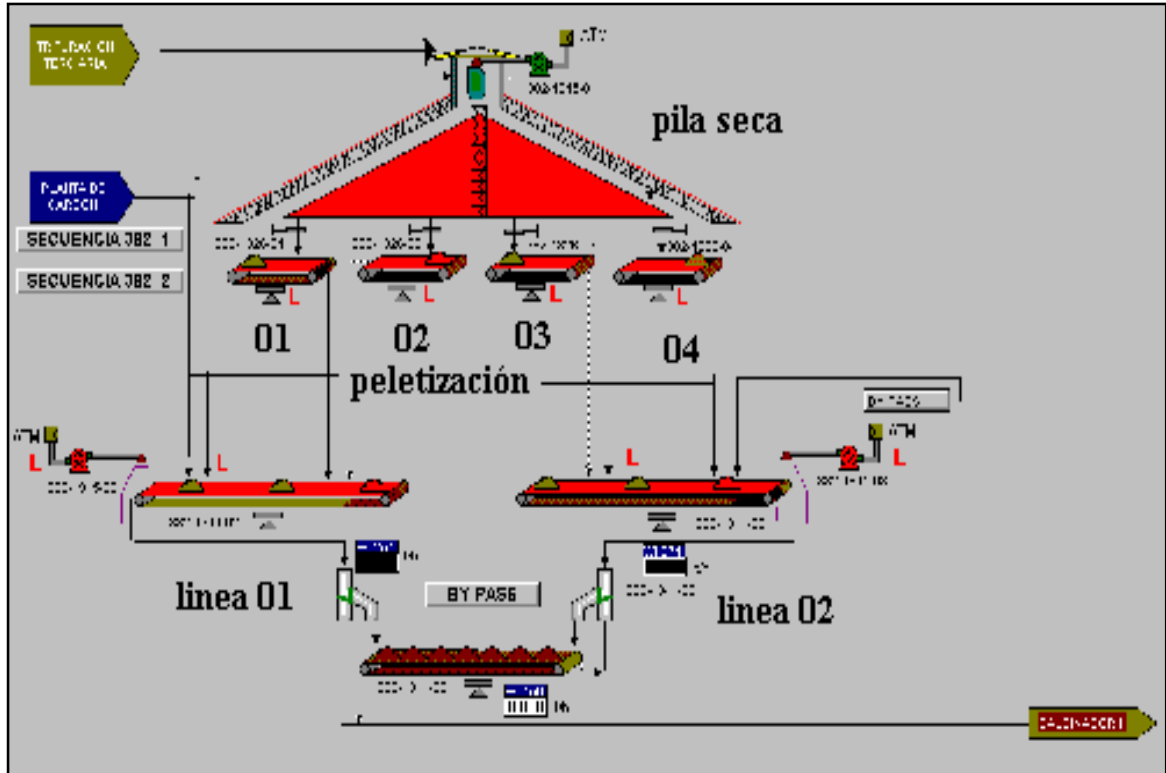


**Anexo N° 02.** Vías de acceso a Minera Lomas de Níquel.



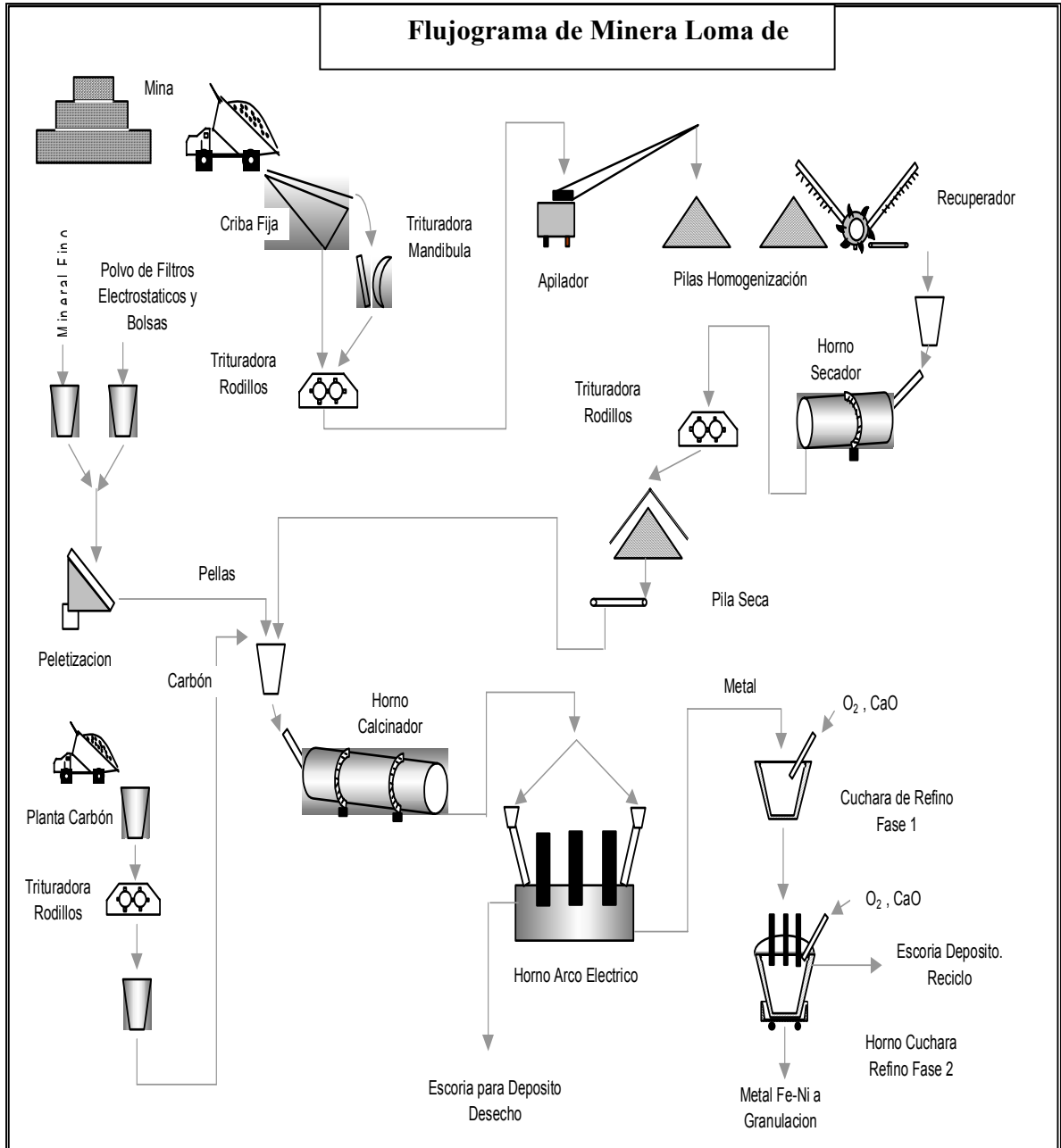


**Anexo N° 03.** Sistema de alimentación del área de calcinación (pila seca)

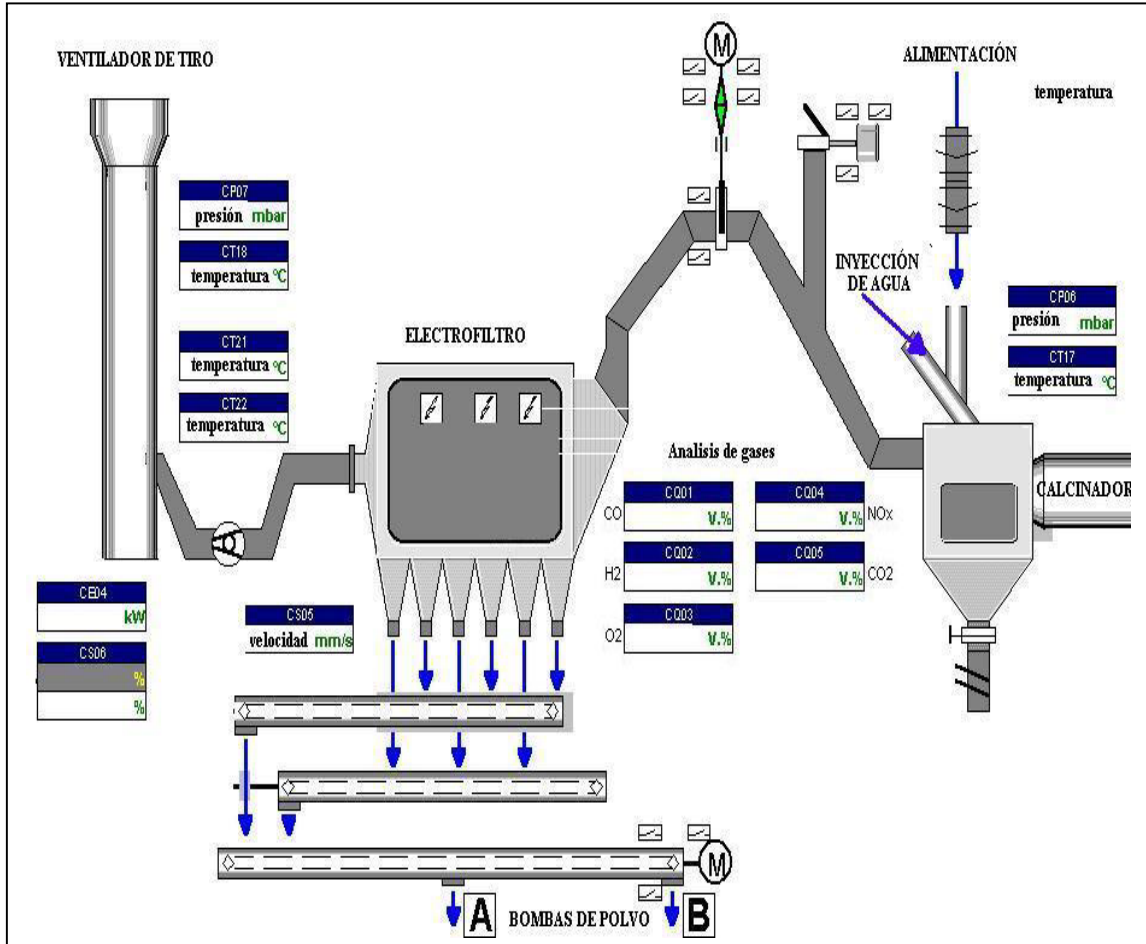


Código	Descripción	Ton/h	TMS/h
382-1326-01 al 04	Alimentadores de Mineral con Balanzas	234	200
382-1311-02 y 03	Cintas Transportadoras de Carga	260	221
550-1326-01 y 02	Alimentadores de Carbón con Balanzas	4.72	4.45
490-1311-06 y 07	Cintas Transportadoras de Pellas	30	22.1
382-1311-06	Cinta Transportadora. Reversible de Carga	130	110

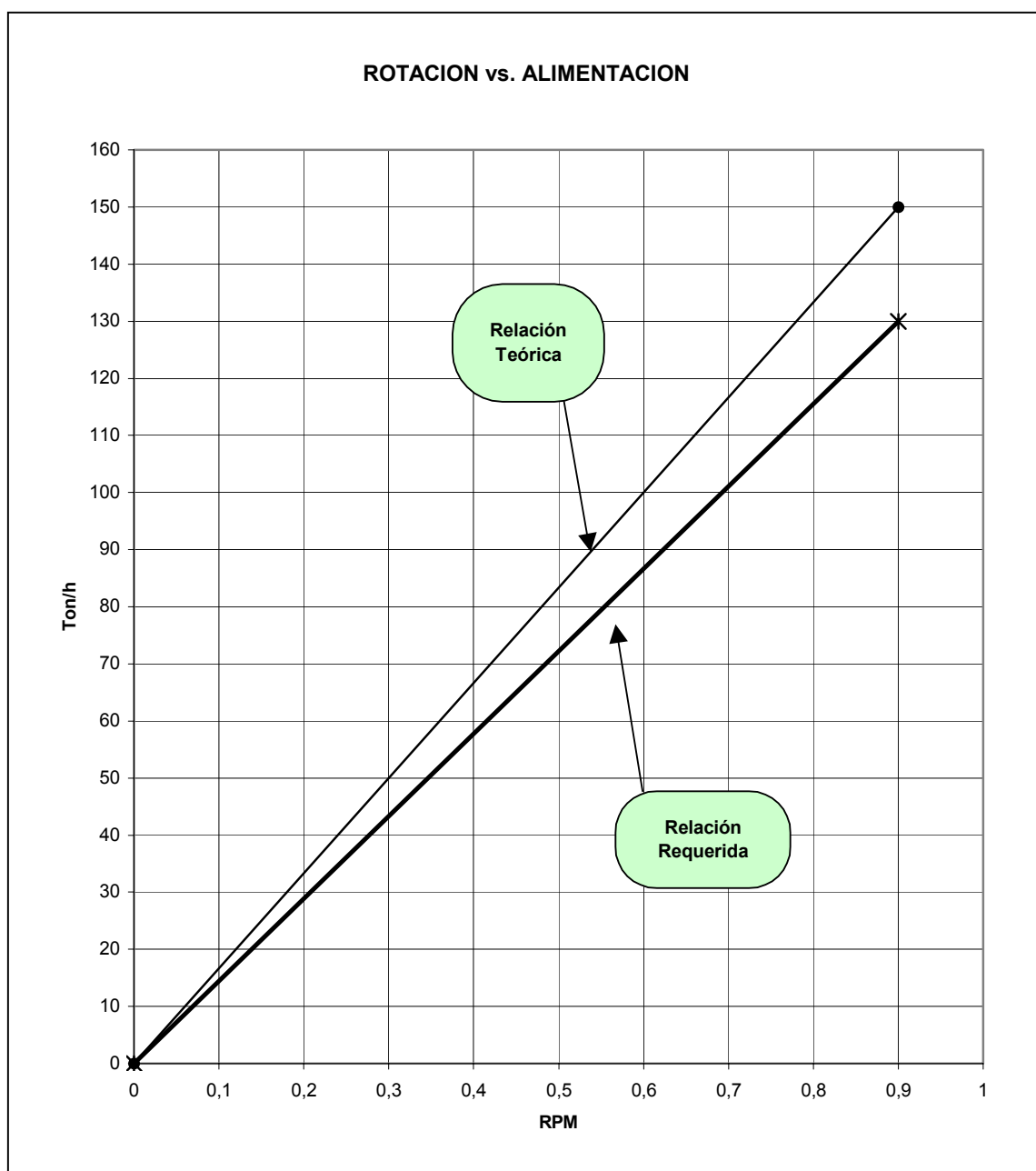
**Anexo N° 04.** Flujograma básico del proceso metalúrgico de Minera Lomas de Niquel



Anexo N° 05. Esquema del sistema de extracción de gases y polvos del calcinador



**Anexo N° 06.** Relación rotación vs. alimentación de los calcinadores.



Anexo N° 07. Tabla de registros de datos para prueba de arrastre de polvos del calcinador

FECHA	calcinador 01			OPERADOR										
Rujo inyección agua (m³3/h)	Tiempo previo a la prueba			SUPERVISOR										
HORA	% Silo Polvo	Alimentación (T/h)		Rujo de gas	alimenta. T/h	rotación (r.p.m)	Vent. Tiro (r.p.m)	Vent. primario	Temp. polvo(°C)	venti.		Aire Comp.	CT-17 (°C)	Comentarios
		#03	#04							1	5			
08:00 ( )														
09:00 ( )														
10:00 ( )														
11:00 ( )														
12:00 ( )														
13:00 ( )														
14:00 ( )														
15:00 ( )														
16:00 ( )														
17:00 ( )														
18:00 ( )														
sub total.														
total o promedio.														
Observaciones:														

FECHA	calcinador 02			OPERADOR										
Rujo inyección agua (m³3/h)	Tiempo previo a la prueba			SUPERVISOR										
HORA	% Silo Polvo	Alimentación (T/h)		Rujo de gas	alimenta. T/h	rotación (r.p.m)	Vent. Tiro (r.p.m)	Vent. primario	Temp. polvo(°C)	venti.		Aire Comp.	CT-17 (°C)	Comentarios
		#03	#04							1	5			
08:00 ( )														
09:00 ( )														
10:00 ( )														
11:00 ( )														
12:00 ( )														
13:00 ( )														
14:00 ( )														
15:00 ( )														
16:00 ( )														
17:00 ( )														
18:00 ( )														
sub total.														
total o promedio.														
Observaciones:														

**Anexo N° 08.** Procedimiento para la determinación de humedad.



**ANÁLISIS DE**  
**HUMEDAD**



**Fecha Elaboración:**

16 May. 01

**MANUAL**      **AREA ESPECIFICA**  
CALIDAD (MACL)      CL Control de Calidad (CC)

**1.- ACTIVIDAD**

Realizar el Análisis de Humedad a todas las muestras que lo requieran, a través del Horno de Secado (ESTUFA) o los Analizadores Automáticos.

**2.- LUGAR**

Sala de preparación de muestras no metálicas.

**3.- OPERADOR**

Operador de Laboratorio/ Operador de Equipos de Laboratorio.

**4.- MATERIALES, EQUIPOS, CONDICIONES NECESARIAS, TIEMPO DE EJECUCIÓN, TOLERANCIA Y REGISTROS**

**Materiales:** Bandejas de aluminio, mascarilla, lentes, guantes, botas de seguridad y protectores auditivos.

**Otros Equipos:** Trituradora BICO, Horno de Secado (ESTUFA), Analizador de Humedad SARTORIUS MA30, Analizador de Humedad OHAUS MB200.

**Condiciones Necesarias:** Hoja de Cálculo para determinar el porcentaje de humedad

**Tiempo de Ejecución de la IO:** 8 horas

**Tolerancia del Tiempo de Ejecución (+/-):** 1 hora

## 5.- DESCRIPCIÓN

Realice el análisis de Humedad a través del Horno de Secado (ESTUFA):

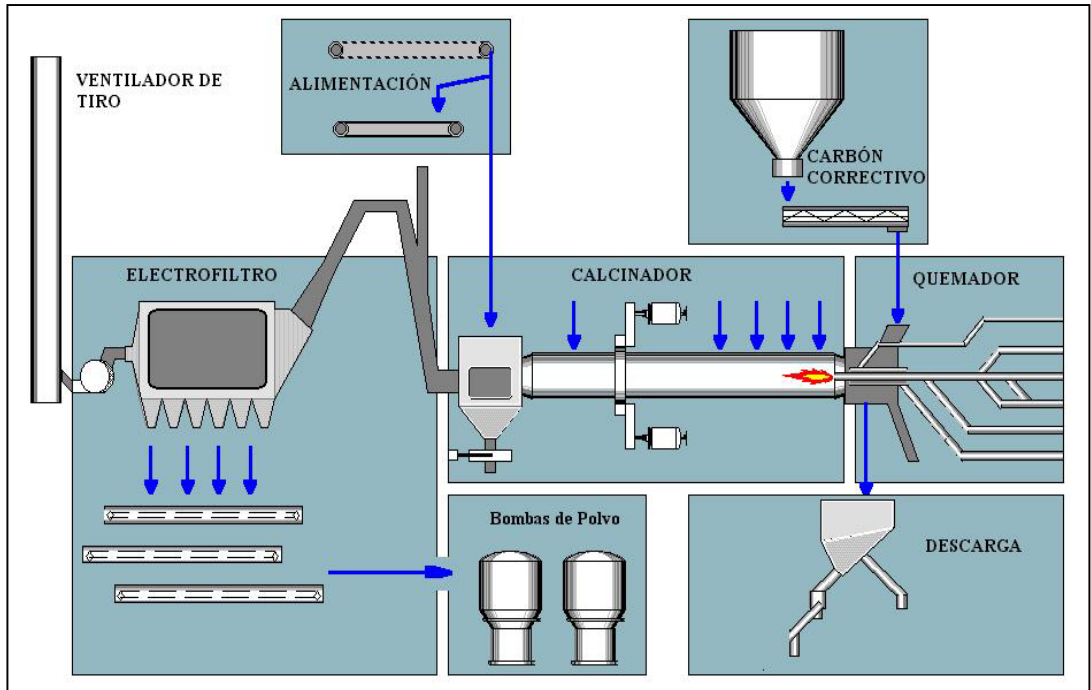
- 5.1.1. Homogeneice la muestra.
- 5.1.2. Tare la bandeja previamente identificada y coloque la muestra en la misma.
- 5.1.3. Tome el peso húmedo de la muestra el cual se debe registrar en el formato de "Control de Humedades de producción".
- 5.1.4. Introduzca la muestra en el Horno de Secado y luego proceda a colocar la hora de entrada y de salida en el **formato antes mencionado**.
- 5.1.5. Deje secar las muestras por un período de 8 horas a una temperatura de 100 a 105 °C.
- 5.1.6. Una vez culminado el período de secado extraiga la muestra, tome el peso seco+tara y registre **en el formato**.
- 5.1.7. Transcriba los datos en la hoja de cálculo destinada para tal fin, la cual determinará el porcentaje de humedad
- 5.2. Realice el análisis a través del Analizador de Humedad SARTORIUS MA30:
  - 5.2.1. Prepare de la muestra.
    - 5.2.1.1. Vacíe la muestra en una bandeja de aluminio o plástica.
    - 5.2.1.2. Cuarteo dos (2) veces toda la muestra, cuidando que se distribuya por todas las ranuras y en similar proporción en las bandejas del cuarteador.
    - 5.2.1.3. Tome la mitad del último cuarteo y proceder a triturar. La 3/4 partes restante colóquela nuevamente en la bandeja para análisis granulométrico.
    - 5.2.1.4. Pase la muestra triturada por el tamiz 2mm, la fracción retenida triturela nuevamente hasta lograr solo un 8% por encima del tamiz 2mm y la fracción pasante es cuarteela dos (2) veces.
    - 5.2.1.5. Tome la mitad del último cuarteo para realizar el análisis de humedad.
  - 5.2.2. Encienda el equipo pulsando la tecla "ON/OFF"
  - 5.2.3. No toque el equipo hasta tanto no aparezca en el indicador inicial las letras "TAR", ya que al encender se lleva a cabo un control automático de las funciones.
  - 5.2.4. Espere por espacio de 10 minutos que el equipo se caliente.

- 5.2.5. Calibre la balanza de humedad.
- 5.2.6. Asegúrese de que el equipo marque una temperatura entre 100 – 110 °C.
- 5.2.7. Coloque el platillo desechable receptor de muestra y pulse la tecla “Enter” para tarar. La palabra “TAR” desaparece del indicador y la lectura de peso de indicar 0.000 g.
- 5.2.8. En los casos donde aparezca una lectura distinta, pulse la tecla “CF” (aparece TAR) y pulse la tecla “Enter”, repita esta paso tantas veces sea necesaria.
- 5.2.9. Coloque de 14 a 16 gramos de muestra en el platillo receptor asegurándose de distribuirla uniformemente.
- 5.2.10. Baje la cubierta y presione la tecla “Enter”; en ese momento se inicia el proceso automáticamente.
- 5.2.11. Verifique el inicio del ensayo mediante una señal acústica que aparece en pantalla con el símbolo de secar.
- 5.2.12. Verifique durante el funcionamiento el tiempo y el resultado del ensayo que aparecen en el indicador.
- 5.2.13. El análisis de humedad termina automáticamente, apareciendo en la pantalla “END”.
- 5.2.14. Asegúrese de no levantar la cubierta o pulsar la tecla ”CF” antes de culminar el proceso, ya que esto interrumpe el ensayo.
- 5.2.15. Pulse la tecla “CF” una vez finalizado el análisis y verifique el resultado que permanecerá en pantalla.
- 5.2.16. Apague el equipo, retirar el platillo, deseche la muestra.
- 5.2.17. Para realizar análisis posteriores al primero del día, después de realizar el ensayo, proceda a ejecutar los pasos desde el ítem 5.6. en adelante.
- 5.2.18. En el caso de que el equipo falle, proceda a realizar el ensayo a través del Horno de Secado (ESTUFA).
- 5.3. Determine la Humedad a través del Analizador de Humedad OHAUS MB200:
  - 5.3.1. Prepare la muestra.
    - 5.3.1.1. Vacíe la muestra en una bandeja de aluminio o plástica.
    - 5.3.1.2. Cuartee dos (2) veces toda la muestra, cuidando que se distribuya por todas las ranuras y en similar proporción en las bandejas del cuarteador.

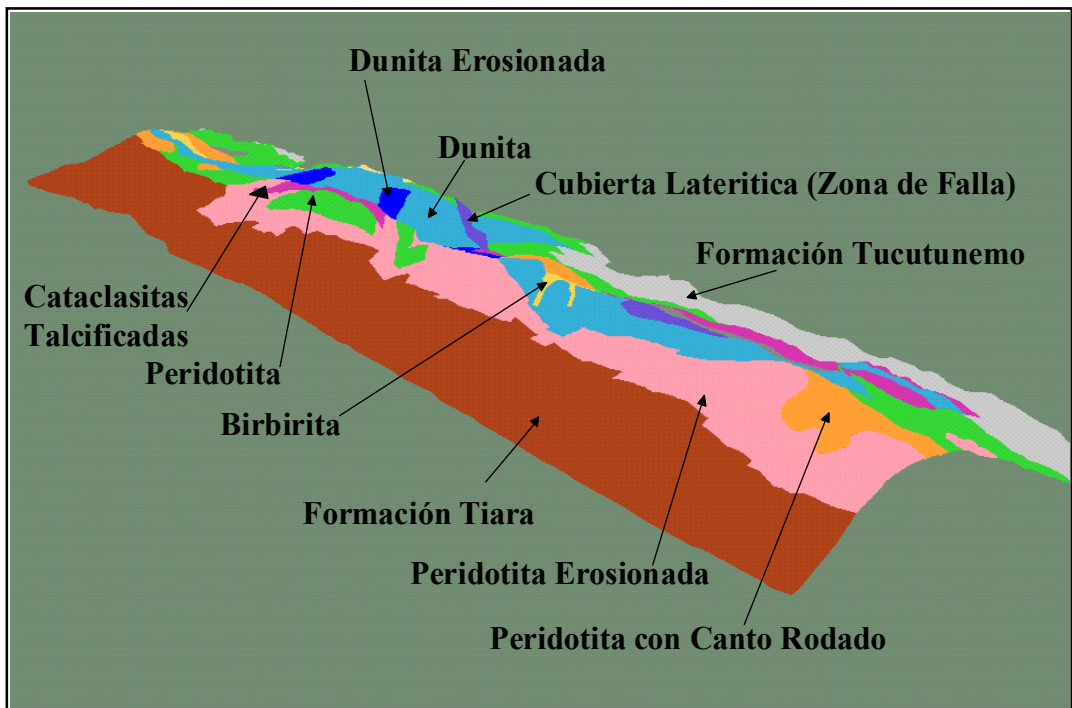


- 5.3.1.3. Tome la mitad del último cuarteo y proceda a triturar. La 3/4 partes restante colóquela nuevamente en la bandeja para análisis granulométrico.
- 5.3.1.4. Pase la muestra triturada por el tamiz 2mm, la fracción retenida triturela nuevamente hasta lograr solo un 8% por encima del tamiz 2mm y la fracción pasante cuarteela dos (2) veces.
- 5.3.1.5. Tome la mitad del último cuarteo para realizar el análisis de humedad.
- 5.3.2. Encienda el equipo pulsando la tecla "ON/TARE"
- 5.3.3. Calibre la balanza de humedad.
- 5.3.4. Asegúrese de que el equipo marque una temperatura de 105°C.
- 5.3.5. Coloque el plato de aluminio en la plataforma del equipo, cierre y pulse la tecla "ON/TARE", se encenderá la luz de la función "NEW SAMPLE", abra y agregar la muestra hasta pesar 10 gr, cierre y pulse la tecla "START", se apagarán las luces de las funciones "STOP" y "NEW SAMPLE" y se encenderá la "RUN" indicando así que comenzó el análisis.
- 5.3.6. Asegúrese de no levantar la plataforma antes de culminar el proceso, ya que esto interrumpe el ensayo.
- 5.3.7. Verifique durante el análisis en la pantalla superior el tiempo y en la pantalla inferior el resultado del ensayo.
- 5.3.8. Al finalizar el análisis el equipo emitirá cuatro (4) beeps y se encenderá la luz de "STOP", mostrando en la pantalla superior "TEST COMPLETE A 105°/50min".
- 5.3.9. Para ver los resultados se debe pulse la tecla hasta que aparezca en la pantalla superior "X.X.% M REGAIN".
- 5.3.10. Una vez obtenidos los resultados retire el platillo y deseche la muestra.
- 5.3.11. Para realizar un nuevo análisis pulse la tecla "ON/TARE" y se encienda la luz de la función "NEW SAMPLE" quedando listo el equipo para un nuevo análisis.
- 5.3.12. En el caso de que el equipo falle, proceda a realizar el ensayo a través del Horno de Secado (ESTUFA).

Anexo N° 09. Esquema básico del área de calcinación.



Anexo N° 10. Mapa geológico.



**Anexo N° 11. Vista de la mina**



**Anexo N° 12.** Trituración primaria y secundaria. Abajo pila de homogenización



Anexo N° 13. Recuperador en la pila de homogenización. Abajo horno secador



**Anexo N° 14.** Pila seca y calcinadores.



**Anexo N° 15.** Horno eléctrico de arco directo. Piscina de escoria.



**Anexo N° 16.** Inyección de oxígeno. Refino en horno cuchara.





Anexo N° 17. Desescoriado del metal. Colada de metal en el tanque de granulación.



**Anexo N° 18.** Ferroníquel granulado.

