

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



**“Efecto de la calidad del pellet en la generación de finos durante el
proceso de reducción directa”**

Por:

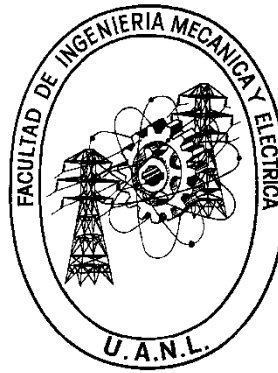
Andrea Licerio González

**EN OPCIÓN AL GRADO DE:
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN EN
MATERIALES**

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

ABRIL 2025

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**“Efecto de la calidad del pellet en la generación de finos durante el
proceso de reducción directa”**

Por:

Andrea Licerio González

EN OPCIÓN AL GRADO DE:
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN EN
MATERIALES

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

ABRIL 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Posgrado

Los miembros del Comité de Evaluación de Tesis recomendamos que la Tesis "Efecto de la calidad del pellet en la generación de finos durante el proceso de reducción directa", realizada por la estudiante Andrea Licerio González, con número de matrícula 2173607, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con orientación en Materiales.

El Comité de Evaluación de Tesis

Dra. Dora Irma Martínez Delgado
Director

Dr. Arturo Juárez Hernández
Co Director

Dr. Luis Adolfo Leduc Lezama
Revisor

Dr. Lauren Yolanda Gómez Zamorano
Revisor

Dr. Mario Llamas Bueno
Revisor

Vo.Bo.


Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirector de Estudios de Posgrado



Institución 190001

Programa 557546

Acta Núm. 4507

Ciudad Universitaria, a 24 de junio de 2025.

DEDICATORIA

En memoria de mis seres queridos que ya no están: mis abuelos, mi padrino Luis y mi tía Mini, quienes siempre creyeron en mí y me apoyaron en todo mi desarrollo personal y profesional. Su amor y fe en mi potencial han sido una inspiración constante, y su espíritu vive en cada logro que alcanzo. Este trabajo es un homenaje para concluir siempre lo que se empieza.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer primeramente a mis asesores de la empresa, los cuales han sido parte fundamental de mi desarrollo tanto profesional como académico dentro de la empresa Ternium.

A mi directora de tesis, Doctora Dora Irma Martínez Delgado, por su orientación, paciencia y dedicación a lo largo de este proyecto. Su conocimiento y experiencia fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

También quiero agradecer a mi co asesor Doctor Arturo Juárez Hernández, por sus valiosas sugerencias, comentarios y correcciones, las cuales contribuyeron significativamente a mejorar este trabajo.

No puedo dejar de expresar mi profunda gratitud a mi familia por su amor, apoyo incondicional y comprensión durante todo este proceso. Agradezco especialmente a Karla, mi hermana por su apoyo incondicional a lo largo de toda mi vida y siempre impulsarme a ser mejor cada día además de inspirarme en cada etapa que atravesamos juntas.

Por último, quiero agradecer a todos mis amigos y seres queridos que me alentaron y brindaron su ayuda en cada etapa de esta investigación.

Este logro no habría sido posible sin el apoyo y aliento de todas estas personas.

Muchas gracias.

ÍNDICE GENERAL

	Página
RESUMEN	1
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	
1.1. Objetivo general	5
1.2. Objetivos específicos	5
1.3. Hipótesis	6
1.4. Justificación	6
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	
2.1 Descripción del Proceso de Reducción Directa ZR	
2.1.1 Conceptos básicos	9
2.1.2 Flujo gas reducción	10
2.1.3 Sistema de absorción CO ₂ .	11
2.1.4 Calidad del HRD	12
2.2 Mineral de hierro para reducción directa	
2.2.1 Características del mineral	13
2.2.2 Propiedades químicas	13
2.2.3 Propiedades físicas	14
2.2.4 Propiedades metalúrgicas	14
2.2.5 Peletizado	15
2.2.6 Control de calidad del pellet	17
2.2.7 Especificaciones para el proceso de reducción directa	20
2.3 Generación de finos en el HRD	
2.3.1 ¿Qué son los finos de HRD?	22
2.3.2 Mecanismos de formación	22
2.3.3 Variables relacionadas con la generación de finos	23
2.3.4 Impacto de finos	23
2.3.5 Metodologías de evaluación	24
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	
3.1 Introducción	26
3.2 Muestreo y preparación	27
3.3 Preparación de concentrado	28
3.4 Pruebas de pot grate	30
3.5 Simulación del proceso de reducción directa	33
CAPÍTULO IV. RESULTADOS	
4.1 Análisis químico de los minerales	36
4.2 Concentración magnética	38
4.3 Peletizado	39
4.4 Reducción directa	45

CAPÍTULO V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	51
CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES	
6.1 Conclusiones	54
6.2 Recomendaciones	55
REFERENCIAS	56

LISTA DE FIGURAS

		Página
Figura 1.1	Ilustración esquemática de las principales rutas producción de acero	3
Figura 2.1	Esquema ZR descarga en caliente	7
Figura 2.2	Esquema sobre la respuesta mecánica de un pellet individual a un único evento de estrés	22
Figura 3.1	Tratamiento y preparación de muestras de mineral desde la mina para el desarrollo de este trabajo	27
Figura 3.2	Mina a cielo abierto	28
Figura 3.3	Planta piloto de concentración magnética	29
Figura 3.4	Diagrama de flujo planta piloto de Peletizado	31
Figura 3.5	Bolsa arreglo triple	33
Figura 4.1	Concentración de SiO_2 y Fe Total en cada tipo de mineral	37
Figura 4.2	Resultados de %humedad en cada tipo de mineral	40
Figura 4.3	Resultados de tamaño de pellet	41
Figura 4.4	Perfil térmico planta peletizadora vs equipo pot grate	42
Figura 4.5	Resultados de calidad física – Índice de Tambor	44
Figura 4.6	Resultados de calidad física – Resistencia a la compresión	45
Figura 4.7	Resultados de metalización	46
Figura 4.8	Muestras de pellet después de la reducción R180	46
Figura 4.9	Resultados de finos por cada tipo de mineral	47
Figura 4.10	Correlación generación de finos (degradación) vs contenido de MgO	48
Figura 4.11	Resultados de finos de prueba industrial	49
Figura 4.12	Resultados de metalización de prueba industrial	50
Figura 4.13	Resultados de carbón de prueba industrial	50
Figura 5.1	Ferrita de Magnesio en muestra de pellet	52
Figura 5.2	Silicato + Ferrita en muestra de pellet	53

LISTA DE TABLAS

		Página
Tabla 2.1	Rangos de composición de gases reductores	11
Tabla 2.2	Especificaciones de calidad de los pellet de mineral de hierro	18
Tabla 2.3	Análisis químicos y físicos de 8 tipos de pellet para reducción directa	20
Tabla 2.4	Análisis metalúrgicos de 8 tipos de pellet para reducción directa	21
Tabla 3.1	Ensayos requeridos para pellet de pot grate	32
Tabla 3.2	Ensayos de laboratorio para HRD de prueba de bolsas	34
Tabla 4.1	Resultados de calidad química de mineral	36
Tabla 4.2	Resultados de concentración magnética por cada tipo de mineral	39
Tabla 4.3	Resultados de calidad química de pellet por cada tipo de mineral	43
Tabla 5.1	Resultados de finos vs grado de MgO en pellet	51

RESUMEN

El proceso de reducción directa consiste en la transformación del óxido de hierro, en forma de pellet, en hierro esponja, utilizado como materia prima en la producción de acero. Este pellet está compuesto principalmente por hematita (Fe_2O_3) y otros óxidos minerales. Mediante el uso de agentes reductores provenientes del gas natural, se llevan a cabo reacciones químicas que eliminan el oxígeno y permiten la obtención de hierro metálico.

Durante el proceso de reducción directa, la microestructura del óxido de hierro sufre alteraciones que afectan su volumen y estructura, lo que provoca la degradación del pellet y la generación de finos (partículas menores a 6.5 mm). La presencia de estos finos impacta negativamente la eficiencia del proceso siderúrgico, al generar pérdidas de material, aumentar el consumo energético, exigir un manejo especializado y comprometer la estabilidad operativa del sistema de reducción.

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo principal evaluar la influencia de la calidad del pellet —considerando su composición química, propiedades físicas y metalúrgicas— en la generación de finos durante el proceso de reducción directa. Para ello, se realizaron ensayos estandarizados a escala de laboratorio e industrial. Las actividades incluyeron el muestreo y preparación de distintos tipos de mineral de hierro, la caracterización física y química de las muestras, pruebas de tipo pot grate y la simulación del proceso de reducción directa mediante pruebas experimentales en ambas escalas.

Los resultados obtenidos permiten concluir que las características intrínsecas del yacimiento, asociadas a cada tipo de mineral, inciden directamente en la degradación del pellet durante el proceso de reducción. Por ello, se recomienda implementar estrategias de control y mejora desde la etapa de extracción minera, con el objetivo de optimizar las fases posteriores del procesamiento del mineral.

ABSTRACT

The direct reduction process involves transforming iron oxide in the form of pellets into sponge iron, which is used as a raw material for steelmaking.

The pellet is mainly composed of hematite (Fe_2O_3) along with other compounds such as silicon oxide, calcium oxide, magnesium oxide, and aluminum oxide, among others. Through reducing agents obtained from natural gas in the reduction process, chemical reactions are carried out to remove the oxygen, leading to the formation of metallic iron.

During this process, the microstructure of the iron oxide undergoes changes that affect its volume and structure. For this reason, the pellet experiences degradation, generating fines (particles smaller than 6.5 mm). This phenomenon can cause material loss and increased costs during steelmaking due to higher energy consumption, special handling requirements, and process stability issues during reduction.

Due to this problem, this research work was developed with the aim of evaluating the effect of pellet quality (chemical composition, physical quality, and morphology) on the generation of fines during the direct reduction process through standardized laboratory and industrial-scale tests.

To achieve this objective, studies were carried out on: i) sampling and preparation of different types of ore, ii) preparation and characterization of samples, iii) pot grate tests, and iv) simulation of the direct reduction process through laboratory and industrial tests.

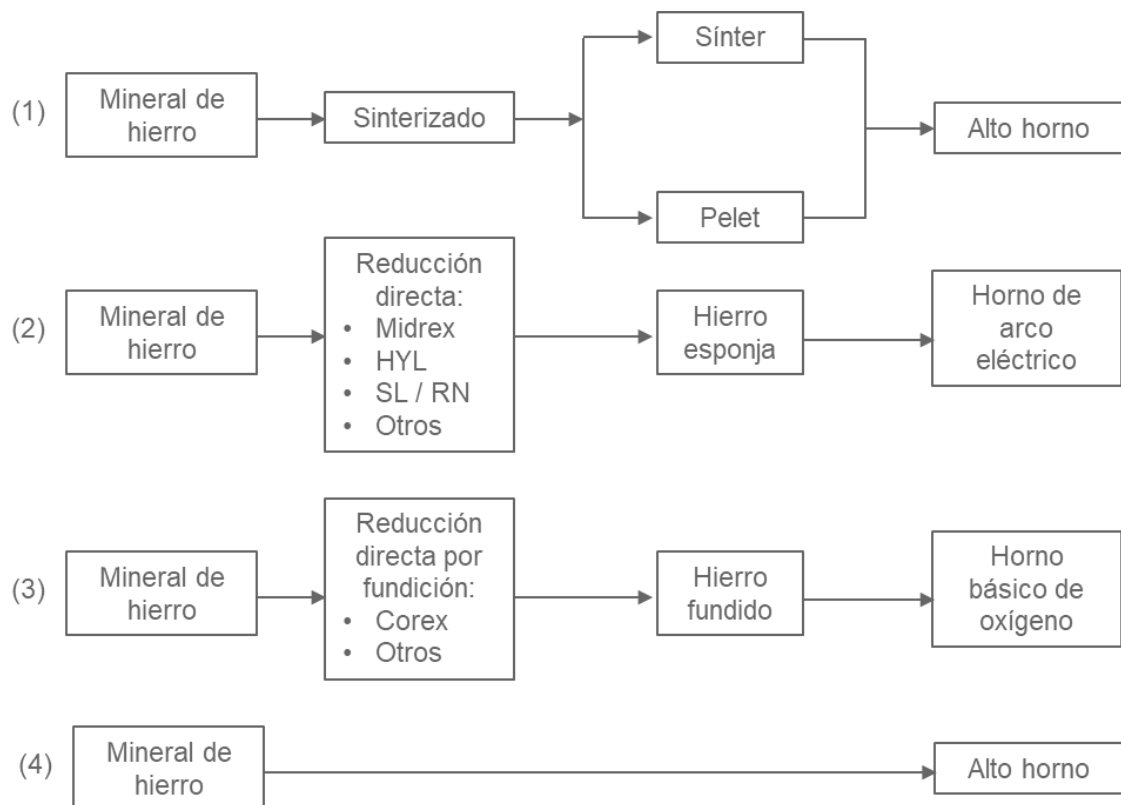
Through laboratory studies and industrial-scale testing, it was determined that the type of deposit, based on the intrinsic characteristics of each type of ore, can influence pellet degradation during the reduction process. Therefore, strategies should be established starting at the mine site for its subsequent processing in the production chain.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El proceso de fabricación del acero comienza con la fundición del mineral de hierro como materia prima. Durante este proceso, el metal se funde y se moldea para obtener la forma deseada antes de su tratamiento final. La producción del acero se desarrolla en varias etapas clave, entre las que destacan la preparación de las materias primas y la transformación del mineral de hierro hasta su fusión. Para esta última fase, se emplean hornos de arco eléctrico o de oxígeno básico.

En la [figura 1.1](#) se muestran las principales rutas de fabricación del acero.



[Figura 1.1.](#) Ilustración esquemática de las principales rutas de producción de acero.

Como se muestra en la figura 1.1 una de las rutas para la producción de acero utiliza el mineral de hierro y el proceso de reducción directa, del cual se obtiene hierro esponja o HRD (hierro de reducción directa).

El proceso de HYL es una tecnología para convertir el mineral de hierro en HRD, que consta principalmente de hierro metálico en estado sólido. Con este material se lleva a cabo el proceso de fundición en hornos de arco eléctrico para la obtención del acero.

En este proceso de reducción directa se obtiene la transformación del pellet en hierro esponja. El pellet está compuesto en su mayoría por hematita (Fe_2O_3) y algunos otros compuestos como óxido de silicio, óxido de calcio, óxido de aluminio, entre otros. Mediante el uso de agentes reductores que se producen a partir del gas natural en el proceso de reducción directa, se logran reacciones químicas para retirar el oxígeno y producir hierro metálico. Este proceso representa una transformación en la microestructura del óxido de hierro que presenta cambios en el volumen.

Debido a este cambio en la transformación del óxido de hierro a hierro metálico durante el proceso de reducción, el pellet sufre un cambio de volumen, y por consecuencia puede romperse o desintegrarse. Esto genera finos de proceso, los cuales pueden impactar negativamente en todo el proceso de fundición de acero, debido a que provoca, pérdidas de material, aumento de costos por mayor consumo de energía, electrodos y derrames de escoria, entre otros.

El manejo de finos generados durante la reducción directa requiere sistemas especiales de aspiración y transporte para minimizar emisiones ambientales y mantener la estabilidad del proceso. Por ello, es esencial desarrollar y aplicar una metodología de control para la producción de pellets de hierro con propiedades físicas, químicas y metalúrgicas adecuadas, en función del tipo de pellet destinado al reactor de reducción directa.

1.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto de la calidad del pellet (composición química, calidad física y metalúrgica) en la generación de finos durante el proceso de reducción directa mediante ensayos estandarizados a nivel laboratorio e industrial.

1.2. OBJETIVO ESPECIFICOS

- Determinar la calidad física mediante las normas ISO 3271, ASTM E279, ASTM E382, así como la calidad química por el método ASTM E277 y ASTM 1621-13 y la calidad metalúrgica del pellet de los distintos cuerpos de mineral y en las diferentes etapas de proceso.
- Evaluar el comportamiento del pellet en el proceso de reducción directa mediante pruebas de laboratorio con el ensayo COREM R180, el cual está basado en la ISO DR90 (reducibilidad) y en la ISO 11258 para metalización.
- Evaluar diferentes tipos de pellet en prueba industrial (Basket Test), la cual consiste en alimentar bolsas fabricadas a partir de malla de acero inoxidable, la cual contiene mineral de hierro para analizar su comportamiento en el proceso de Reducción Directa.
- Analizar las condiciones de proceso y caracterización de cada una de las muestras de pellet para implementar una estrategia de procesamiento para cada tipo de mineral desde la mina hasta el proceso de reducción directa.

1.3. HIPÓTESIS

La generación de finos de pellet durante el proceso de reducción directa tiene correlación con la calidad química, física y metalúrgica de cada tipo de pellet, es decir pueden existir diferencias en las propiedades del pellet dependiendo de los distintos yacimientos de la mina según su ubicación geográfica que afectan la degradación durante su procesamiento en reducción, la cantidad de energía térmica requerida para la reacción de reducción y los cambios de estructura que se presentan en el pellet pueden ocasionar su degradación durante la reducción.

1.4. JUSTIFICACIÓN

Hoy en día el proceso de fabricación del acero es altamente conocido, se han buscado y desarrollado nuevas tecnologías con el objetivo de disminuir el impacto ambiental y aumentar la eficiencia, por lo cual, es muy importante garantizar la calidad de la materia prima.

La generación de finos de HRD o hierro esponja, es sumamente importante para la preservación del medio ambiente, además, una cantidad significativa de finos puede generar mermas y aumento en los costos durante la fundición, por mayor consumo de energía, consumo de electrodos, derrames de escoria, entre otros. [1].

Por lo tanto, al conocer el impacto de la calidad del pellet durante el proceso de reducción directa, se pueden prevenir los problemas y tomar las acciones necesarias para evitar el aumento de costos, disminuir el impacto en el medio ambiente y eficientizar el proceso de fundición en los hornos de acería, así como evitar pérdidas de productividad y/o paros de planta.

Adicional a el manejo especial en sistemas de aspiración y movimiento de materiales para evitar emisiones ambientales, así como problemas en la estabilidad del proceso de reducción directa (canalización, variaciones de calidad, y estabilidad del proceso).

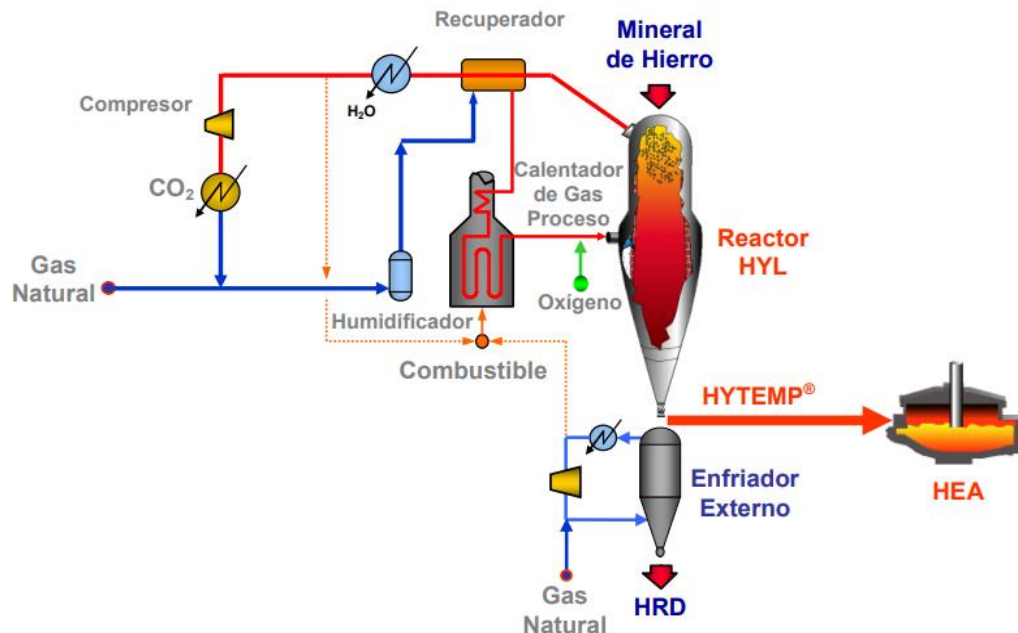
CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE REDUCCIÓN DIRECTA ZERO REFORMADOR (ZR)

El proceso Energiron®, anteriormente conocido como HYL ZR, fue desarrollado por Tenova y Danieli.

Este proceso transforma el mineral de hierro en hierro metálico mediante gases reductores en un reactor de lecho móvil sólido-gas. Produce hierro de reducción directa (HRD), utilizado para fabricar acero. Esta tecnología destaca por su alta eficiencia, bajas emisiones de CO₂ y la calidad del producto final, posicionándose como una de las más competitivas en el mercado. En la [figura 2.1](#) se muestra un esquema general del proceso ZR. [2]



[Figura 2.1.](#) Esquema ZR descarga en caliente. [2]

El proceso ZR realiza la descomposición del gas natural dentro de la zona de reducción del reactor, utilizando como catalizador el hierro metálico del HRD. Así, ocurre la reacción "in situ" del gas natural en la zona de reducción en paralelo con la reducción del mineral de hierro y la carburización del hierro esponja [2].

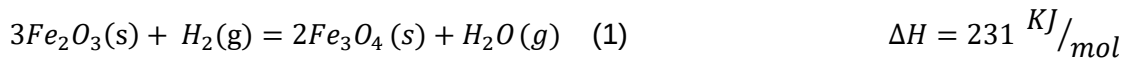
Como descripción general del proceso, el mineral de hierro, generalmente en forma de pellet o trozos, se prepara y se introduce en el reactor de reducción directa.

El gas natural es la fuente de gas reductor, del cual se obtienen los gases reductores directamente en el reactor mediante reacciones de reformación "in-situ".

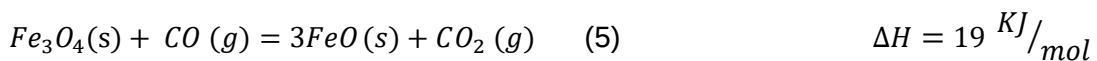
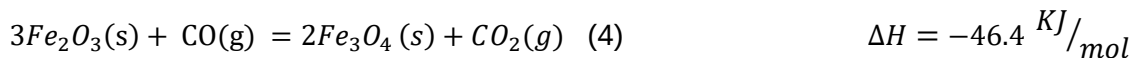
El gas natural (principalmente metano) se descompone produciendo una mezcla de gases reductores que incluye hidrógeno (H_2) y monóxido de carbono (CO).

La mezcla de gases reductores se introduce en el reactor, el gas de reducción reacciona con el oxígeno en el mineral de hierro, reduciendo el óxido de hierro a hierro metálico (Fe), de acuerdo con las siguientes reacciones:

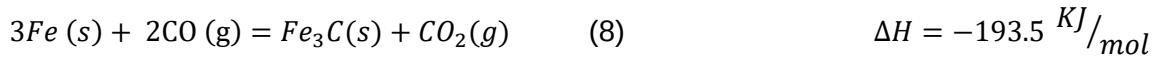
Reducción por hidrógeno:



Reducción por monóxido de carbono:



Reacciones de carburización:



Dentro del reactor, los pellet o trozos de mineral de hierro se reducen a una temperatura controlada (desde los 900°C hasta los 1150°C).

Un punto muy importante en este proceso es la recirculación del gas proceso, el cual se mezcla con gas natural y vapor para ser enriquecidos y reutilizados en el proceso. Esto mejora la eficiencia del proceso y el consumo de gas natural.

El HRD se descarga por la parte inferior del reactor, con un contenido de carbono deseable para su posterior uso en acería.

2.1.1. Conceptos básicos

Durante el proceso de reducción directa es necesario contemplar distintos parámetros de control, los cuales ayudan a que se lleven a cabo todas las reacciones de forma idónea y se obtenga un producto dentro de las especificaciones requeridas.

- Temperatura de entrada al reactor (TER): corresponde a la temperatura del gas reductor suministrado al reactor en la sección de reducción. Usualmente, el TER se indica en grados centígrados.
- Flujo específico de reducción (FER): este factor se define como la cantidad total de gas de reducción suministrado al reactor para procesar una tonelada de HRD.

- Temperatura de salida de reducción (TSR): temperatura del gas de proceso exhausto que sale del reactor, indicada en grados centígrados.
- Temperatura del anillo de reducción (TAR): corresponde a la temperatura en la región de reducción, ubicada aproximadamente a 1.5 metros por encima de la entrada del gas reductor (plenum), y se indica en grados centígrados.
- Inyección de gas natural a reducción (IGNR): expresado en metros cúbicos normalizados por tonelada de hierro es el caudal de gas natural introducido en el circuito de reducción.
- TSC: temperatura salida calentador, generalmente expresado en °C.
- Metalización: proporción entre el porcentaje de hierro en estado metálico y el porcentaje total de hierro, expresado en porcentaje.
- Carbono: abarca todo el carbono presente, ya sea como compuesto (Fe_3C = cementita) o en forma libre (C = grafito). Para satisfacer las necesidades de la planta de acería, el proceso de reducción directa generalmente produce HRD con un contenido de carbono que oscila entre el 2.8% y el 4%.

2.1.2. Flujo gas reducción

Las plantas ZR utilizan gas natural como entrada al proceso, así como hidrógeno, gases provenientes del carbón, coque de petróleo y gasificaciones de combustibles fósiles similares, y gas de horno de coque, entre otros.

La [Tabla 2.1](#) muestra la mezcla de gases que comúnmente se utiliza en este tipo de proceso.

Tabla 2. 1. Rangos de composición de gases reductores.

Gas	Unidad	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	N ₂
Rango	%	50 - 60	10 - 12	1 - 5	22 - 28	4 - 6

El principal agente reductor es el hidrógeno. La reducción con hidrógeno es una reacción endotérmica, por lo que aumentar la temperatura de la reacción incrementa la velocidad de reacción.

2.1.3. Sistema de absorción CO₂

Utilizado para el gas reciclo que contiene un alto contenido de CO₂. Se puede realizar mediante dos tipos de sistemas:

- Absorción química.
- Adsorción física.

El gas de reciclo con un alto contenido de CO₂ ingresa a la torre de absorción por la parte inferior y se desplaza en sentido contrario al flujo de la solución absorbente. El gas sin CO₂ sale de la torre de absorción y se combina con el flujo de gas proceso del circuito de reducción. Este proceso es ampliamente utilizado en los procesos de reducción porque permite obtener un gas con mejor calidad.

Otra forma de separar el CO₂ de una corriente de gas es mediante un proceso físico de adsorción, en lugar de un proceso químico de absorción. En este proceso, la adsorción del CO₂ depende de la presión y la temperatura. Los sistemas de adsorción están diseñados para que el gas entre en la adsorbedora a temperatura ambiente y alta presión. La adsorción se realiza hasta alcanzar un estado de equilibrio y la capacidad de adsorción se agota. Para continuar el proceso, es necesario regenerar el adsorbente, lo que se logra aumentando la

temperatura o reduciendo la presión. [3]. Si bien, existe esta alternativa, es poco utilizada debido a que tiene menor eficiencia de limpieza del gas.

2.1.4. Calidad del HRD

Como principales variables de control de calidad para el producto se tienen tanto variables de calidad química como calidad física.

El porcentaje de hierro total en el HRD se define como la proporción de hierro que se encuentra en forma metálica y el hierro combinado con carbono en forma de cementita (Fe_3C). Este indicador de calidad del producto de metalización oscila entre el 92% y 95%.

La metalización está definida como la relación entre el hierro en forma metálica y el hierro total contenido en el HRD expresado en porcentaje.

$$\%Metalización = \frac{Fe^0}{FeT} \times 100 \quad (9)$$

Donde:

%Metalización: Por ciento de metalización.

Fe^0 : Hierro metálico.

FeT : Hierro total en el HRD (incluye hierro combinado con el carbón).

Otro indicador de calidad para el producto es el porcentaje de carbono, que como ya se mencionó en las plantas de reducción directa se produce HRD con un contenido de carbono que oscila entre el 2.8% y el 4%.

2.2. MINERAL DE HIERRO PARA REDUCCIÓN DIRECTA

2.2.1. Características del mineral

Los minerales de hierro poseen características químicas, físicas y metalúrgicas que pueden influir en su comportamiento durante el proceso de reducción directa.

El pellet tiene una distribución granulométrica y composición química uniforme lo que lo hace muy atractivo para su tratamiento en reducción directa. También cuentan con una alta resistencia mecánica, comparado con otros productos como finos de mineral o sinter feed.

La rotura de pellet, al igual que otros materiales para la fabricación de acero, puede ocurrir tanto en la superficie como en la propia estructura interna del pellet lo que ocasiona su desintegración. [4]

El mineral utilizado para el proceso de peletizado proviene de distintas fuentes o yacimientos de mineral de las cuales se extrae el hierro, estos pueden ser de: hematita masiva, magnetita, titanomagnetita, entre otros.

En este trabajo se contempla el estudio del pellet proveniente de minas de magnetita en México.

2.2.2. Propiedades químicas

Están formadas por mineral de hierro más otros compuestos en menor proporción tales como: óxido de sílice (SiO_2), óxido de aluminio (Al_2O_3), óxido de calcio (CaO), óxido de magnesio (MgO), fósforo, azufre entre otros.

Una de las variables de seguimiento para calidad química del pellet es la basicidad. En base a la literatura se conoce que el pellet con basicidades entre 0.1 y 1 es un pellet ácido y mayores de 1 es un pellet básico. [2]

El pellet ácido se caracteriza por su elevado contenido de sílice y se emplea en procesos de fundición en los que es necesario mantener una escoria de naturaleza ácida. El pellet básico contiene alto contenido de óxidos de calcio y magnesio y ayuda a eliminar impurezas como el fósforo y el azufre.

$$BII = \frac{CaO}{SiO_2} \quad (10)$$

$$BIV = \frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3} \quad (11)$$

2.2.3. Propiedades físicas

La distribución del tamaño en los minerales de hierro destinados a ser reducidos debe ser homogénea. Esto previene problemas como la canalización de gases, caídas de presión y la producción de un producto de calidad no homogénea. [2].

La resistencia al manejo es muy importante para que el mineral soporte el transporte y manejo sin degradarse previo a la entrada del proceso de reducción directa. Una de las variables de calidad física que mide esta resistencia al manejo es el índice de tambor.

También como propiedad física se mide la resistencia a la compresión, la cual se utiliza para medir la resistencia del pellet al soportar cierta carga.

2.2.4. Propiedades metalúrgicas

La reducibilidad del pellet es una medida de la velocidad de reacción entre los agentes reductores y los óxidos de los minerales de hierro. Esta reducibilidad depende de varios parámetros, tales como la estructura cristalográfica, la porosidad, la temperatura y la presión de reducción, entre otros.

Todos los pellets de mineral de hierro experimentan un cambio en volumen durante la reducción debido a las transformaciones cristalográficas en su estructura molecular. Estos cambios se conocen como hinchamiento y pueden aumentar o disminuir el volumen de los óxidos, dependiendo de los diferentes estados de reducción.

La degradación se define como la generación de finos que ocurre durante las diferentes etapas de la reducción. Una degradación excesiva del material puede causar varios problemas en la operación de una planta de reducción directa, tales como: [2]

- a) Canalización de gases.
- b) Caídas de presión.
- c) Deterioro de la calidad del producto.
- d) Aumento de finos en el sistema.
- e) Problemas de manejo y transporte del material.

2.2.5. Peletizado

El proceso de peletizado se utiliza para facilitar la fabricación de acero. Hay dos tipos de proceso: parrilla recta y horno rotativo. El de parrilla recta consta de una parrilla móvil que se mueve a cierta velocidad constante a través de las zonas de secado, oxidación, sinterización y enfriamiento. En el horno rotativo, la zona de secado y oxidación se llevan cabo en una cama de pellet estacionaria, después pasan a un horno rotatorio para la sinterización. [5].

En este proceso el mineral de hierro se mezcla con algunos aditivos. Esta mezcla entra a un mezclador y se deposita en discos peletizadores o tambores para producir pellets verdes de un tamaño de entre 9 mm y 16 mm. Luego, los pellets verdes se introducen en horno de endurecimiento.

Los pellets adquieren propiedades físicas y metalúrgicas adecuadas para su posterior procesamiento. Esto para poder ser procesado en un alto horno o en una planta de reducción directa de mineral de hierro como parte del proceso de fabricación de acero.

El proceso dentro del horno de peletizado consta de cuatro etapas principales: secado, precalentamiento, calentamiento y enfriamiento.

Un pellet que proviene de minerales de magnetita requiere de la oxidación de esta fase para su posterior proceso de reducción.

A continuación, se describe de forma general cada una de las etapas del tratamiento térmico en el horno de endurecimiento:

- Secado: De 105°C a 300°C. Se elimina el agua del pellet en un proceso controlado para evitar grietas.
- Precalentamiento: De 300°C a 900°C: Ocurre la oxidación de la magnetita y la descomposición de los carbonatos.
- Calentamiento: De 900°C a 1330°C. Continúa la oxidación de la magnetita y comienza la formación de silicatos, ferritas de calcio junto con la sinterización de las partículas de hematita secundaria, que se forma por la oxidación de la magnetita. En presencia de MgO, se promueve la formación de ferritas de magnesio.
- Enfriamiento: El pellet se enfría con ventiladores de aire.

La sinterización de las partículas de hematita secundaria ocurre por el crecimiento de grano y la reducción de la superficie. La presencia de una fase

líquida ayuda al proceso de sinterización porque facilita la migración de iones. A temperaturas superiores a 1300°C, la hematita y la hematita secundaria son inestables y forman magnetita, lo que afecta negativamente la microestructura sinterizada debido a la transformación de la estructura cristalina de hematita hexagonal a magnetita cúbica centrada en las caras. La resistencia del pellet depende de su microestructura, particularmente de las características de la red de partículas sinterizadas y de la distribución y cantidad de la fase de escoria. [6]

Para la simulación de la planta de peletizado se utiliza un equipo piloto llamado *pot grate*, en el cual se mezcla el mineral de hierro, aditivos y agua. Se aglomeran en un disco de tamaño piloto, y se llevan a la olla de cocimiento para simular todo el perfil térmico del proceso. Posterior la muestra se prepara y puede ser analizada para diversos tipos de ensayos según sea requerido.

2.2.6. Control de calidad del pellet

Las características del pellet que ingresa a un proceso de reducción directa tienen una influencia muy significativa a lo largo de todo su tratamiento, así como en las propiedades del producto final, en este caso, el HRD. El control de calidad de los pellets se inicia antes del proceso de peletización, mediante la evaluación sistemática de diversas propiedades químicas, físicas y metalúrgicas.

Los parámetros de medición más comunes se presentan en la [Tabla 2.2](#). Con el propósito de regular estas variables, se han establecido diversas normas y métodos de ensayo que buscan estandarizar todas las mediciones.

El control de calidad física y metalúrgica incluye una variedad de pruebas y ensayos, cuya aplicación depende del tipo de proceso de reducción al que se someterá el pellet. En el caso de los procesos HYL, se utiliza la norma ISO 13930-98, basada en el Método HYL, para evaluar el comportamiento del pellet durante el proceso de reducción.

Tabla 2.2. Especificaciones de calidad de los pellet de mineral de hierro.

Tipo de especificación	Norma	Descripción
Física	ISO 4701	Determinación de la distribución del tamaño por tamizado
	ISO 4700	Determinación de la resistencia a la compresión
	ISO 3271	Determinación del índice de tambor y abrasión
	JIS M 8711	Determinación de la resistencia al impacto
	Procedimientos internos (plantas de peletizado)	Determinación de la resistencia por el número de caídas
Química		Propiedades químicas de los pellets
Metalúrgica	ISO 4698	Determinación del índice de hinchamiento libre
	ISO 13930	Determinación del índice de desintegración por reducción a baja temperatura mediante método dinámico
	ISO 11257	Determinación del índice de desintegración por reducción a baja temperatura y grado de metalización
	ISO 11256	Determinación del índice de aglomeración
	ISO 7992 / ISO 7215 / ISO 11257	Determinación de la reducción a baja carga, Determinación de la reducibilidad por el índice final de reducción, Determinación del índice de desintegración por reducción a baja temperatura y grado de metalización.
	Procedimientos internos (plantas de peletizado)	Porosidad

Se ha desarrollado el método R180 como técnica de ensayo metalúrgica para evaluar el comportamiento del pellet durante su transformación en el proceso de reducción directa. Esta técnica utiliza el mismo equipo de la prueba de reducibilidad.

El soporte de la muestra es en un cilindro vertical (75 mm de diámetro interior) con forma de antorcha. La base del soporte de la muestra está fijada a una placa de acero sostenida por cuatro patas. Un cilindro vertical más grande cubre el soporte de la muestra y sella la cámara de gas a nivel de la placa de acero. Todo el conjunto se coloca en una balanza digital conectada a una computadora para la adquisición y el cálculo de datos. [7]

Sobre el conjunto del soporte de la muestra se instala un horno de tubo vertical. Este horno es calentado eléctricamente y puede alcanzar una temperatura máxima de 1200 °C. La temperatura del horno es controlada y registrada por un sistema de control. La temperatura de la muestra se mide con un termopar tipo K.

La composición y el flujo del gas de reducción se controlan mediante medidores/controladores de flujo másico electrónicos conectados al sistema de control. El gas se introduce en la parte inferior de la placa de acero y pasa a través de la cámara de gas, en el que se precalienta. El gas penetra en la muestra por la parte superior y sale por la parte inferior del soporte de la muestra, debajo de la placa de acero. El gas de salida se quema antes de ser liberado a la atmósfera. [7]

Mediante este ensayo es posible determinar el % de los óxidos de hierro y hierro metálico basado en la proporción volumétrica, así como la porosidad de cada muestra.

La prueba R180 es un ensayo no isotérmico que consta de 3 etapas. Comienza con una temperatura baja y un gas reductor más débil, y progresa hacia temperaturas más altas y un gas reductor más fuerte. Los cambios se basan en la evolución de la reducción de la muestra, por lo que se puede realizar a distintos porcentajes de grado de reducción según sea requerido.

Posteriormente a cada ensayo R180, se lleva a cabo una prueba de tambor a 30 rpm del HRD, con el objetivo de determinar la generación de finos mediante un análisis de distribución granulométrica. Se considera como fino de HRD aquel material cuya granulometría se encuentra por debajo de los 6.3 mm.

2.2.7. Especificaciones para el proceso de reducción directa

Se han presentado grandes desafíos de calidad para el comportamiento del pellet durante los procesos de reducción directa.

Las plantas de peletizado generalmente utilizan sus propios recursos de mineral, tal es el caso de México, Venezuela, Irán, India entre otras. Estas plantas producen pellet de alta basicidad con un contenido de hierro más bajo. Debido a su calidad se pueden utilizar como el 100% de la carga en las plantas de reducción directa, ya que soportan altas temperaturas de operación en el proceso. [8]

La [Tabla 2.3 y 2.4](#) muestran las características químicas, físicas y metalúrgicas de diferentes tipos de pellet utilizados para el proceso de reducción directa respectivamente.

[Tabla 2. 3.](#) Análisis químicos y físicos de 8 tipos de pellet para reducción directa. [9].

	Tests	C-0	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6	C-7
Análisis Químicos:									
Fe	%	67.75	67.55	67.46	67.35	67.20	67.16	66.94	66.87
SiO ₂	%	1.40	1.45	1.42	1.47	1.44	1.40	1.46	1.37
Al ₂ O ₃	%	0.82	0.88	0.85	0.82	0.84	0.87	0.86	0.88
CaO	%	0.60	0.59	0.62	0.67	0.77	0.68	0.93	0.67
MgO	%	0.30	0.49	0.62	0.74	0.86	1.01	1.03	1.50
P	%	0.028	0.031	0.032	0.030	0.030	0.032	0.028	0.032
Ganga	%	3.19	3.41	3.51	3.70	3.91	3.96	4.28	4.42
CaO / SiO ₂	-	0.43	0.41	0.44	0.46	0.53	0.48	0.64	0.49
CaO + MgO / SiO ₂ + Al ₂ O ₃	-	0.41	0.46	0.55	0.62	0.71	0.74	0.84	0.96
MgO / SiO ₂	-	0.21	0.34	0.44	0.50	0.60	0.72	0.71	1.09
Análisis Físicos:									
Compresión de pelet de 12.5 a 10 kg/pelet mm		273	278	279	272	280	275	290	288
Porosidad	%	28.5	28.0	28.4	28.5	28.9	28.3	28.5	28.5

Tabla 2. 4. Análisis metalúrgicos de 8 tipos de pellet para reducción directa. [9].

	Tests	C-0	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6	C-7
Desintegración - tambor (8'									
Índice de tambor									
+ 6.33 mm	%	94.0	95.0	97.8	97.4	96.4	96.0	95.9	95.9
Índice de abrasión									
- 0.5 mm	%	1.8	2.2	0.6	0.9	1.2	1.0	1.1	0.9
Fe Total, 3.15 mm	%	91.0	93.0	93.4	92.9	93.0	93.1	92.9	93.0
e Metálico, 3.15 mm	%	85.6	85.5	90.5	90.2	88.5	88.4	88.2	88.2
Carbón, 3.15 mm	%	0.20	0.23	0.14	0.40	0.50	0.60	0.40	0.35
etalización, 3.15 mm	%	93.0	91.9	96.9	97.1	95.2	95.0	94.9	94.8
Reducibilidad									
(DR/DT) %/min		1.22	1.25	1.20	1.19	1.21	1.17	1.14	1.14
Sticking, 800°C									
>20 mm		27.0	10.2	4.3	3.2	4.8	1.6	7.7	4.5
Fe Total, 3.15 mm	%	92.8	93.8	92.2	92.7	92.9	92.0	92.2	91.8
e Metálico, 3.15 mm	%	87.6	87.6	87.9	88.8	90.1	88.9	89.9	88.5
Carbón, 3.15 mm	%	0.47	0.44	0.46	0.49	0.52	0.61	0.49	0.58
etalización, 3.15 mm	%	94.4	93.4	94.6	95.8	97.0	96.6	97.5	96.4

2.3. GENERACIÓN DE FINOS EN EL HRD

Los finos que se generan dentro de un proceso de reducción directa tienen un impacto negativo en el proceso al promover la formación de aglomerados y reducir la permeabilidad de la carga, entre otros factores que causan un efecto negativo en la productividad y calidad del HRD.

La generación de finos es el efecto de las siguientes causas:

- La resistencia del mineral (y el HRD asociado) a la degradación física.
- La estabilidad interna de las partículas durante el proceso de reducción.
- La composición de los gases reductores. Típicamente, la reducción con gases ricos en hidrógeno muestra una tendencia a reducir la generación de finos. [10]
- El efecto de la calidad química y gangas asociadas al hierro, que conforman la microestructura del pellet.

2.3.1. ¿Qué son los finos de HRD?

Se clasifica como finos de HRD a todo el producto que a la salida del reactor se encuentra por debajo de la fracción de 6.3 mm.

Los finos significan degradación del pellet y dificultan el aprovechamiento del HRD en el proceso posterior de fusión.

2.3.2. Mecanismos de formación

La fractura de un pellet se produce como resultado de un debilitamiento en su estructura, lo que conlleva una pérdida de masa. Esto, a su vez, puede alterar la distribución del tamaño y provocar variaciones en las dimensiones de las partículas. Como se observa en la [figura 2.2](#) puede generarse una fractura o rotura y a su vez tener una distribución de fragmentos por rotura del cuerpo.

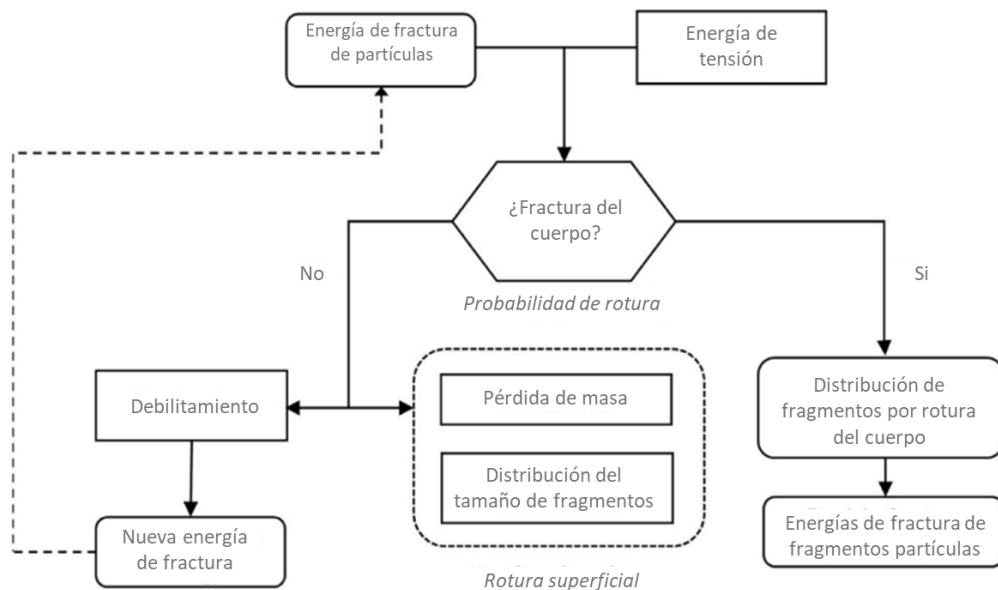


Figura 2.2. Esquema sobre la respuesta mecánica de un pellet individual a un único evento de estrés. [11].

2.3.3. Variables relacionadas con la generación de finos

Se han desarrollado diversos modelos con el fin de simular la degradación mecánica de los pellet durante la operación en plantas de reducción y así poder evaluar la influencia de los finos generados en la respuesta del gas reductor.

Como principales variables se han analizado el efecto de distintos grados de reducción en las propiedades físicas del pellet para estimar la proporción de los finos generados dentro del proceso de reducción.

Se ha evaluado la microdureza, la resistencia a la compresión en frío, la pérdida de masa en pruebas de caída y las distribuciones de tamaño de poros. A partir de estos resultados, se estima un parámetro para un modelo de pérdida de masa debido a la rotura superficial, lo que demuestra una mayor susceptibilidad a la rotura a medida que avanzaba la reducción. [12]

2.3.4. Impacto de finos

Como ya se ha mencionado en este trabajo, el impacto que tiene la generación de finos de hierro esponja (HRD) es en los procesos de reducción directa y acería. Dentro los cuales se destacan:

- Mermas y aumento en los costos durante la fundición, por mayor consumo de energía, consumo de electrodos, derrames de escoria, entre otros.
- Manejo especial en sistemas de aspiración y movimiento de materiales para evitar emisiones ambientales.
- Problemas en la estabilidad del proceso de reducción directa (canalización, variaciones de calidad y estabilidad de proceso).

Esta degradación plantea un desafío significativo para el funcionamiento del reactor, ya que afecta negativamente la permeabilidad del lecho y, en consecuencia, reduce la productividad de este. Además, los fragmentos con superficies expuestas, al no estar recubiertos, funcionan como adhesivos, lo que provoca la formación de conglomerados debido a la adherencia de los pellets. Esto también impacta de manera adversa la penetración de los gases de reducción [13].

2.3.5. Metodologías de evaluación

La evaluación del flujo de material en la zona de reducción requiere describir el comportamiento de tres partes principales: la fase gaseosa, que consiste en un gas de reducción a ($\approx 900^{\circ}\text{C}$) de temperatura, y dos fases sólidas que son el pellet de mineral de hierro y los fragmentos que resultaron de la degradación mecánica.

Con el propósito de realizar estudios que describan este comportamiento se emplean técnicas como:

- Pruebas de Laboratorio.
- Pruebas en plantas piloto.
- Pruebas de bolsas. (Basket tests).
- Pruebas industriales en planta.

Las pruebas de laboratorio se realizan bajo condiciones controladas, las cuales permiten tener una certeza de las variables que afectan la degradación del pellet al igual que las pruebas en la planta piloto.

En pruebas de bolsas si bien se puede tener el resultado para cada una de las variables de proceso, no se conoce con certeza el efecto del gas de reducción y temperatura, ya que no se tiene el momento exacto en que el pellet pasa por las zonas del reactor, se puede establecer una estimación en base al tiempo de residencia, de cada una de las bolsas. Al igual esta prueba, al considerar entrar al reactor industrial, puede tener afectaciones por estabilidad y paros del reactor.

Las pruebas industriales, consisten en alimentación de lotes controlados de pellet, los cuales muestran los efectos de ciertas características del pellet durante el proceso y periodo de evaluación. En este tipo de pruebas se requiere de un control durante la alimentación y descarga del reactor, así como contar con lotes representativos de las características a evaluar.

CAPITULO III

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo se realiza con el objetivo de evaluar el efecto de la calidad del pellet en la generación de finos durante el proceso de reducción directa, para ello fue necesario realizar la selección de muestras, preparación, y caracterización de cada uno de los minerales de la mina que se evaluaron.

El pellet elaborado a partir de cada tipo de mineral se produjo bajo las mismas condiciones del proceso de peletizado, con el propósito de evaluar exclusivamente el efecto de la calidad asociado a las diferentes variedades de mineral.

Para la obtención de las muestras, se seleccionaron 5 tipos de mineral, de los cuales se obtuvo 1 tonelada por cada tipo.

Las muestras fueron sometidas a un proceso de secado a temperatura ambiente, seguido por una etapa de cribado utilizando una malla de 6.35 mm. Las fracciones gruesas (partículas con tamaño superior a 6.35 mm) fueron enviadas al laboratorio para su trituración, la cual se llevó a cabo mediante una quebradora tipo Grizzly, conforme al método establecido en la norma ASTM E877.

El tratamiento y la preparación de las muestras se realizaron conforme a los procedimientos establecidos en las normas ISO 3082 e ISO 3085, con el fin de llevar a cabo los ensayos correspondientes.

En la [figura 3.1](#) se muestra el montaje experimental utilizado.

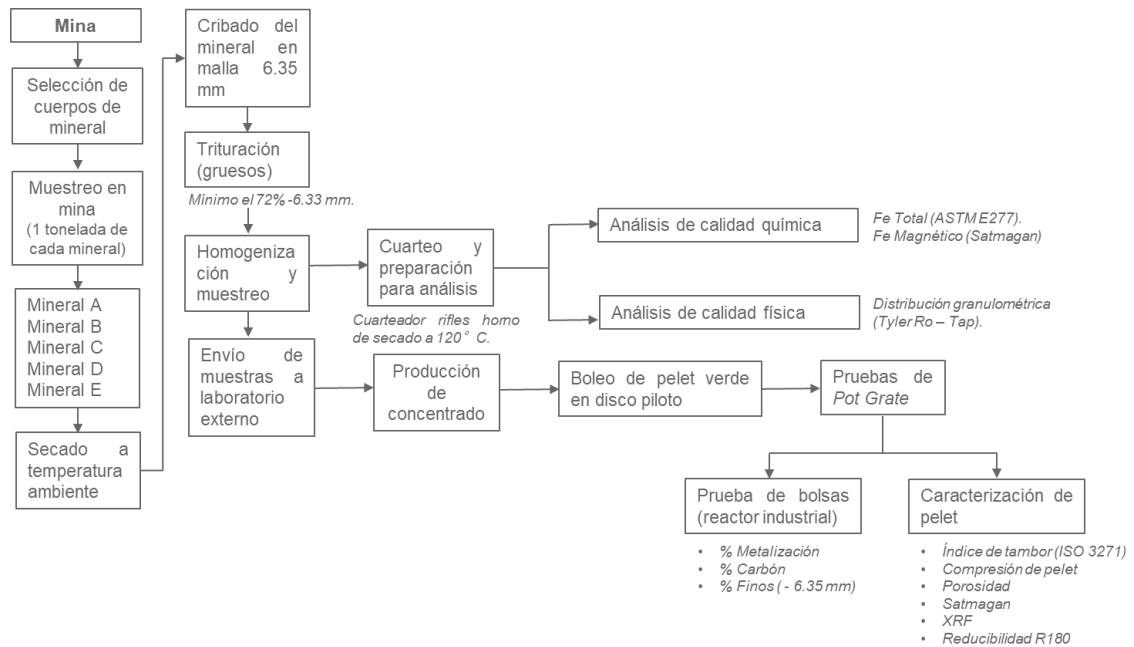


Figura 3.1. Tratamiento y preparación de muestras de mineral desde la mina para el desarrollo de este trabajo.

3.2. MUESTREO Y PREPARACIÓN

El muestreo se realizó por cada tipo de mineral, de acuerdo con su ubicación geográfica y características de cada tipo de mineral. En la [figura 3.2](#) se muestra una representación de una mina a cielo abierto.

La mina se encuentra dividida según las zonas geográficas, por lo que el proceso de evaluación de los distintos minerales consiste en la obtención de muestras de 5 distintas zonas de esta.



Figura 3. 2. Mina a cielo abierto.

3.3. PREPARACIÓN DE CONCENTRADO

Debido a que los distintos tipos de mineral provienen de la magnetita, es necesario obtener un concentrado mediante un proceso de beneficio. El proceso mediante el cual se obtiene el concentrado debe estar homologado a las condiciones operativas de la planta industrial. Para este propósito, se empleó una planta piloto que replica las condiciones del proceso de concentración magnética utilizado en la planta.

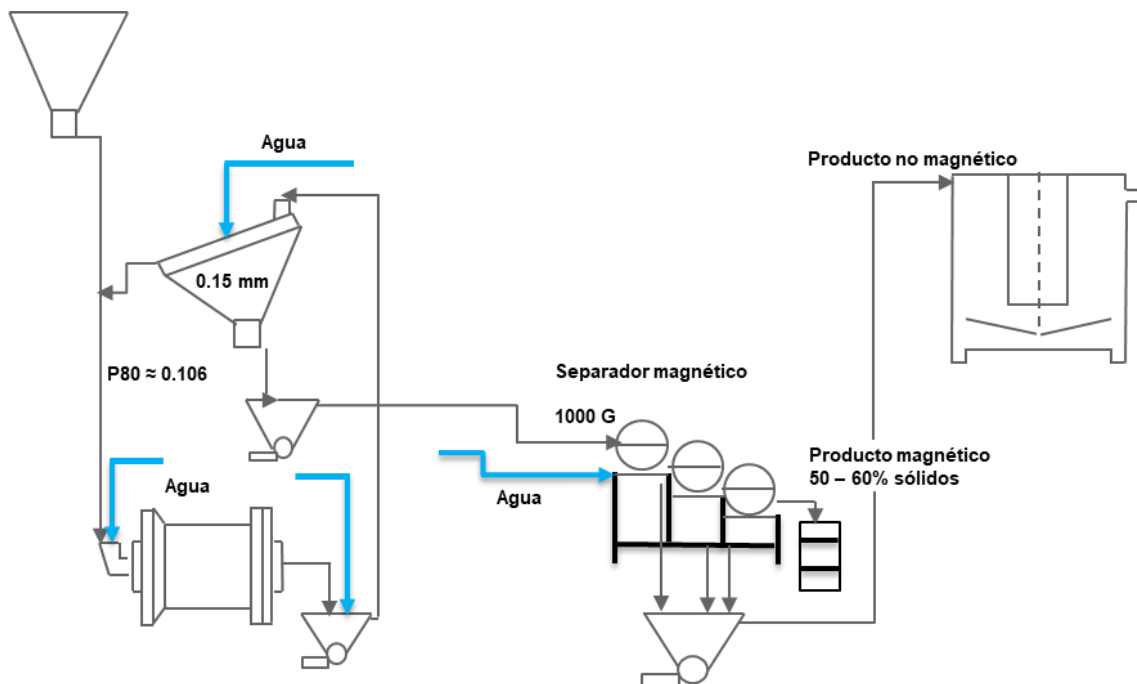
La muestra de mineral es introducida en un molino, en el cual se mezcla con agua, manteniéndose una densidad de pulpa controlada entre 2.2 y 2.5 kg/l. Como resultado de este proceso, se obtiene un producto cuyo 80 % del material presenta una granulometría igual o inferior a 0.106 mm.

Para garantizar el tamaño de partícula requerido, se utiliza una criba con apertura de 0.15 mm para la clasificación de tamaño. La muestra que queda por encima

de este tamaño retorna al molino para garantizar el cumplimiento como se observa en la [figura 3.3](#).

Esta pulpa se alimenta a un separador magnético, el cual consta de 3 tambores con 1000 G de intensidad magnética. En este proceso la densidad máxima es de 1.35 kg/l. El producto magnético que se obtiene es el concentrado primario y el producto no magnético son las colas primarias.

El concentrado primario es posteriormente alimentado a una segunda etapa de molienda en un molino de bolas, alcanzándose una granulometría de 0.038 mm. Durante este proceso, se controla la densidad de la pulpa en un rango de 1.9 a 2.3 kg/l, y se lleva a cabo la clasificación por tamaños.



[Figura 3.3](#). Planta piloto de concentración magnética.

3.4. PRUEBAS DE POT GRATE

El equipo de *potgrate* es un equipo que se utiliza para la obtención de pellet mediante distintas fuentes de concentrado de mineral, como planta piloto de peletizado.

La muestra de concentrado se alimenta a una tolva, la cual se mezcla con agua y distintos aditivos, y se alimenta a un disco piloto.

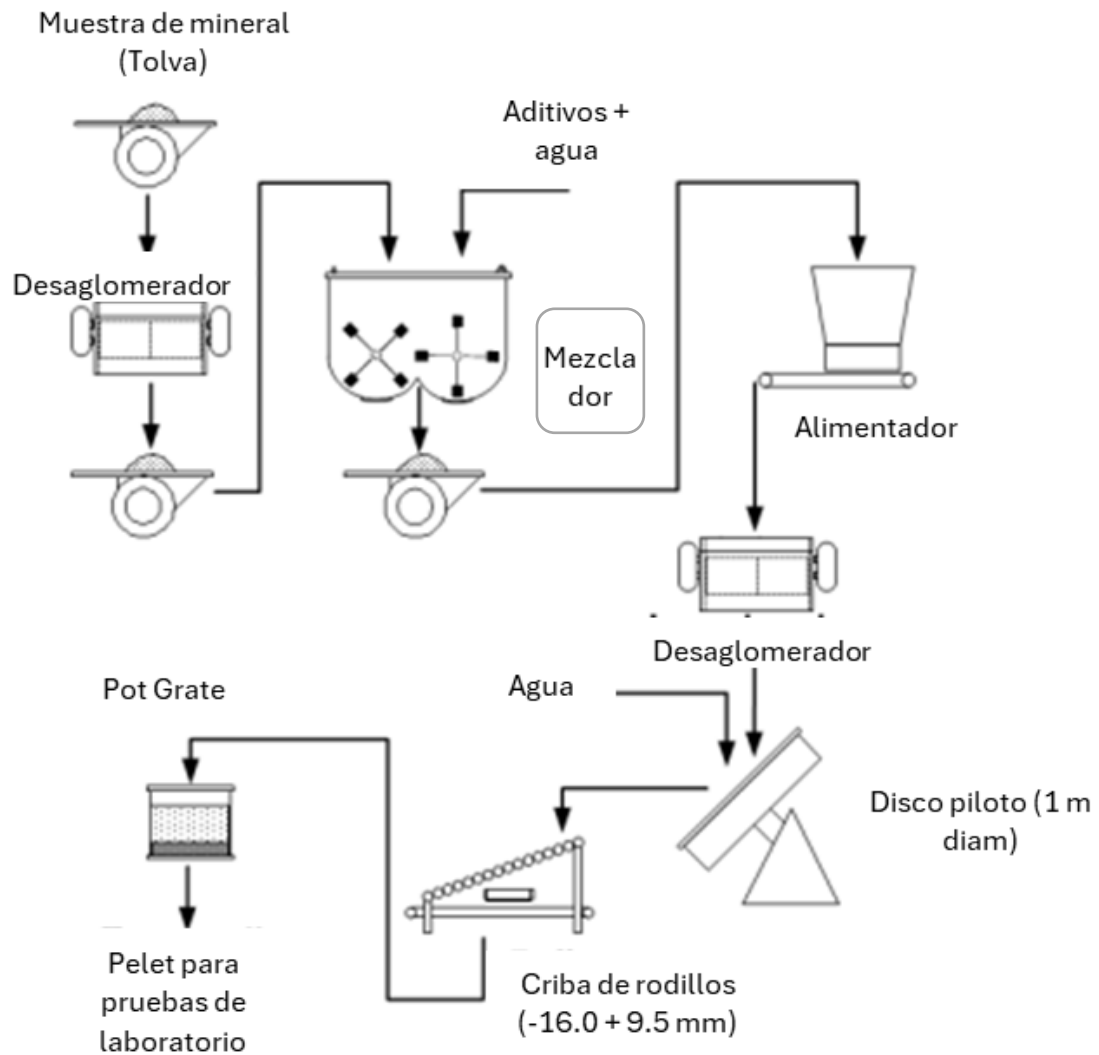
La muestra que se debe de alimentar por cada tipo de mineral debe ser aproximadamente de 150 kg para realizar 1 prueba de potgrate.

En este estudio se utiliza un disco piloto de 1 metro de diámetro el cual gira a 20 rpm. Mediante el efecto de bola de nieve se logra obtener el pellet verde.

En el disco piloto se hace la adición de agua para lograr formar el tamaño de pellet deseado, el cual se criba y se alimenta únicamente el tamaño de pellet requerido. Este debe cumplir un tamaño de entre 12.5 mm y 10 mm.

Las condiciones bajo las cuales se desarrolla la prueba se definen con base en el perfil térmico del horno de peletización y los parámetros operativos de la planta. Con el fin de asegurar el cumplimiento de dichas condiciones, se realiza la medición de la temperatura de interfase.

En la [figura 3.4](#) se observa el diagrama de flujo de un equipo *pot grate*.



[Figura 3. 4.](#) Diagrama de flujo planta piloto de Peletizado.

Al finalizar la prueba se descarga la olla de *pot grate*, y se recolecta toda la muestra.

Se pasa a una criba vibratoria de apertura de 6.35 mm para separar el pellet chip de la muestra evaluada.

Se toma la muestra total y se realizan los análisis correspondientes como se observa en la siguiente [Tabla 3.1](#)

[Tabla 3.1.](#) Ensayos requeridos para pellet de *pot grate*.

Técnica de caracterización	Párametros de la prueba	Propiedades / composición a determinar
Rayos X	Calidad química	SiO ₂
		Al ₂ O ₃
		Fe ₂ O ₃
		MgO
		CaO
		Na ₂ O
		K ₂ O
		TiO ₂
		MnO
		P ₂ O ₅
		ZnO
ISO 3271	Calidad física	Índice de tambor Compresión
R180	Calidad metalúrgica	Reducibilidad
ASTM E276		% Finos (- 6.3 +0.5 mm después de 30 revoluciones)

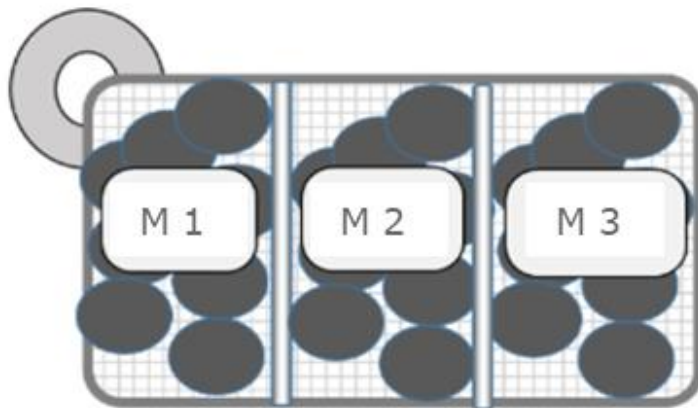
3.5. SIMULACIÓN DEL PROCESO DE REDUCCIÓN DIRECTA

Consiste en alimentar al reactor industrial bolsas fabricadas a partir de malla de acero inoxidable que en el interior contiene cada una de las muestras de mineral de hierro para analizar su comportamiento en el proceso, estas bolsas atraviesan cada una de las etapas del proceso de reducción y se puede obtener la trazabilidad de cada una de ellas, así como todas las condiciones de proceso a las que fueron sometidas.

Para la realización de pruebas de bolsa se hizo la siguiente agrupación:

- Mineral A + Mineral B → Muestra 1
- Mineral C + Mineral D → Muestra 2
- Mineral E → Muestra 3

Se arman 100 bolsas en total con arreglo triple como se muestra a continuación en la [figura 3.5](#).



[Figura 3.5](#). Bolsa arreglo triple.

Las 100 bolsas son alimentadas al reactor industrial, en grupos de 8 bolsas. Estas se alimentan al reactor en la parte alta en intervalos de cada 15 minutos, para evitar un posible taponamiento.

Al tener la identificación de cada una de las bolsas y alimentarlas de manera ordenada por intervalos de tiempo, se conoce su hora exacta de alimentación al reactor.

Después de un periodo de 8 horas las bolsas empiezan a salir del reactor, por lo que se procede con la recolección de bolsas.

Una vez recolectadas todas las bolsas se identifica la hora de salida, con ello se puede obtener el tiempo de residencia de cada bolsa, y clasificar por grupos con una distribución, y así evaluar el efecto del tiempo de residencia en el reactor.

De igual forma se puede conocer las variables de proceso en este determinado periodo de tiempo.

Se procede con la apertura de las bolsas y se juntan las que corresponden a cada tipo de muestra para realizar los ensayos de laboratorio correspondientes. Los ensayos de laboratorio realizados en el HRD se muestran en la [Tabla 3.2](#).

[Tabla 3.2](#). Ensayos de laboratorio para HRD de prueba de bolsas.

Ensayo	U	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3
Carbón	%	✓	✓	✓
Metalización	%	✓	✓	✓
Finos - 6.35 mm	%	✓	✓	✓

La determinación de carbono se realiza mediante la técnica de combustión, utilizando el equipo Eltra Elementrac CSi.

La metalización se determina mediante la técnica de vía húmeda, obteniendo el Fe total utilizando el método ASTM E277, junto con el Fe metálico.

La distribución por tamaños de partículas se realizó con tamices de la serie TYLER No. 15.88 mm, 12.7 mm, 9.53 mm, 6.35 mm, 3.18 mm, utilizando un RO-TAP electrónico digital.

CAPITULO IV

RESULTADOS

Con el fin de evaluar el impacto de los diferentes minerales en la generación de finos durante el proceso de reducción directa, se procesaron las muestras bajo las mismas condiciones utilizadas en el proceso industrial, tanto en el laboratorio como en la planta piloto. A continuación, se presentan los resultados obtenidos en cada etapa del proceso.

4.1. ANÁLISIS QUÍMICO DE LOS MINERALES

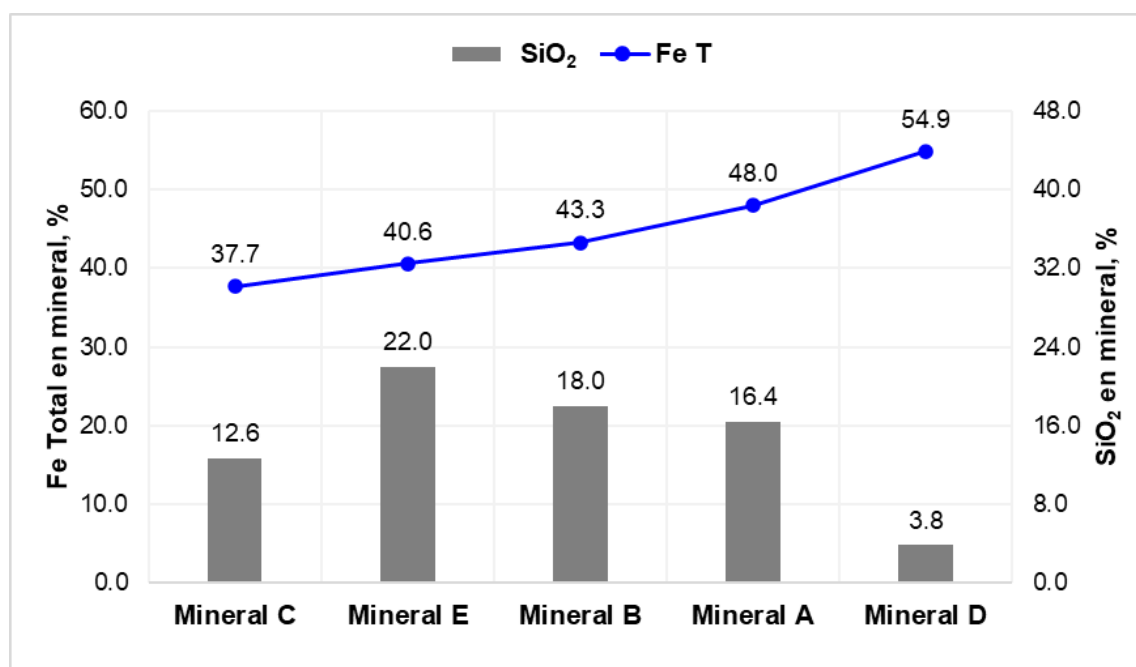
Existe diferencia significativa en la calidad química de las muestras de cada cuerpo de la mina, como se observa en la [Tabla 4.1](#). Los rangos de Fe Total varían desde 37.7% hasta 54.9%, mientras que las gangas, como el óxido de sílice desde 3.8% hasta 22%. Las otras gangas presentan variaciones como el óxido de magnesio desde 1% hasta 2.77% y el óxido de calcio desde 4.14% hasta 13.9%.

Los elementos como sodio, potasio, titanio, vanadio, zirconio, fósforo y zinc se presentan en concentraciones menores como trazas de mineral.

Tabla	4.1.	Resultados de calidad química de mineral.																
Producto	U	Fe	T	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	V ₂ O ₅	ZrO ₂	ZnO	S
Mineral A	%	48.0	16.4	4.6	68.7	1.4	3.6	1.25	0.17	0.22	0.07	0.05	0.01	0.01	0.02	0.01	2.0	
Mineral B	%	43.3	18.0	4.9	61.9	2.2	5.4	1.16	0.16	0.24	0.10	0.11	0.01	0.01	0.02	0.01	3.0	
Mineral C	%	37.7	12.6	4.0	53.9	2.2	13.9	0.74	0.14	0.22	0.09	0.11	0.01	0.01	0.02	0.01	2.6	
Mineral D	%	54.9	3.8	1.0	78.5	1.0	8.2	0.10	0.03	0.05	0.09	0.05	0.01	0.01	0.02	0.01	1.6	
Mineral E	%	40.6	22.0	6.2	58.1	2.8	4.1	1.32	0.25	0.33	0.15	0.15	0.01	0.03	0.02	0.01	1.9	

Mayor Fe Total y menor ganga en el mineral representa mayor beneficio para el proceso, debido a que las impurezas en el concentrado provocan un aumento en los costos de operación del horno de arco eléctrico por tonelada de acero [14].

En la [figura 4.1](#) se puede observar la relación que existe entre el Fe Total y el contenido de óxido de silicio en los distintos minerales de hierro evaluados.



[Figura 4.1.](#) Concentración de SiO_2 y Fe Total en cada tipo de mineral.

La caracterización de fases mineralógicas de las muestras indica que el hierro total se presenta principalmente como magnetita (Fe_3O_4). Asimismo, se logró identificar especies como hematita, pirita y pirrotita, las cuales, durante el proceso de concentración magnética se mantienen presentes. Una vez caracterizadas las muestras, se procedió a su procesamiento conforme al esquema del proceso industrial, realizándose la etapa de trituración. En esta fase, se garantizó que al menos el 72 % del material presentara un tamaño mínimo de 6.33 mm. Posteriormente se prepararon para la siguiente etapa del proceso, concentración

magnética, bajo las condiciones de operación mencionadas en la sección 3.3 durante la preparación de concentrado.

4.2. CONCENTRACIÓN MAGNÉTICA

Previo a la concentración magnética es importante garantizar el tamaño de partícula del mineral con la finalidad de lograr que los granos de las gangas se separen de las partículas valiosas de magnetita y poder eliminarlos para mejorar el contenido de Fe Total. Acorde a estudios realizados en planta con estos minerales, la liberación se logra con el 80 % mínimo con tamaño de partícula menor de 0.038 mm, que corresponde a la variable P80, la cual representa que el 80% del producto es menor o igual a la medida especificada. En la distribución granulométrica de las muestras, después del proceso de molienda de laboratorio se obtuvieron como resultado todas las muestras dentro de esta especificación.

- Muestra A se obtuvo un valor de P80 de 0.036 mm.
- Muestra B se obtuvo un valor de P80 de 0.038 mm.
- Muestra C se obtuvo un valor de P80 de 0.039 mm.
- Muestra D se obtuvo un valor de P80 de 0.040 mm.

La eliminación de gangas se logró mediante el proceso de separación magnética, con la finalidad de lograr la calidad química requerida para peletizado. Los resultados muestran mejora en el Fe Total con rangos desde 67.4% hasta 69.9%. La recuperación en peso, y la suma de gangas tienen una correlación directa con la génesis de cada tipo de mineral como se puede observar en la [Tabla 4.2](#).

Tabla 4.2. Resultados de concentración magnética por cada tipo de mineral.

Producto	U	Fe T	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	V ₂ O ₅	ZrO ₂	ZnO	S	Suma gangas
Mineral A	%	69.9	1.3	0.2	0.2	0.3	<0.10	<0.01	0.14	0.07	<0.01	0.01	<0.01	<0.02	<0.01	0.04	2.2
Mineral B	%	68.0	2.2	0.6	0.6	0.6	<0.10	0.04	0.12	0.11	0.01	0.02	0.01	<0.02	<0.01	0.23	4.6
Mineral C	%	68.0	2.0	0.6	0.6	0.6	<0.10	0.04	0.06	0.10	<0.01	<0.01	<0.01	<0.02	<0.01	0.38	4.5
Mineral D	%	68.5	1.5	0.3	0.6	0.4	<0.10	0.03	0.03	0.10	<0.01	0.01	<0.01	<0.02	<0.01	0.18	3.1
Mineral E	%	67.4	2.6	0.7	0.7	0.6	<0.10	0.06	0.09	0.12	<0.01	0.01	0.02	<0.02	<0.01	0.22	5.0

Una de las variables que presenta mayor diferencia entre las muestras es el porcentaje de MgO. Por ejemplo, el mineral E con el mayor contenido de 0.7%. Este mineral es el que contiene mayor grado de impurezas totales, y por ende menor contenido de Fe Total a nivel concentrado.

4.3. PELETIZADO

Las muestras de concentrado se prepararon para el proceso de peletizado. El primer paso fue filtrar para eliminar el exceso de agua y lograr una humedad óptima para el proceso de peletizado, es decir dentro de un rango de 8 a 9.5%. [15].

En la [figura 4.2](#) se muestran los resultados obtenidos del porcentaje de humedad para cada una de las pruebas realizadas.

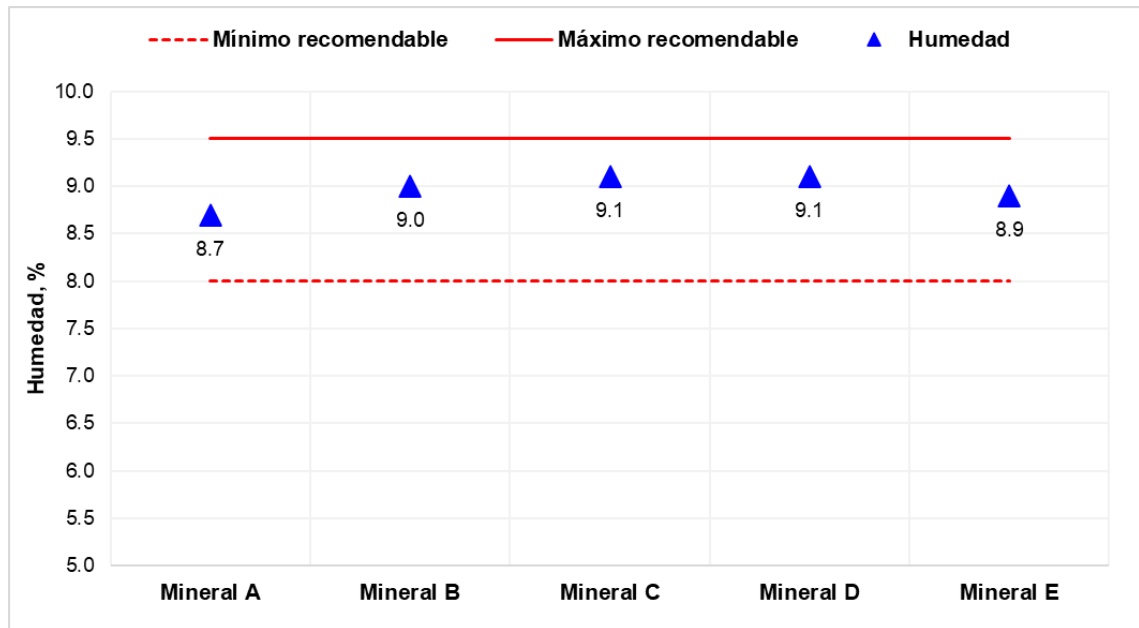


Figura 4.2. Resultados de %humedad en cada tipo de mineral.

El boleado se realizó en un disco peletizador, en el cual se controló la velocidad del disco a 6.2 m/s y la descarga del pellet verde se cribó para obtener un tamaño de pellet con las mismas características que el pellet para reducción directa. De acuerdo con la literatura se recomienda sea mínimo el 95% mayor a 6 mm y menor de 16 mm. [16]

Como se puede observar en la [figura 4.3](#), todas las muestras dan como resultado que cumple con especificación.

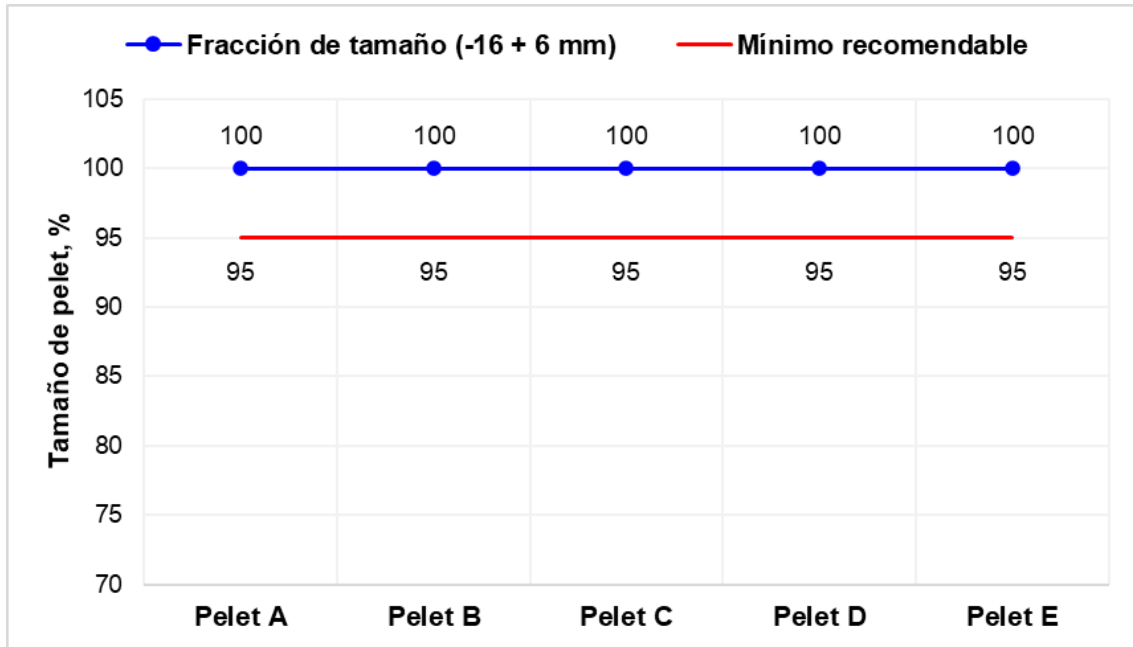


Figura 4.3. Resultados de tamaño de pellet.

El pellet verde después del cribado se alimenta al pot grate, cuya descripción del equipo se describe en la sección 3.4. Es importante mencionar, que se realizó un ajuste de las condiciones del potgrate para que fueran representativas y similares del proceso industrial. Esto implica diferentes etapas como son el secado ascendente, descendente, prequema, Z-I, Z-II, Z-III y Z-IV. Como referencia se utilizó el perfil térmico de la planta, bajo condiciones en las cuales se alcanza una temperatura de 1320°C en la zona IV.

En la figura 4.4 se describe el perfil térmico del utilizado en las muestras vs la planta. Como se puede observar se logró controlar la temperatura en cada etapa de proceso.

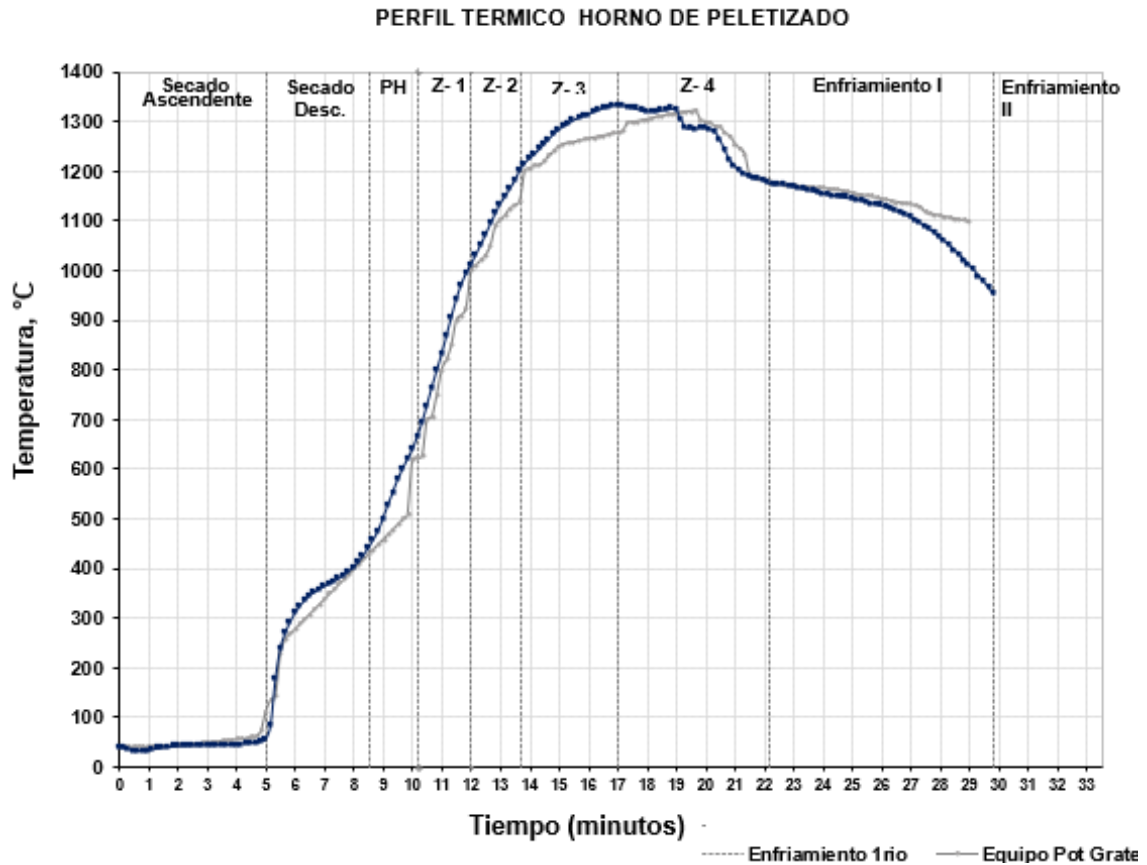


Figura 4. 4. Perfil térmico planta peletizadora vs equipo pot grate.

Al pellet que resulta posterior a su tratamiento térmico en el equipo de pot grate, se realizan ensayos físicos, químicos y metalúrgicos. En la [Tabla 4.3](#) se muestran los principales resultados obtenidos por cada tipo de pellet en composición química.

Tabla 4.3. Resultados de calidad química de pellet por cada tipo de mineral.

Composición química (%)	Muestra				
	Pelet A	Pelet B	Pelet C	Pelet D	Pelet E
SiO ₂	1.24	2.20	1.97	1.55	2.43
Al ₂ O ₃	0.20	0.65	0.50	0.30	0.60
FeTotal	68.89	67.14	66.37	67.14	65.88
MgO	0.19	0.54	0.61	0.57	0.71
CaO	0.24	0.62	0.64	0.39	0.52
Na ₂ O	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10
K ₂ O	<0.01	0.04	0.04	0.03	0.06
TiO ₂	0.13	0.12	0.05	0.03	0.09
MnO	0.08	0.11	0.09	0.12	0.11
P ₂ O ₅	<0.01	0.02	<0.01	<0.01	<0.01
ZnO	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
BII	0.20	0.28	0.33	0.25	0.21
BIV	0.30	0.41	0.51	0.52	0.41
Gangas Totales	2.10	4.34	3.91	3.00	4.55

Como se puede observar, el pellet con mayor contenido de ganga es el pellet E. Y el pellet con menor contenido de ganga es el pellet A. Por ende, se obtiene un menor y mayor contenido de Fe Total, como ya se mencionó previamente.

En el contenido de óxido de magnesio se pueden observar diferencias significativas, siendo el pellet E el que presenta mayor contenido de este elemento.

También se realizaron ensayos físicos para cada una de las muestras. De la manera que se muestra en las [figuras 4.5 y 4.6](#) para el caso de los pellets C y D se observa la similitud en los valores obtenidos en índice de tambor que están por debajo del 93%. Mientras que para el pellet A, B y E los valores se mantienen por arriba del 94%. De acuerdo con la revisión de la literatura, el valor mínimo requerido para pellets destinados a procesos de reducción directa es del 92 %.

[17]

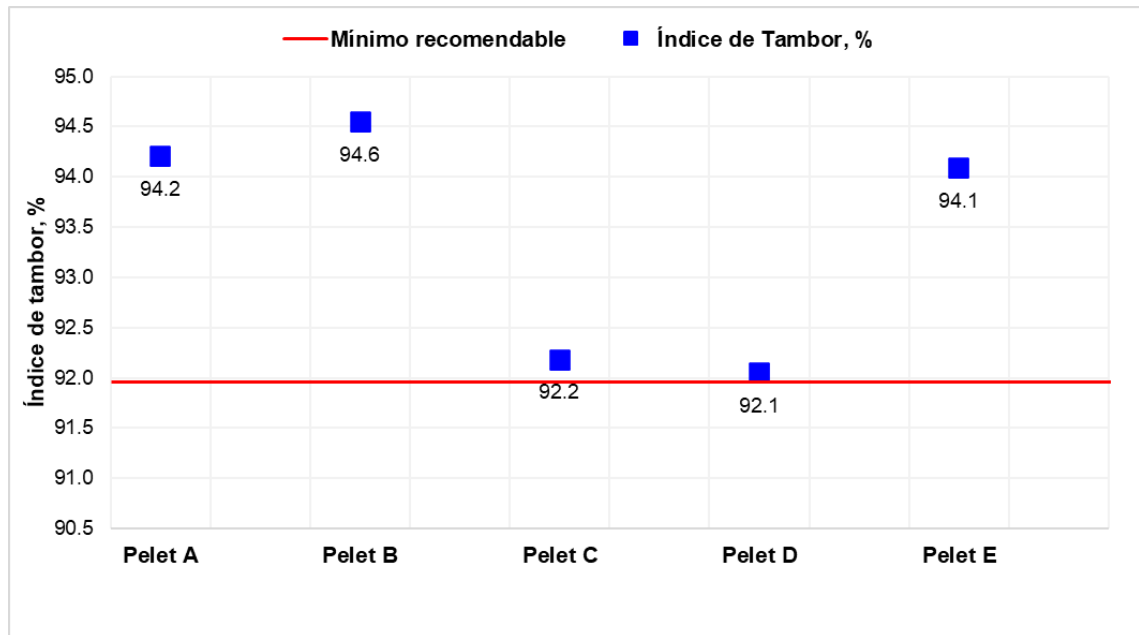


Figura 4.5. Resultados de calidad física – Índice de Tambor.

Como referencia en planta se obtiene un 94% comúnmente, lo cual asegura que el pellet resistirá el manejo al ser trasladado a la alimentación del reactor de reducción directa.

Al igual que en los resultados de índice de tambor, en la variable de resistencia a la compresión también se observó el mismo distingo en las muestras de pellet C y D como se muestra en la [figura 4.6](#).

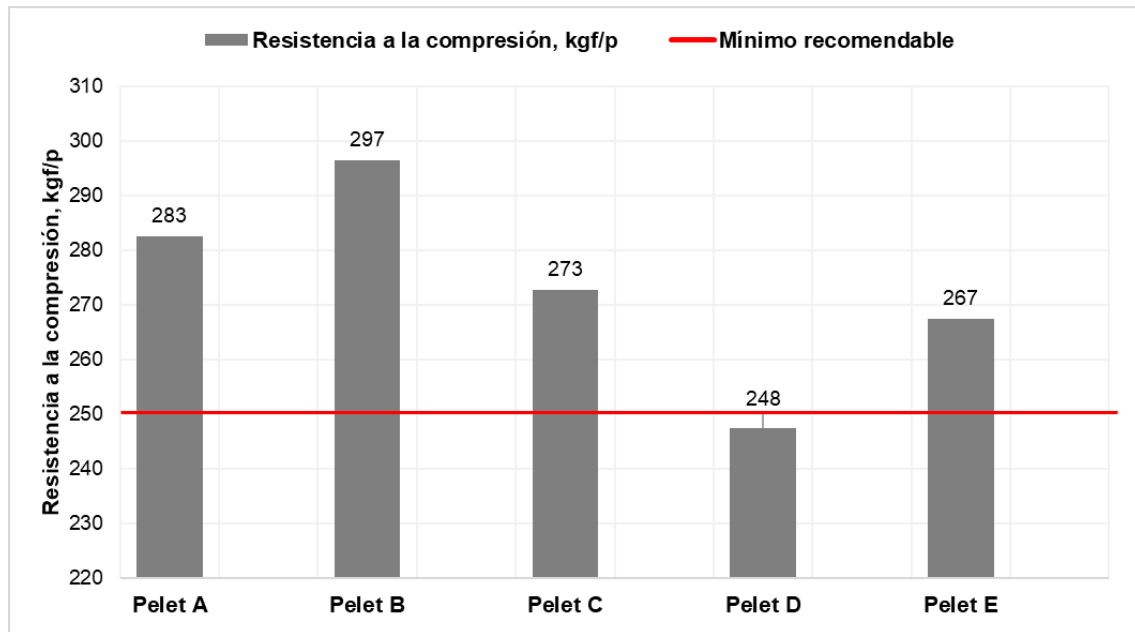


Figura 4.6. Resultados de calidad física – Resistencia a la compresión.

En las variables de índice de tambor y resistencia a la compresión se obtienen resultados que se encuentran dentro de los rangos recomendables, por lo que no generan un impacto en el resultado de generación de finos.

4.4. REDUCCION DIRECTA

4.4.1. Resultados de pruebas de laboratorio

Las pruebas de reducción se realizaron acorde al método R180, en el cual se realizan los cambios de temperatura y composición de gases simulando las condiciones del reactor industrial.

Acorde a los resultados del HRD producido a nivel laboratorio para metalización, todas las muestras se mantienen conforme al estándar recomendado, [17], como se muestra en la [figura 4.7](#).

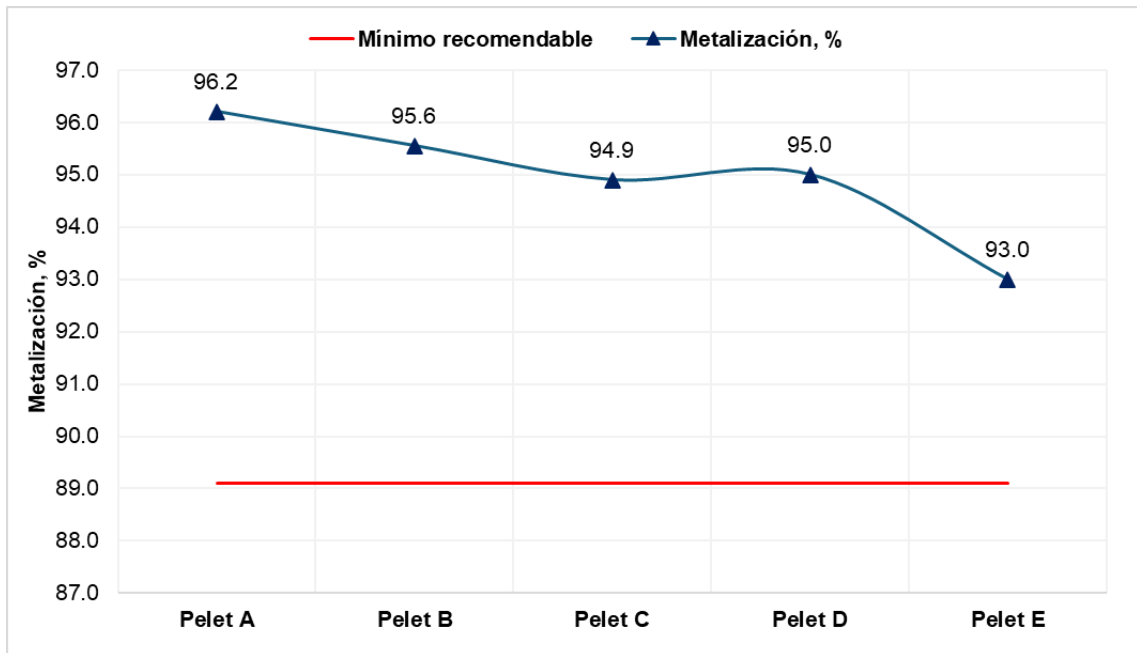


Figura 4. 7. Resultados de metalización.

A continuación, en la [figura 4.8](#) se puede observar el pellet B y C después de esta prueba de reducción R180 en el tamaño mayor a 9.5 mm. En las pruebas de reducción el pellet C muestra tener una mayor degradación que el pellet A y B.

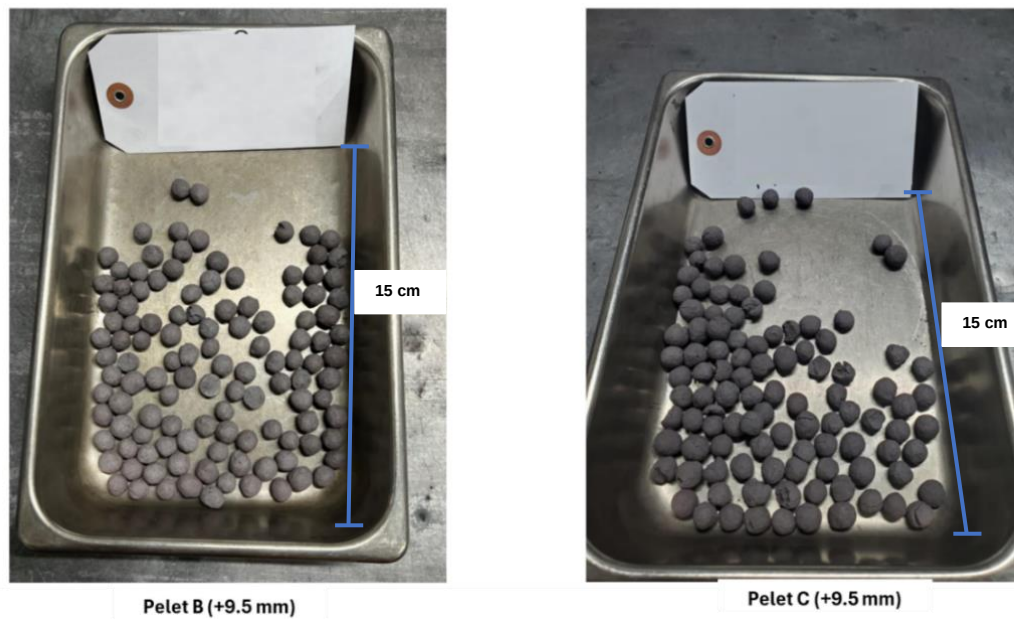
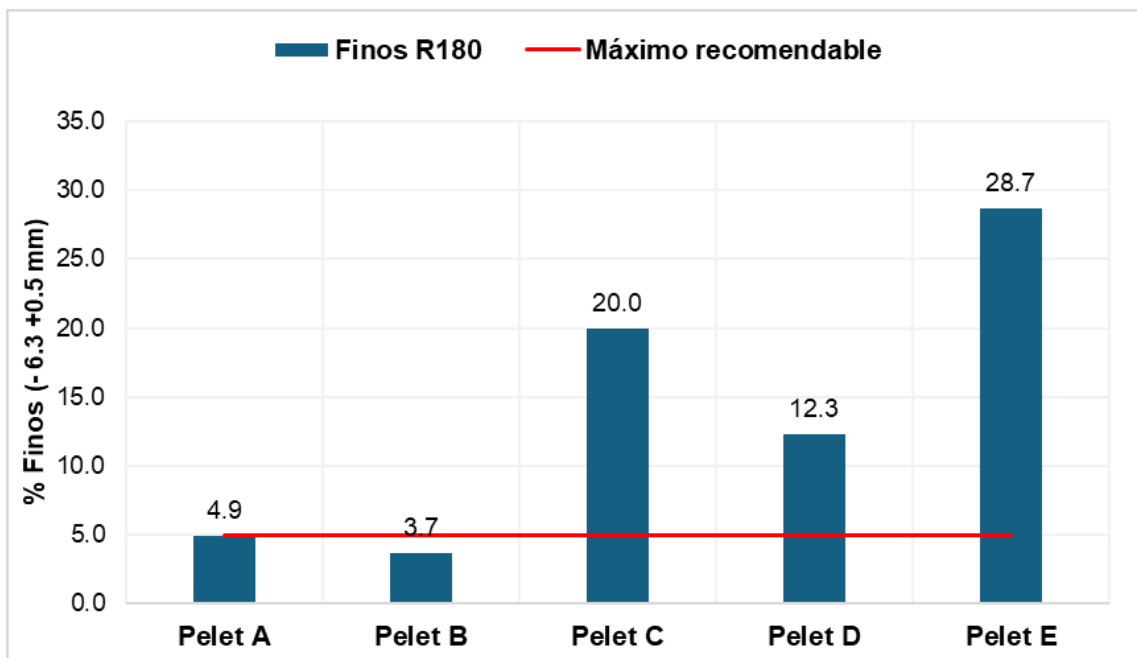


Figura 4. 8. Muestras de pellet después de la reducción R180.

El pellet que presentó mayor degradación durante esta prueba metalúrgica es el pellet E con un porcentaje de finos de 28.7% vs el pellet B con 3.7 como degradación. Cuando como límite máximo se recomienda que sea del 5%. [17] Los resultados se pueden observar en la [figura 4.9](#).

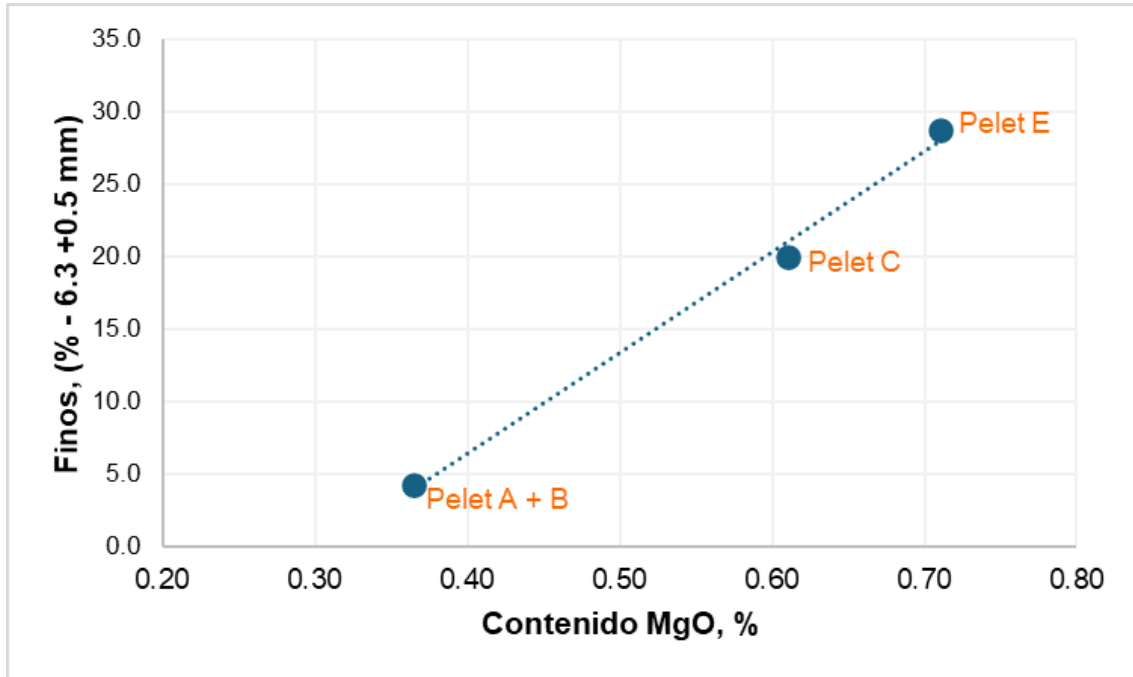
Esto nos demuestra que el pellet E tiene un 87% mayor degradación que el pellet B durante el proceso de reducción directa en las pruebas de R180.



[Figura 4.9](#). Resultados de finos por cada tipo de mineral.

4.4.2. Prueba planta industrial

Para la evaluación en el reactor industrial, se seleccionaron las siguientes muestras acorde a los resultados obtenidos en laboratorio como se observa en la [figura 4.10](#).



[Figura 4.10](#). Correlación generación de finos (degradación) vs contenido de MgO.

Según los resultados presentados en la [figura 4.11](#), la mayor degradación del pellet durante el proceso de reducción directa se observa en las muestras C y E. En cambio, las muestras A y B muestran un comportamiento similar al observado en laboratorio, lo que confirma que este tipo de pellet tiene una menor degradación al someterse a las condiciones del proceso de reducción.

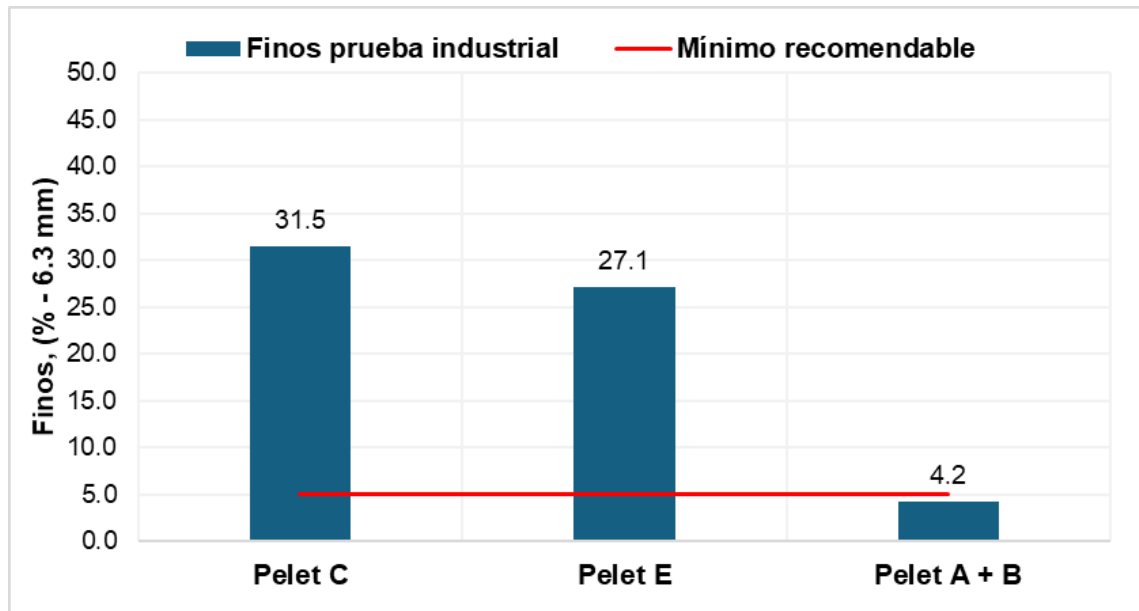


Figura 4.11. Resultados de finos de prueba industrial.

Las muestras fueron ensayadas para realizar la determinación de metalización y carbón correspondiente.

Según los resultados de metalización presentados en la [figura 4.12](#), no se observan variaciones significativas. La proporción entre el porcentaje de hierro en estado metálico y el contenido total de hierro se encuentra por encima del valor recomendado. [17]

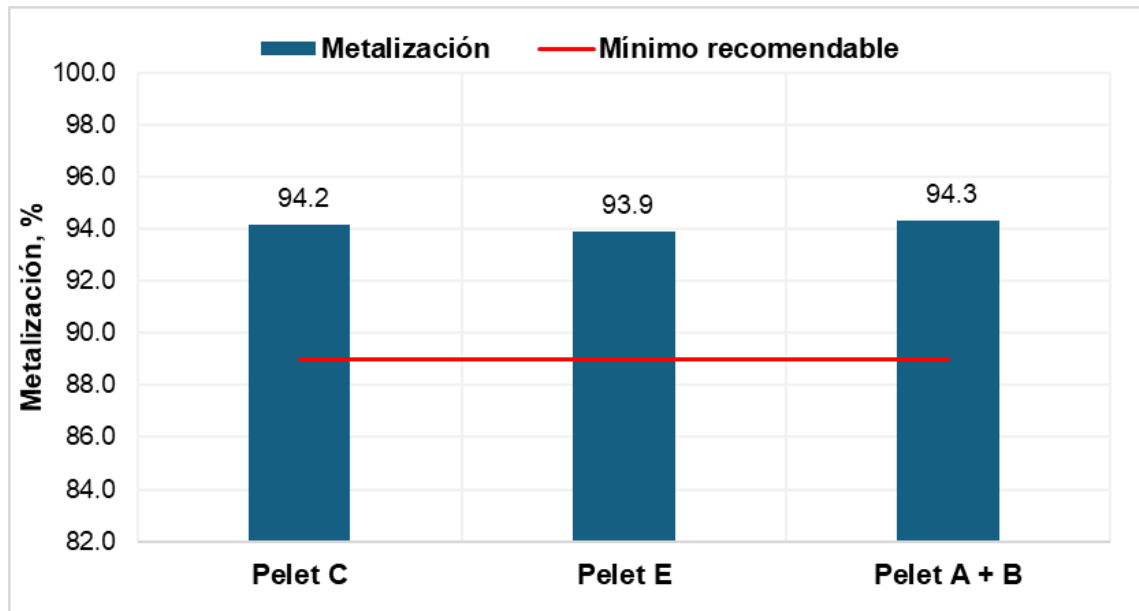


Figura 4.12. Resultados de metalización de prueba industrial.

Los resultados correspondientes al contenido de carbón se presentan en la [figura 4.13](#), en la cual todas las muestras registran valores superiores a los recomendados.

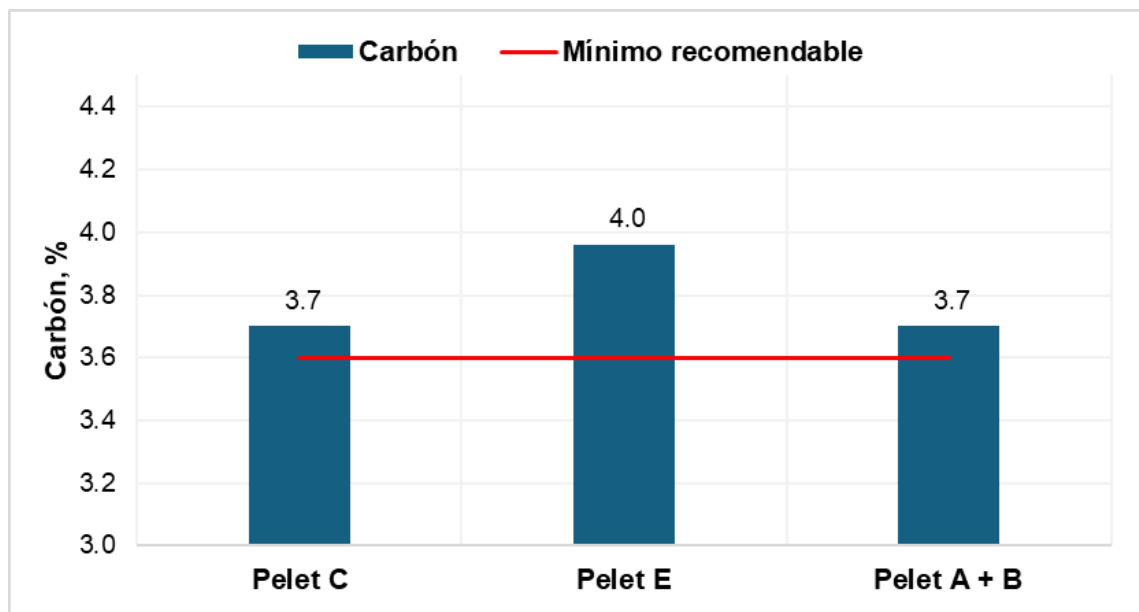


Figura 4.13. Resultados de carbón de prueba industrial.

CAPITULO V

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Se ha demostrado que la metodología de evaluación implementada en este estudio es adecuada para determinar el comportamiento de los minerales en las diferentes etapas del proceso, logrando obtener la calidad similar en laboratorio a lo que se tiene en cada etapa del proceso industrial. [18].

Se ha identificado una relación entre el contenido de gangas del mineral de cada muestra y la generación de finos de hierro esponja. El MgO es un elemento traza contenido en la ganga, el cual, al aumentar genera mayor cantidad de finos como se puede correlacionar en la [Tabla 5.1](#). La muestra E tiene mayor cantidad de finos (28.7 %) con mayor MgO (0.7 %).

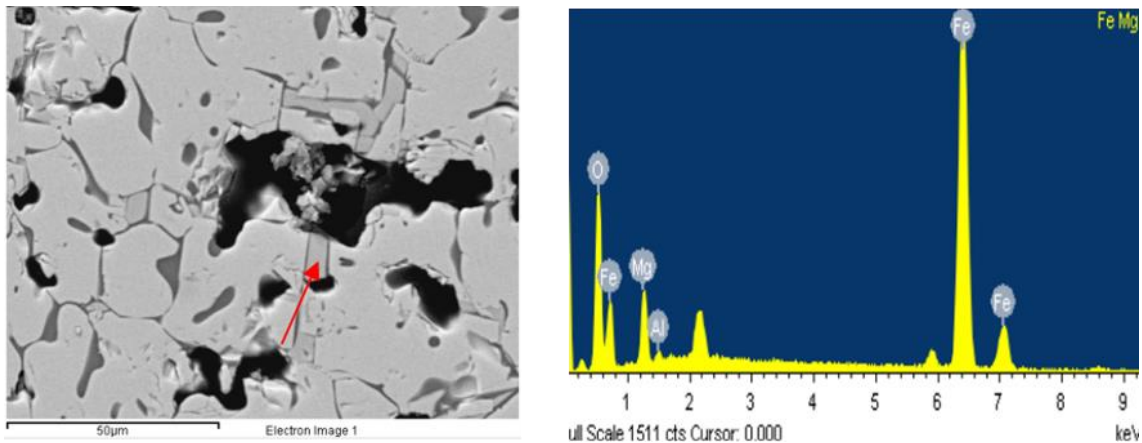
[Tabla 5.1](#). Resultados de finos vs grado de MgO en pellet

Pelet	R180	MgO, %
	Finos (%-6.3 + 0.5 mm después de 30 rev)	
Pelet A	4.9	0.2
Pelet B	3.7	0.5
Pelet C	20.0	0.6
Pelet D	12.3	0.6
Pelet E	28.7	0.7

Con el objetivo de entender la generación de finos en relación con las gangas, el análisis se enfocó en examinar la fase mineralógica del óxido de magnesio mediante estudios de la microestructura del pellet.

Se identificó que el MgO, como se observa en la [figura 5.1](#) bajo las condiciones térmicas de peletizado, forma el ferrito de magnesio en el núcleo del pellet principalmente. El ferrito de magnesio tiene un alto punto de fusión, el cual, bajo las condiciones de temperatura de procesamiento, no llega la fase líquida evitando ligas entre los granos creando una debilidad microestructural, la cual al pasar por el proceso de reducción tiende a romperse [19]. Los ferritos de magnesio pueden variar en su composición y no solamente tratarse de la sustitución del ion Fe^{++} por el ion Mg^{++} en la Magnetita, sino se presenta incorporado con otros constituyentes de la ganga, como se puede observar en la [figura 5.2](#).

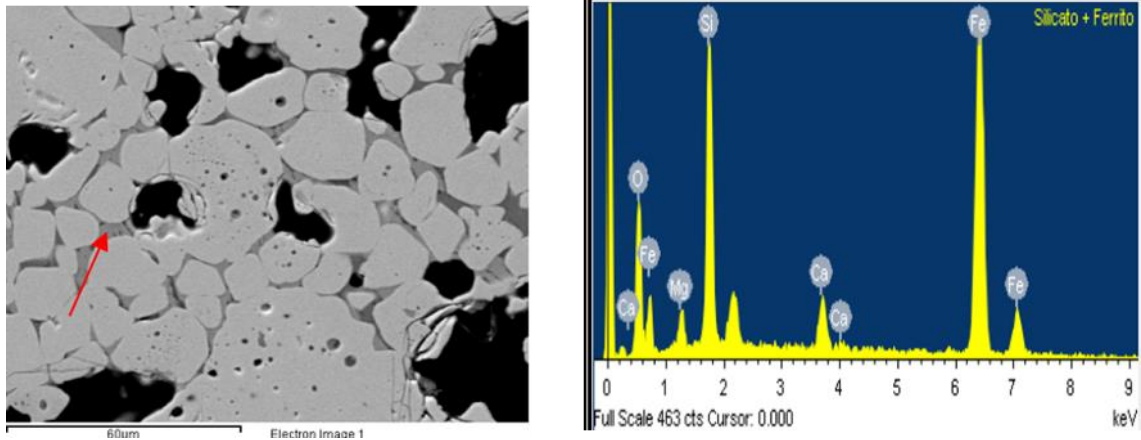
La muestra con mayor degradación es la que presentó mayor contenido de gangas en los resultados de análisis químicos.



[Figura 5.1.](#) Ferrita de Magnesio en muestra de pellet.

Los análisis realizados con un microscopio electrónico de barrido revelan un gráfico correspondiente a un estudio de espectrometría de rayos X por dispersión de energía (EDS o EDX). Esta técnica permite identificar los elementos presentes en una muestra, así como sus concentraciones relativas.

En el gráfico se distinguen los picos característicos de los elementos detectados (como Fe, Mg, Al y O) en la [figura 5.1](#). De manera similar, en la [figura 5.2](#) se identifican elementos como calcio y silicio, los cuales tienen el potencial de formar silicatos en presencia de ferrita.



[Figura 5.2](#). Silicato + Ferrita en muestra de pellet.

La microestructura del pellet con menor contenido de gangas demuestra que la fase de ferritos de magnesio se tiene en menor cantidad, observando unas fases ligantes entre los granos más fuertes y continuas, lo que crea una mayor resistencia microestructural. Durante la reducción de mineral de hierro en el proceso de reducción directa, al retirar el oxígeno, se crea una porosidad adicional que debilita la microestructura, por lo cual, es indispensable que tenga mayor ligante para evitar que se rompa, situación que sucede con la muestra de menor contenido de MgO.

CAPITULO VI

6.1. CONCLUSIONES

Se ha demostrado que el contenido de gangas en el mineral de hierro tiene un impacto directo en la generación de finos durante el proceso de reducción.

El óxido de magnesio (MgO) desempeña un papel crucial en las gangas, ya que durante el proceso de peletización se genera ferrita de magnesio. Este compuesto debilita la microestructura del pellet, formándose principalmente en el núcleo, lo que impacta negativamente en la generación de finos de hierro de reducción directa (HRD). Actualmente, se emplean técnicas de caracterización para determinar la composición química del mineral, incluyendo la cuantificación del óxido de magnesio como parte del control y seguimiento desde la etapa de extracción en mina hasta su llegada a la planta peletizadora.

Se logra demostrar que de acuerdo con la ubicación del yacimiento el comportamiento de cada tipo de mineral en propiedades físicas, químicas y metalúrgicas puede ser distinto.

Además, se implementaron ajustes en el proceso de la planta peletizadora, incluyendo modificaciones en el perfil térmico del horno según la calidad química del concentrado, lo que permitió incrementar la productividad de la planta peletizadora en 10 toneladas por hora, debido a los ajustes ya mencionados.

También se optimizó la extracción en la mina, priorizando los yacimientos con menor grado de degradación, con el objetivo de reducir el impacto del procesamiento de minerales altamente degradados.

6.2. RECOMENDACIONES

A partir de los resultados obtenidos en este estudio, es posible realizar una caracterización complementaria de los yacimientos que se prevé explotar en la mina, incorporando la determinación del contenido de MgO, dada su relevancia en el comportamiento del mineral durante el proceso. Esta información se integra al modelo geológico-minero como parte del seguimiento técnico.

Con base en estos resultados, se establece la proporción óptima de alimentación de los distintos tipos de mineral en el proceso, con el objetivo de reducir la utilización de aquellos con mayor tendencia a la degradación y asegurar el cumplimiento de los requisitos de calidad del pellet y del HRD.

El conocimiento generado permite definir mezclas de minerales más eficientes para la alimentación del proceso, orientadas a minimizar la generación de finos en el producto final de HRD.

Adicionalmente, esta metodología puede aplicarse para la evaluación de nuevos minerales, permitiendo analizar su comportamiento en cada etapa del proceso y, de esta forma, contribuir a la disminución de impactos y a la optimización integral del sistema productivo

REFERENCIAS

- (1) González, R. L., Acosta, F. L., Lowry, M., Kundrat, D., Wyatt, A., & Fuchs, H. (2017). *Management of DRI fines to maximize iron yield in the EAF*. *Iron & Steel Technology*, 14(1), 62–67.
https://imis.aist.org/AISTPapers/Abstracts_Only_PDF/PR-PM0117-1.pdf
- (2) TENOVA HYL. Tecnología básica de la reducción directa. Introducción al proceso HYL. Módulo 01.
- (3) TENOVA HYL. Descripción general del proceso HYL. Introducción al proceso HYL. Módulo 02.
- (4) Barrios, G. K. P., de Carvalho, R. M., Kwade, A., & Tavares, L. M. (2013). *Contact parameter estimation for DEM simulation of iron ore pellet handling*. *Powder Technology*, 248, 84–93. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2013.01.063>.
- (5) Forsmo, S. P. E. (2007). *Influence of green pellet properties on pelletizing of magnetite iron ore* [Tesis doctoral, Luleå University of Technology, Department of Chemical Engineering and Geosciences, Division of Process Metallurgy]. DiVA – Academic Archive Online.
<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:999527/FULLTEXT01.pdf>
- (6) Prieto Martínez, N., Herrera Trejo, M., Morales Estrella, R., Castro Román, M. de J., Mata Esparza, R., & Carreón Villarreal, M. (2014). *Induration process of pellets prepared from mixed magnetite–35 % hematite concentrates*. *ISIJ International*, 54(3), 605–612. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.54.605>.
- (7) Laforest, G., Dubé, M., & Lacroix, O. (2019). *On the difference between isothermal and non-isothermal reduction tests: A comparison between COREM R180 and ISO DR90* (pp. 340–351). En 7° Simpósio Brasileiro de Aglomeração de Minérios, São Paulo, Brasil.
<https://doi.org/10.5151/2594-357X-33914>.
- (8) Collins, R., & Norrman, L. (2001). *Direct reduction pellets for the 21st century: A case study*. *Direct from Midrex*, 2Q, 4–X, p. 4.
- (9) Cano, J. A. M., & Wendling, F. (1993, June). *Development of direct reduction pellets containing MgO by Samarco Mineração S/A*. *Mining Engineering*, 45(6), 633–636.

- (10) Chapa, L., & Duarte, P. E. (2001). *The importance of iron ores in direct reduction* [Presentación en conferencia]. CVRD Seminar, Brazil.
- (11) Petit, H. A., Boechat, F. O., de Carvalho, R. M., & Tavares, L. M. (2024). *Analysis of impact of mechanical degradation of iron ore pellets on gas flow in a direct reduction furnace using simulation*. *Journal of Materials Research and Technology*, 28, 4540–4550.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.01.064>
- (12) Boechat, F. O., da Rocha, L. T., de Carvalho, R. M., Jung, S.-M., & Tavares, L. M. (2018). *Amenability of reduced iron ore pellets to mechanical degradation*. *ISIJ International*, 58(6), 1028–1033. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-734>
- (13) Boechat, F. O., Carvalho, R. M., & Tavares, L. M. M. (2017). *Avaliação de interações entre quebradores e clusters em forno de redução direta usando o método dos elementos discretos*. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, 14(4), 349–356. <https://doi.org/10.4322/2176-1523.1257>
- (14) Garcia-Martinez, H. A., Llamas-Bueno, M., Song, S., & Lopez-Valdivieso, A. (2004). *Magnetic flocculation of mineral fines in an external magnetic field*. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 25(2), 67–90.
<https://doi.org/10.1080/08827500490433179>
- (15) Forsmo, S. P. E., Samskog, P. O., & Björkman, B. M. T. (2008). *A study on plasticity and compression strength in wet iron ore green pellets related to real process variations in raw material fineness*. *Powder Technology*, 181(3), 321–330.
<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2007.05.023>
- (16) Ramakgala, C., & Danha, G. (2019). *A review of ironmaking by direct reduction processes: Quality requirements and sustainability*. *Procedia Manufacturing*, 35, 242–245. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.05.034>
- (17) Monsen, B. E., Thomassen, E. S., Bragstad, I., Ringdalen, E., & Høgaas, P. H. (2015). *Characterization of DR Pellets for DRI Applications*. *Proceedings of AISTech*, 1, 739–750.
- (18) Ternium. (2024). *Generación de finos durante el proceso de reducción directa*. [Informe interno]. Ternium.
- (19) Ternium. (2024). *Análisis comparativo de microestructura de pelets internos*. [Informe interno]. Ternium

ANEXO I

La caracterización de las fases de mineral en cada una de las muestras de concentrado se puede observar en la tabla siguiente.

Tabla anexo I. Abundancia de minerales.

Muestra	Muestra A	Muestra C	Muestra D	Muestra E
Fe - óxidos/hidróxidos	99.00	97.80	99.20	97.70
Piropo	0.10	0.10	-	0.30
Calcopirita	-	-	-	-
Cuarzo	-	0.10	-	0.20
Titanita	-	-	-	-
Anortita	-	0.10	-	0.01
Ilmenita	-	-	-	-
Rutilo	-	-	-	-
Pirita	0.10	0.50	0.30	0.20
Pirrotita	0.10	0.30	0.10	0.20
Plagioclasa	0.30	-	-	0.30
Biotita	-	0.10	-	0.01
Clorita	0.10	0.40	0.20	0.40
Calcita	-	0.30	0.10	-
Ankerita	-	0.10	0.10	-
Siderita	-	-	-	-
Actinolita	0.30	0.10	-	0.50
Otros	-	0.10	0.01	0.20
Total	100.0	100.0	100.0	100.0

ANEXO II

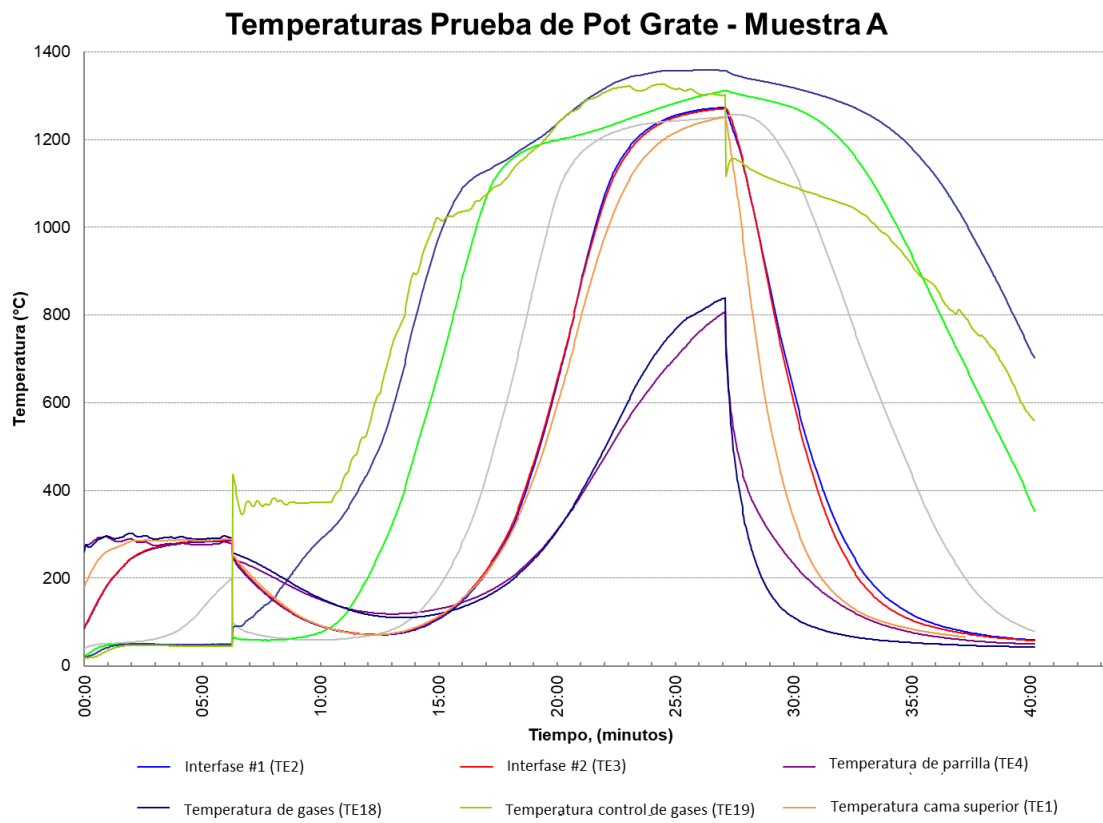


Figura anexo II. Condiciones de prueba de pot grate muestra A.