

# IMPACTO DE LA VARIABILIDAD QUÍMICA Y MINERALÓGICA DEL MINERAL DE HIERRO EN UN MISMO LOTE SOBRE LAS PROPIEDADES DE LAS PELLAS<sup>1</sup>

Yunnelio Cedeño<sup>2</sup>  
Ana Cachutt<sup>2</sup>  
Ernesto Nuñez<sup>3</sup>  
Olga Prado<sup>4</sup>

## Resumen

El procesamiento de mineral proveniente de yacimientos heterogéneos en los últimos años en Sidor C.A., ha conllevado a la ejecución de estudios para determinar el efecto de la variabilidad de las características del mineral sobre los atributos de las pellas, sin embargo estos trabajos han sido fundamentados en la caracterización de una muestra del 75% de las pilas, sin tomar en cuenta los rangos de variabilidad de las características del material en un mismo lote. Por lo tanto surgió la necesidad de establecer una metodología para determinar dichos rangos y el impacto sobre la calidad física, metalúrgica y microestructural de los aglomerados, tomando en cuenta los parámetros operativos de la Planta. El mineral evaluado fue de tipo hematítico-goetítico con martita y dentro de un mismo lote no se encontraron rangos de variabilidad significativos, apreciándose lo contrario con respecto a las correspondientes muestras del 75%, resultando que mientras mayor tonelaje presentan los lotes, más representativa resulta dicha muestra. A través de análisis estadísticos se establecieron interacciones y finalmente se plantearon modelos matemáticos que permiten predecir con alta confiabilidad los atributos de las pellas.

**Palabras claves:** Mineral de hierro; Mineralogía; Peletización; Modelos matemáticos.

## EFFECT OF THE IRON ORE CHEMICAL AND MINERALOGY VARIABILITY ON THE PROPERTIES OF THE PELLETS, OF THE SAME LOT

### Abstract

Processing of iron ore from heterogeneous reservoirs in recent years in Sidor CA, has led to the execution of studies to determine the effect of variability of iron ore characteristics on the attributes of the pellets, but these studies have been based on characterization of a sample of 75% of the lots of material, without taking into account the range of variability of material properties in the same batch. Thus arose the need to establish a methodology for determining these ranges and its impact on the physical, metallurgical and microstructure of the agglomerates, taking into account the operating parameters of the plant. The type of mineral evaluated was hematite-goethite with martite and within the same lot were no significant range of variability, but with respect to the samples for 75% were found significant differences. The results confirm that the higher tonnage present batches, the sample is more representative. Through statistical analysis established interactions and finally, mathematical models were raised that predict with high reliability attributes of the pellets.

**Keywords:** Iron ore; Mineralogy; Pellets; Pelletization; Mathematical models.

<sup>1</sup> Contribución técnica al 41º Seminário de Redução de Mineral de Hierro y Matérias Primas y 12º Seminário Brasileiro de Mineral de Hierro, 12 al 16 de setembro de 2011, Vila Velha, ES.

<sup>2</sup> Ingeniero del Departamento de Asistencia Técnica de Productos Primarios de SIDOR, C.A. Puerto Ordaz, Venezuela.

<sup>3</sup> M.s.c Prof. del Departamento de Metalurgia de la Universidad Nacional Experimental Politécnica "Antonio José de Sucre". Puerto Ordaz, Venezuela.

<sup>4</sup> Coordinación de Modelos de SIDOR, C.A. Puerto Ordaz – Venezuela.

## 1 INTRODUCCIÓN

En el proceso de fabricación de pellas, el principal componente del patrón de carga es el mineral de hierro, y tomando en cuenta que la calidad de todo producto esta íntimamente relacionada con la características de las materias primas e insumos necesarios para obtenerlo, las propiedades que definen la calidad del mineral deben ser rigurosamente controladas, a fin de evitar fluctuaciones y desmejoras en los atributos finales de los aglomerados.

Sidor, C.A., siderúrgica ubicada en la Región Guayana de Venezuela que cuenta con una Planta de Pellas, con el propósito de predecir las propiedades que tendrán los aglomerados producidos con un lote de mineral y además conocer con anterioridad las adecuaciones de los parámetros operativos que se deben hacer para garantizar las propiedades predichas, diseñó en conjunto con el proveedor de mineral, un procedimiento de caracterización del mismo. Dicha caracterización consiste básicamente en un análisis mineralógico y la fabricación de pellas a escala piloto, procesando una muestra del 75% de las pilas en el laboratorio de Planta Piloto y Simulación de Sidor antes de que lleguen a Planta, simulando en lo posible el proceso y las condiciones industriales. Los aglomerados de mineral obtenidos, son sometidos a los mismos ensayos que los producidos en planta, a fin de obtener pronósticos confiables y reproducibles. Un trabajo realizado anteriormente permitió evaluar la representatividad de los resultados obtenidos con esta caracterización, demostrando que es posible obtener predicciones confiables de las tendencias medias de los valores de los atributos de las pellas producidas en la Planta<sup>(1)</sup>.

No obstante, debido a la diferencia de las características de las minas explotadas, y aunque las pilas durante su formación y previo al despacho a Sidor son sujetas a procesos de homogenización, los valores de los atributos del mineral de trenes correspondientes a un mismo lote presentan variabilidad, lo que ocasiona fluctuaciones en los valores de los atributos de las pellas obtenidas en la planta.

En Sidor se han desarrollado modelos matemáticos relacionando los parámetros operativos involucrados en cada subproceso de la peletización y las características del mineral con las propiedades de las pellas, sin embargo estas herramientas no han podido ser aplicables posteriormente, debido a que no se adecuan a la condición actual de variabilidad de las características del mineral en un mismo lote; los cálculos han sido fundamentados en valores de los resultados obtenidos de la caracterización química y mineralógica de la muestra del 75% de la pila mencionada anteriormente. Por esta razón, el objetivo principal de este trabajo fue establecer una metodología para determinar los rangos de variabilidad del mineral de hierro correspondiente a un mismo lote (siendo la referencia las características del mineral de la muestra del 75% del mismo) y establecer su impacto sobre la calidad física, metalúrgica y microestructural de las pellas, tomando en cuenta los parámetros operativos y las condiciones de la planta, para de este modo desarrollar modelos matemáticos estadísticos que permitan predecir los valores de todos los atributos de las pellas. Este trabajo resultará desde todo punto de vista una herramienta de gran utilidad, dado que permitirá mantener un mejor control de la calidad de las pellas producidas y ayudará a minimizar los costos del proceso al disminuir el reprocesamiento de material.

## 2 MATERIALES Y METODOS

Considerando los objetivos específicos planteados en este trabajo se estableció la metodología presentada en la Figura 1.



Figura 1. Metodología empleada.

Tomando en cuenta las normas que rigen el muestreo de material a granel durante su procesamiento (ISO 3082), la toma de muestras se llevó a cabo en el área de recepción de mineral de la Planta de Pellas de Sidor. El muestreo manual se llevó a cabo durante descarga de los vagones de 15 trenes (considerados sublotes) correspondientes a tres pilas consumidas consecutivamente y las respectivas muestras del 75 % de los lotes. Una vez realizada la revisión documental y levantamiento de la información requerida, se procedió a la caracterización desde el punto de vista químico y mineralógico de dichas muestras.

Una vez fabricadas las pellas en la Planta con los sublotes o trenes de mineral caracterizados, se procedió a la toma de muestras de las mismas en un punto de muestreo situado a la salida de los hornos de piroconsolidación que permite obtener un compuesto de las dos líneas de producción que conforman la Planta. De igual modo fueron tomadas muestras de las pellas producidas en el laboratorio con la muestra del 75% de las pilas evaluadas. Todas estas muestras fueron caracterizadas desde el punto de vista físico, granulométrico y metalúrgico.

Posteriormente fueron caracterizadas microestructuralmente cinco muestras; una muestra correspondiente a un tren de cada pila de mineral procesada en planta durante el periodo de estudio y solo dos muestra de las pellas fabricadas en el laboratorio con las muestras del 75% de las pilas debido que durante la secuencia de quemado en el potgrate de la muestra de la pila 1, se pudo apreciar la fuerte presencia de finos de pellas (*spolling*) lo que condujo a la interrupción del procedimiento y no se logró la piroconsolidación de los aglomerados.

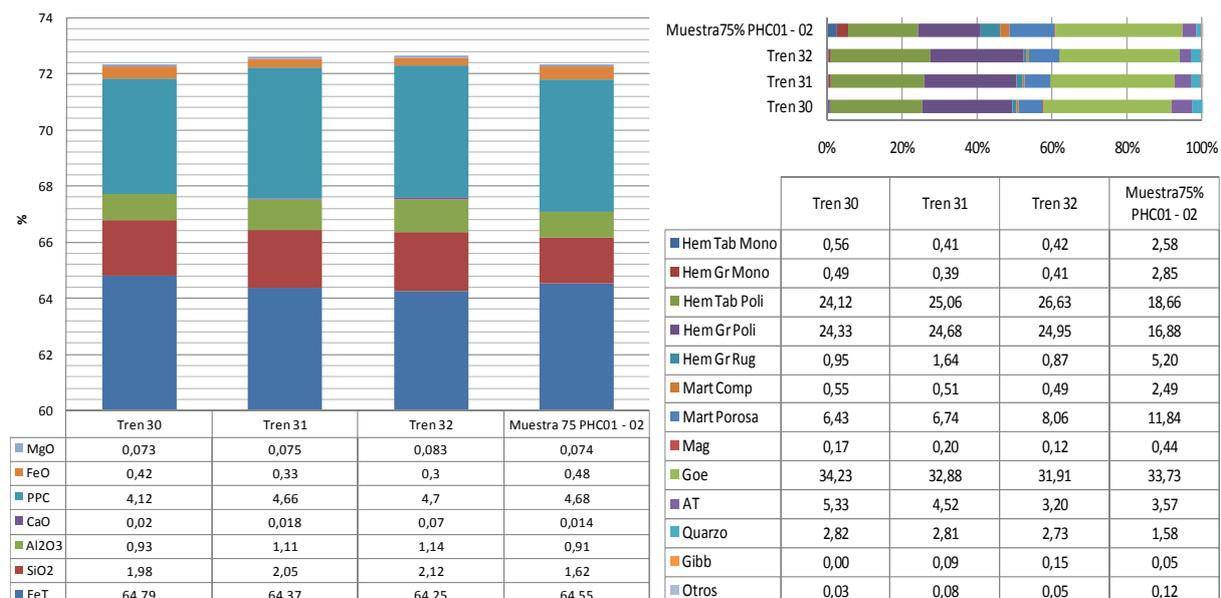
Fueron seleccionadas tres pellas por muestra, considerando la esfericidad de las mismas. Estas pellas fueron preparadas para la observación microscópica empleando resinas de fraguado lento y moldes individuales de goma de dos pulgadas de diámetro para su análisis microestructural cualitativo y cuantitativo,

empleando un analizador de imágenes calibrado. En lo que respecta a la caracterización cualitativa, primeramente se llevó a cabo una inspección visual de las superficies pulidas con el objeto de distinguir posibles grietas, tamaño y distribución de los poros o zonas con coloraciones características que pudieran ser indicios de problemas durante el quemado. El análisis cuantitativo consistió en la medición del tamaño de los granos, tamaño de los poros, tamaño de los cuellos formados entre las partículas de óxido y determinación del porcentaje de fase (poros, ganga y hematita), en diferentes campos tomados al azar tanto en el borde como en el centro de las pellas.

Por otro lado para establecer las interacciones entre los parámetros de proceso, las características químicas y mineralógicas del mineral, y los atributos de las pellas, se procedió al levantamiento de los datos, tomando un periodo de 6 meses de producción como tiempo de estudio. Una vez recolectada toda la data se procedió a depurar y organizar la misma, ordenando los datos cronológicamente y eliminando los valores anómalos. Es importante señalar que previo al establecimiento de las interacciones entre las variables estudiadas, se procedió a la codificación de las mismas. Finalmente las ecuaciones fueron obtenidas utilizando la herramienta de modelos lineales generalizados del paquete estadístico STATGRAPHICS® (versiones 5.1 y centurion), tomando como data los resultados de los quince turnos de producción de pellas con los quince trenes de mineral de hierro caracterizados y considerando las interacciones obtenidas y validas según bibliografía consultada.

### 3 RESULTADOS

En lo referido a la caracterización química de las muestras, se debe destacar que fueron determinadas todas las atributos químicos del mineral, sin embargo, solo fueron comparados los reportes correspondientes al contenido de  $Fe_{total}$ ,  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $CaO$ ,  $PPC$ ,  $FeO$  y  $MgO$ , por ser considerados los atributos más importantes de la materia prima y sobre los que se debe tener un mayor control, como se puede ver en la Figura 2, correspondiente a la pila 1.



**Figura 2.** Comparación Analisis Químicos y Mineralógicos de la Pila 1.

En lo referido a la caracterización mineralógica, se presenta la comparación de los resultados, donde se puede ver que fueron considerados para la comparación, el contenido de Hematitas Monocristalinas y Policristalinas (Tabulares y Granulares en ambos casos), Hematitas Granulares Rugosas, Martitas (Compactas y Porosas), Magnetita, Goetita, Agregados Terrosos, Cuarzos, Gibsitas y entre otros, los Minerales de Manganeseo.

En la Tabla 1 se presenta la caracterización tecnológica de las muestras de los trenes y las muestras del 75% de las pilas evaluadas, considerando los criterios establecidos en la bibliografía consultada y las prácticas internas de Sidor. Por otro lado, en la Tabla 2 se presentan las diferencias máximas encontradas de las características mineralógicas en los lotes o pilas evaluadas, considerando significativo para los contenidos de las distintas tipologías, el margen de error de 3% propio de la técnica de caracterización.

**Tabla 1.** Clasificación tecnológica del mineral de las muestras caracterizadas

Muestra	Clasificación	
Trenes 30, 31 y 32	Goetítico - Hematítico Tabular y Granular	<b>Pila 1</b>
Trenes 45, 47 y 49	Goetítico - Hematítico Granular y Tabular (con Martita)	<b>Pila 2</b>
Trenes 46, 48 y 56	Goetítico - Hematítico Tabular y Granular	
Trenes 64, 65, 68, 69, 70, 71	Goetítico - Hematítico Tabular y Granular	<b>Pila 3</b>
Muestra 75% Pila 1	Goetítico - Hematítico Granular y Tabular (con Martita)	
Muestra 75% Pila 2	Goetítico - Hematítico Granular y Tabular (con Martita)	
Muestra 75% Pila 3	Goetítico - Hematítico Tabular y Granular	

**Tabla 2.** Diferencias Significativas de las Características Mineralógicas de cada pila

Atributo	Entre lo trenes	Trenes con respecto a la Muestra del 75% de la pila	Pila / Ton
Hem Tab Poli		8,03%	<b>1 (63.000 t)</b>
Hem Gr Poli		8,07%	
Hem Gr Rug		4,33%	
Mart Porosa		5,41%	
Hem Gr Mono		3,27%	<b>2 (127.000 t)</b>
Hem Tab Poli		7,19%	
Hem Gr Poli		7,04%	
Mart Porosa	5,19%	4,44%	
Hem Tab Mono		3,22%	<b>3 (165.000 t)</b>
Hem Gr Mono		4,58%	
Hem Tab Poli		3,51%	
Hem Gr Poli		3,83%	
Mart Porosa		3,65%	
Goetita		4%	

Tomando en cuenta las características la materia prima procesada y las condiciones de proceso empleadas, fueron evaluadas las características microestructurales seleccionando las muestras de pellas de los trenes de mineral de cada lote, que presentaron mejores atributos. En la Tabla 3, se presentan las propiedades que definen la calidad de las pellas obtenidas con el mineral evaluado, donde destacan los aglomerados producidos con los trenes 31, 56 y 65 correspondientes a las pilas 1, 2 y 3 respectivamente.

En la Figura 3 se presentan las fotografías de las superficies de las muestras preparadas, donde se destacan los tipos de grietas encontradas, los poros de dimensiones considerablemente grandes y algunos distinguos entre las zonas del borde y el centro debido más que nada a la diferencia de concentración de poros.

**Tabla 3.** Propiedades de las pellas obtenidas con los lotes de mineral evaluados

Muestra	R.C. (Kgf/Pella)	Porosidad (%)	I.T. (%)	I.A. (%)	Reducibilidad (%)	DBT (%)	Hinchamiento (%)	Pila
Tren 30	309	24,10	95,15	4,27	94,99	-	8,14	1
<b>Tren 31</b>	<b>327</b>	<b>24,82</b>	<b>95,51</b>	<b>3,93</b>	<b>92,91</b>	<b>2,50</b>	<b>5,15</b>	
Tren 32	321	24,64	95,02	4,45	92,68	1,81	3,73	
Tren 45	320	25,45	95,31	4,09	95,96	3,97	5,78	2
Tren 46	304	23,19	95,22	4,25	94,43	2,70	8,76	
Tren 47	308	23,36	95,13	4,38	94,43	2,70	8,76	
Tren 48	312,5	25,00	94,93	4,36	94,35	3,81	5,65	
Tren 49	320	23,55	94,98	4,38	93,92	2,10	6,65	3
<b>Tren 56</b>	<b>333,5</b>	<b>23,72</b>	<b>95,68</b>	<b>3,93</b>	<b>94,94</b>	<b>3,33</b>	<b>6,93</b>	
Tren 64	325	23,19	95,49	4,12	93,54	2,54	6,08	
<b>Tren 65</b>	<b>327</b>	<b>25,00</b>	<b>96,17</b>	<b>3,43</b>	<b>92,62</b>	<b>2,67</b>	<b>8,80</b>	
Tren 68	320,5	24,37	95,39	4,14	93,31	3,56	8,30	
Tren 69	314	24,09	95,66	4,12	95,19	5,53	6,09	
Tren 70	319	24,26	95,62	3,98	95,19	5,53	6,09	
Tren 71	319	24,10	95,29	4,25	94,85	2,72	4,86	
<b>M 75%</b>	263	-	93,89	4,51	93,22	4,22	6,95	
<b>M 75%</b>	281	-	93,89	3,98	92,80	5,96	5,75	<b>3</b>



**Figura 3.** Macroscopias de pellas de la pila 3. A) Planta. B) Laboratorio.

En lo que respecta a la inspección microscópica de las muestras, se hicieron barridos de borde a borde de la zona central de las superficies de todas las pellas, con el objeto de detectar los distinguos que pudieran presentarse en relación a la apariencia de los granos y de los poros, y la presencia y morfología de partículas de ganga y escorias. Una vez obtenidas las fotomicrografías con un aumento de 50x se procedió a la construcción de mosaicos para cada una de las pellas que conformaban las cinco muestras evaluadas. Las características de las pellas de cada muestra fueron comparadas entre sí, según los mosaicos resultantes, para definir sobre cual de las pellas se harían las mediciones que implica el análisis cuantitativo sobre la microestructura de los aglomerados.

A continuación, en la Figura 5, se presentan fotomicrografías resultantes del análisis microestructural de una pella del tren 65. De igual modo, en la Figura 6, se presentan las fotomicrografías de las pellas obtenidas a escala piloto con la muestra del 75% de la pila 3, con el objeto de establecer comparaciones entre las características microestructurales de éstas con respecto a la muestra del tren.

Para finalizar, con lo referido al analisis microestructural, se procedió a la determinación de los porcentajes de fases presentes en cada zona, tal como se ilustra en la Figura 7, considerando 3 fases; cristales de hematita (fase roja), poros (fase azul) y la ganga que son las partículas de cuarzo y la escoria (fase verde).

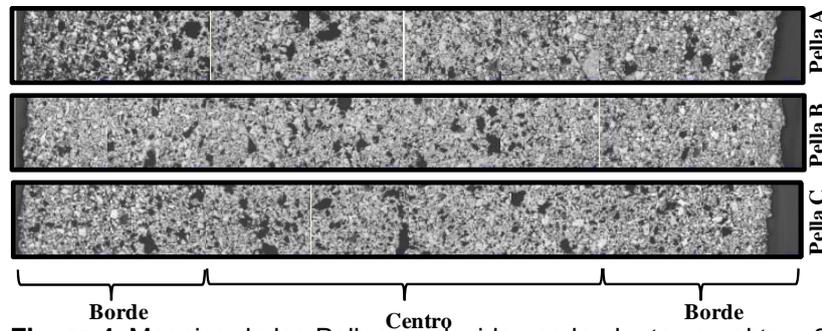


Figura 4. Mosaico de las Pellas producidas en la planta con el tren 65.

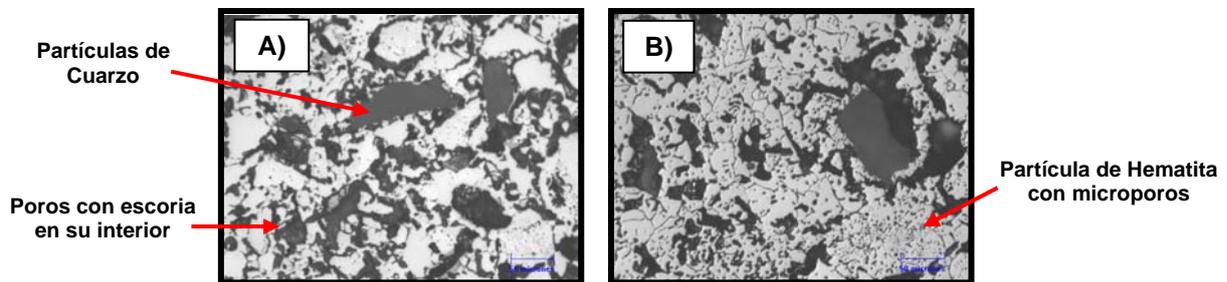


Figura 5. Fotomicrografías de una pella del tren 65 (200x). A) Borde. B) Nucleo.

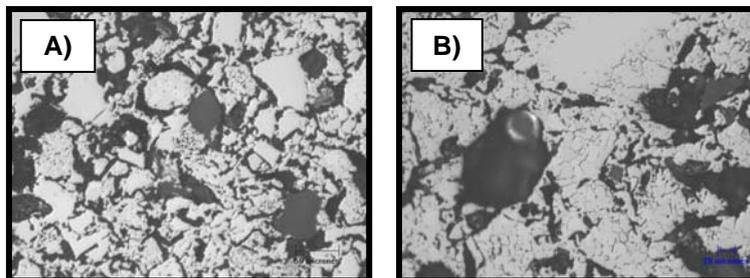


Figura 6. Fotomicrografías de una pella de la M75% de la pila 3 (200x). A) Borde. B) Nucleo.

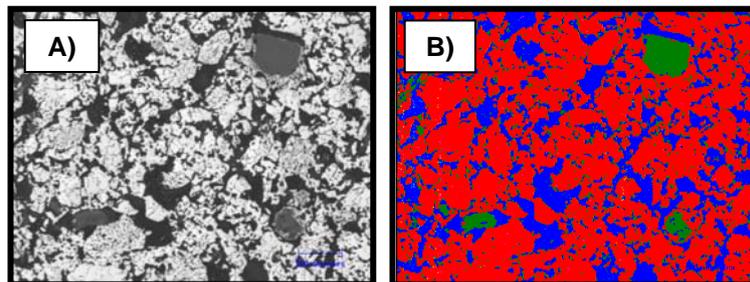


Figura 7. A) Centro de una pella del tren 31 (100x). B) Definición de fases presentes.

En la Tabla 4 se presentan los modelos lineales de orden de interacción doble para cada atributo evaluado, tomando en cuenta las condiciones operativas y las características del mineral que resultaron más influyentes según la data procesada.

**Tabla 4.** Modelos obtenidos para cada atributo y sus correspondientes R<sup>2</sup>

Modelo	R <sup>2</sup>
<b>Número de Caídas de la pella verde</b> = 22307,3 - 2217,5*Humedad Mezcla - 349,739*Fineza 45 micrones + 5090,81*Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> _Min Molido_ - 242,071*Goe + 34,9719*Humedad Mezcla*Fineza 45 micrones - 156,382*Humedad Mezcla*Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> _Min Molido_ + 3,86773*Humedad Mezcla*Goe - 58,4757*Fineza 45 micrones*Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> _Min Molido_ + 3,19958*Fineza 45 micrones*Goe + 1,44565*Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> _Min Molido_*Goe	96,43%
<b>Índice de Abrasión</b> = 886,621 - 9,34045*Fineza 90micrones - 74,5504*Antracita - 1,0871*Tempcajadeviento15 - 534,133*CaO MinMolido - 0,0925491*Fineza 90micrones*Antracita + 0,0097743*Fineza90micrones*Tempcajadeviento15 + 8,34445*Fineza 90micrones*CaO MinMolido + 0,220848*Antracita*Tempcajadeviento15 - 31,5163*Antracita*CaO Min Molido - 0,275603*Tempcajadeviento15*CaO MinMolido	85,28%
<b>Porosidad</b> = -212,906 + 3,54711*Fineza 45micrones - 334,366*Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> MinMolido - 60,8477*SiO <sub>2</sub> MinMolido + 1,81545*Tempcajadeviento15 + 4,02681*Fineza 45micrones*Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> MinMolido + 1,06972*Fineza 45micrones*SiO <sub>2</sub> MinMolido - 0,0254309*Fineza 45micrones*Tempcajadeviento15 + 30,6894*Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Min Molido*SiO <sub>2</sub> MinMolido - 0,00784186*Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> MinMolido*Tempcajadeviento15 - 0,0764201*SiO <sub>2</sub> MinMolido*Tempcajadeviento15	95,45%
<b>Índice de Tambor</b> = -949,23 + 11,6155*Fineza 90micrones + 81,4957*Antracita + 1,12456*Tempcajadeviento15 + 690,144*CaO MinMolido - 0,264602*Fineza90 micrones*Antracita - 0,0106525*Fineza 90micrones*Tempcajadeviento15 - 10,2533*Fineza 90 micrones*CaO MinMolido - 0,189299*Antracita*Tempcajadeviento15 + 44,6126*Antracita*CaO MinMolido + 0,244565*Tempcajadeviento15*CaO MinMolido	85,35%
<b>Hinchamiento</b> = 17701,6 - 292,342*Fineza 45 micrones - 18,532*Temp caja de viento 15 + 2373,62*CaO Min Molido - 26768,9*MgO Min Molido + 0,312956*Fineza 45 micrones*Temp caja de viento 15 - 0,945906*Fineza 45 micrones*CaO Min Molido + 425,709*Fineza 45 micrones*MgO Min Molido - 3,23363*Temp caja de viento 15*CaO Min Molido + 0,760981*Temp caja de viento 15*MgO Min Molido - 2192,39*CaO Min Molido*MgO Min Molido	97,33%
<b>Reducibilidad</b> = 24492,9 - 279,339*Fineza 45 micrones + 135,414*Goe + 91,5173*Mart Porosa - 556,674*Fe <sub>total</sub> - 4,977*Fineza 45 micrones*Goe - 1,88638*Fineza 45 micrones*Mart Porosa + 7,05295*Fineza 45 micrones* Fe <sub>total</sub> - 0,644117*Goe*Mart Porosa + 2,96406*Goe* Fe <sub>total</sub> + 0,791092*Mart Porosa* Fe <sub>total</sub>	91,96 %
<b>DBT</b> = 1730,98 - 19,246*Fineza 45 micrones - 8,3307*Temp caja de viento 15 - 3,26344*CamadaTotal + 879,796*SiO <sub>2</sub> Min Molido + 0,119318*Fineza 45 micrones*Tempcajadeviento15 - 0,097854*Fineza 45 micrones*CamadaTotal - 14,839*Fineza45micrones*SiO <sub>2</sub> MinMolido + 0,0117632*Tempcajadeviento 15*CamadaTotal - 0,00691015*Temp caja de viento 15*SiO <sub>2</sub> MinMolido + 1,74139*CamadaTotal*SiO <sub>2</sub> MinMolido	94,21%

## 4 DISCUSIÓN

De modo general al observar la Figura 1, se puede decir que no se obtuvieron diferencias significativas en las características químicas del mineral de los sublotos o trenes con respecto a las de la muestra del 75% del lote o la pila 1, sin embargo destacaron algunas diferencias entre algunos de los atributos del mineral de los trenes, lo que pone de manifiesto un cierto grado de variabilidad desde el punto de vista químico dentro de este lote. En los otros dos lotes se pudo apreciar el mismo comportamiento.

Por otro lado, se puede ver que respecto al contenido de Hematitas Tabulares Monocristalinas, resultaron muy cercanos los valores obtenidos del análisis de las muestras de los trenes, sin embargo al contrastar estos resultados con los obtenidos del análisis de la muestra del 75 de la pila, se observó una diferencia que tan solo alcanza el 2%, la cual no resulta significativa según los rangos de error propio del método empleado para estos análisis (3%). Lo mismo ocurrió en lo que respecta a los contenidos de Hematita Granular Monocristalina (Hem Gr Mono), Martita Compacta (Mart Comp) y Magnetita (Mag), resultando para esta última tipología una diferencia de tan solo 0,30% en promedio de los valores de los trenes con respecto a los de la muestra del 75%.

Por su parte, el contenido de las Hematitas Tabulares y Granulares Policristalinas, y del Cuarzo en las muestras de los trenes resultaron ser semejantes, pero presentaron diferencias significativas con respecto a la muestra del 75 de la pila 1. Con respecto al contenido de las Hematitas Granulares Rugosas, resultaron similares los valores obtenidos de los trenes 30 y 32, presentando una pequeña diferencia de 0,70% con respecto al tren 31. Sin embargo, llama la atención la significativa diferencia de 4% en promedio que presentaron dichos valores de los

trenes en relación a la muestra del 75% de la pila. En lo que corresponde al contenido de partículas de Martita Porosa, la mayor similitud se encontró entre los valores de los trenes 30 y 31, resultando una diferencia de casi 1,5% en promedio con respecto a los valores del tren 32 y de 5,41% con respecto a la muestra del 75%.

Caso especial ocurrió con el contenido de Goethita (considerada como un mineral hidratado) por la similitud entre sus contenidos en estas muestras; los resultados de los análisis de los trenes y de la muestra del 75% de la pila reflejaron ser valores próximos, obteniéndose la mayor diferencia de 2 % entre los valores de los trenes 30 y 32. Entre tanto, en lo referido al contenido de Agregados Terrosos (AT), se hallaron diferencias significativas entre los valores de los trenes, resaltando la semejanza tan solo entre los resultados del tren 32 y la muestra del 75% de la pila. Cabe destacar que las pequeñas diferencias en los contenidos de Gibbsita y los minerales de Manganese (Otros), no son consideradas como significativas, dadas las bajas proporciones de estas partículas en las muestras analizadas. Además, para llevar a cabo una mejor cuantificación del contenido de estas partículas, se deben realizar análisis químicos que permitan obtener valores más confiables.

Según la biliografía<sup>(2)</sup>, un mayor contenido de magnetita en el mineral produce un debilitamiento de las pellas, que puede provocar la degradación de las mismas durante la piroconsolidación debido a las transformaciones de estructura cristalina que ocurren para dar lugar a la formación de granos estables de hematita. Tomando en cuenta que la quema de las pellas fabricadas en el laboratorio con el mineral de la muestra del 75% de la pila 1 debió ser suspendida debido a una alta presencia de finos (*spolling*) y comparando el contenido de la referida tipología mineral en las muestras del 75% de las pilas evaluadas, se observa que la muestra del lote en cuestión, resultó en el menor nivel. Por otro lado, algunos autores<sup>(3)</sup> defienden la hipótesis que un mayor contenido de minerales hidratados (Goethita y Agregados terrosos) produce un incremento de la generación de finos durante los tratamientos térmicos y la reducción de las pellas. Al contrastar el contenido de dichas mineralogías en las muestras del 75% de las pilas, se puede observar que la muestra del lote 1 presentó menores valores con respecto a la muestrara de la pila 3, y la quema de los aglomerados fabricados con esta última en el laboratorio se pudo llevar a cabo sin inconvenientes. Este hecho en particular será objeto de estudio posterior considerando que a escala piloto se mantienen las mismas condiciones para el procesamiento de las muestras del 75% de las pilas.

Los resultados presentados en la Tabla 1 demuestran que la caracterización de las muestras del 75% de las pilas enviadas por el proveedor de mineral, permite obtener información de las características que pueden llegar a presentar los trenes de un mismo lote, dado que por ejemplo, aunque no todos los trenes de mineral de la pila 2 correspondieron a la clasificación tecnológica de su muestra del 75%, tres de las muestras coincidieron en cuanto a su tipificación, logrando destacar la característica que pudo haber causado alguna fluctuación en el proceso en la planta de pellas (contenido de Martita). Por su parte, aunque los trenes de la pila 1 no presentaron la misma clasificación de la muestra del 75%, no se debe descartar la posibilidad que algunos de los trenes de este lote que no fueron caracterizados, pudieran presentar contenidos de Martita mayores al 10%.

En la Tabla 2 resulta importante destacar que aunque el lote 3 fue el de mayor tonelaje de las tres pilas evaluadas (por lo tanto debía ser el más homogéneo), fue el que presentó mayor número de diferencias significativas con respecto a la muestra del 75% de la pila. No obstante las diferencias son cercanas al 3% que se acepta

como error por la técnica aplicada. Por otro lado, la pila 1, que fue la de menor tonelaje y menor número de trenes muestreados, presentó la menor cantidad de diferencias, sin embargo dichas incongruencias resultaron ser de gran significancia. Resulta importante destacar al analizar la macroscopías de las pellas (Figura 3), que a excepción de una de las pellas del tren 31 que presentó las grietas concentricas de mayor tamaño entre todas las muestras evaluadas, las muestras de pellas fabricadas a escala piloto presentaron mayor cantidad de grietas en su interior, y un claro ejemplo de lo referido son las pellas de muestra del 75% de la pila 2. Este hecho puede deberse, entre otras causas, a la diferencia que existe en los procesos de quemado entre el laboratorio y la planta, recordando que aunque en el horno de potgrate se consolidan las pellas con perfiles térmicos similares a los empleados en planta, el flujo de los gases calientes entre los aglomerados es muy diferente, debido que en planta el proceso se lleva a cabo disponiendo las pellas sobre una parrilla movil mientras que en el laboratorio se mantiene un lecho fijo, lo que favorece la aparición de gradientes de temperaturas en las diferentes zonas del cubilote vertical, pudiendo obtenerse choques térmicos entre los gases circulantes y generando la aparición de grietas en los aglomerados.

Por otro lado, se puede inferir que en el laboratorio, las pellas pueden estar siendo sometidas a mayores temperaturas durante el quemado con respecto a las condiciones de planta, ya que el cumplimiento del perfil térmico establecido en la practica para este ensayo corresponde a los resultados de las mediciones obtenidas con las termocuplas cercanas a los quemadores de las diferentes zonas del horno de potgrate, lo que debido a la proximidad de estos instrumentos a los aglomerados, corresponden a las temperaturas de los gases que estan en contacto directo con las pellas. Por su parte, en el horno de piroconsolidacion de la planta, las termocuplas estan ubicadas justo debajo de los quemadores y a una distancia mucho mayor de las pellas, por lo que es posible que la temperatura a la que estan los gases proximos a la camada sean menores a las obtenidas a través de las mediciones con dichos instrumentos, y las pellas esten siendo sometidas a menores temperaturas.

De igual modo, en las pellas del laboratorio, se logró apreciar una mayor cantidad de poros de gran tamaño al ser contrastadas con las muestras de planta. La aparición de estos poros, por lo general se debe a la volatilización de partículas de antracita de grandes dimensiones, por lo que se puede inferir que despues de la molienda de los aditivos en el laboratorio, no se logra obtener la misma distribución granulométrica que la del mineral procesado. De hecho, vale la pena destacar que a diferencia del proceso de preparación de las materias primas llevado a cabo en la planta, el mineral y los aditivos procesados en el laboratorio para fabricar las pellas con las muestras del 75% de las pilas evaluadas, fueron molidos en equipos diferentes.

Considerando la caracterización microestructural de las pellas obtenidas en planta con el mineral del tren 65, vale la pena señalar la gran cantidad de cristales de hematita con bordes redondeados (indicativo de un buen quemado) unidas a través de venas de escoria y la alta presencia de partículas de hematita microporosas en el centro de los aglomerados, las cuales pueden ser de origen goethítico, dado que para este tren, se obtuvo un contenido de esta tipología de 34,73%, siendo uno de los valores mas altos de esta mineralogía en todas las muestras evaluadas. Por otro lado, al observar los resultados obtenidos de las mediciones de espesor de los puentes formados entre las partículas de hematita, destaca que se obtuvo el mismo valor promedio de dicho parametro tanto en el núcleo como en el borde de la pella

evaluada, lo que es un indicativo de que los aglomerados fueron objeto de un proceso de piroconsolidación muy homogéneo.

En la Figura 5.A destaca al igual que en los casos de las otras dos muestras de pellas fabricadas en planta con el mineral de los trenes, la presencia de partículas de cuarzo con contornos angulosos y de tamaños mayores e iguales a los de las partículas de hematita, lo que es un indicativo que estas partículas de ganga no son degradadas como el resto de las partículas de mineral durante la molienda debido a su dureza. En la Figura 5.B se destacan una gran cantidad de poros comunicantes y de significativo tamaño al compararlos con las dimensiones de los granos de hematita, lo que puede explicar el hecho de que estas muestras hayan presentado el mayor porcentaje de porosidad de las muestras de las pellas de los trenes evaluados, tal como se puede ver en la Tabla 3. En esta misma tabla, se puede apreciar que las pellas de las muestras del 75% de las pilas presentaron calidades inferiores las de sus respectivos trenes, lo que considerando los resultados de la inspección macroscópica y la fotomicrografías mostradas resulta lógico de esperarse. En la Figura 6.A se presenta la microestructura del borde de una pella obtenida con la muestra del 75% del lote 3, donde destaca la presencia de partículas de hematita de mayor tamaño y con aristas más pronunciadas, aun cuando estas pellas presentaron mejores respuestas en cuanto al Índice de Abrasión y la resistencia a la compresión con respecto a los aglomerados fabricados con la muestra del 75% del lote 2. Se debe destacar que no se encontraron mayores distinguos entre esta muestra con respecto a la del tren 65, el cual corresponde a este lote. Tan solo destaca una disminución de la cantidad y el tamaño de los poros en las pellas obtenidas a escala piloto, lo que puede explicar el bajo grado de reducibilidad de estas.

En general en las pellas caracterizadas microestructuralmente, destacó una preponderante presencia de cristales de hematita de mayor tamaño en la periferia de con respecto al núcleo, lo que resulta válido al considerar que durante los procesos de formación de las pellas verdes en los discos peletizadores, las semillas obtenidas durante las fases iniciales (que terminan siendo el centro de las pellas piroconsolidadas), están compuestas de partículas finas, las cuales debido a su mayor superficie específica, se unen más fácilmente entre sí a través de puentes de agua. Una vez formadas las semillas estables, en la periferia se adhieren las partículas de mayor tamaño que se encuentran en la mezcla en rodamiento. Las muestras evaluadas presentaron semejanzas en lo que respecta a los porcentajes de fases tanto en el centro como en el borde de las pellas, lo que es un indicativo de la homogeneidad de los procesos de quemado y dosificación de aditivos durante los turnos de producción a los que corresponden las pellas caracterizadas; ajustes que pudieron compensar la poca variabilidad de las características del mineral en estas pilas evaluadas.

Las interacciones entre los factores evaluados que fueron corroboradas considerando fundamentos teóricos<sup>(4,5)</sup> y en la Tabla 4 se presentan las ecuaciones para cada atributo que define la calidad de las pellas, con los que se obtuvieron gráficas de contorno para definir las adecuaciones de las condiciones del proceso debido a las características químicas y mineralógicas de la materia prima con alto ajuste (R<sup>2</sup>).

## 5 CONCLUSIONES

- Las interacciones obtenidas entre las propiedades de las pellas con las características del mineral y las condiciones operativas fueron corroboradas tomando en cuenta los fundamentos teóricos por lo tanto los modelos matemáticos planteados permiten predecir con altos niveles de confiabilidad los atributos de las pellas.
- El mineral evaluado corresponde a un mineral de tipo hematítico-goethítico con martita y con contenidos promedio de Hierro de 64,67%, Sílice de 1,83%, Alúmina de 0,98% y un índice de PPC de 4,39%, y dentro de un mismo lote no se encontraron rangos de variabilidad significativos de las características químicas y mineralógicas del mineral de hierro. Sin embargo se pudo apreciar que mientras mayor tonelaje presentan los lotes, mas representativa resulta la correspondiente muestra del 75%, lo que resulta lógico considerando mayor toma de incrementos durante la formación del lote para hacer el compuesto.
- Las pellas fabricadas con las muestras de mineral de los trenes caracterizados no presentaron diferencias significativas desde el punto de vista microestructural, dado que las características mineralógicas y las condiciones operativas empleadas durante el procesamiento de estos no presentaron fluctuaciones considerables.
- Se recomienda llevar a cabo otras investigaciones aplicando la metodología presentada en otros lotes de mineral, con el objeto de verificar la existencia de rangos significativos y patrones de variabilidad de sus características químicas y mineralógicas.

## Agradecimientos

A la empresa SIDOR, C.A.; al grupo de ingenieros de la Dirección de Calidad, al personal que dirige la Planta de Pellas, al personal de la Coordinación de Modelos, y a los técnicos del Laboratorio de Planta Piloto, especialmente a las Analistas del Laboratorio de Mineralogía.

## REFERENCIAS

- 1 Cedeño, Y. Metodología de comparación para la predicción de los atributos de las pellas producidas en planta a partir de las pellas de laboratorio. Informe de Practica Profesional. Puerto Ordaz (Edo. Bolívar): Unexpo. 2009.
- 2 Rosière, C. Caracterización microestructural y textural de minerales de hierro para control de procesos siderúrgicos con énfasis en la geometalurgia e ingeniería de materiales. 1996.
- 3 Ferrari, C. Clasificación mineralógica, textural y granulométrica del mineral de hierro y sus implicaciones geosiderúrgicas. 2001.
- 4 Bedolla, E. Uso de los modelos matemáticos en la Peletización de minerales de hierro. 1992.
- 5 Vescovi, R. Implantación de control estadístico de proceso en la unidad de peletización de Samarco Mineração S.A. 2001.