

EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DE PELETS AUTO-  
REDUCTORES PARA RECICLAJE DE RESIDUOS DE ZINC EN EL PROCESO  
WAEZ VARIANDO EL TIPO DE REDUCTOR

IVÁN MAURICIO DAZA PRADA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA

2017

EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS DE PELETS AUTO-  
REDUCTORES PARA RECICLAJE DE RESIDUOS DE ZINC EN EL PROCESO  
WAEZ VARIANDO EL TIPO DE REDUCTOR

IVÁN MAURICIO DAZA PRADA

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Metalúrgico

MODALIDAD: Trabajo de investigación

DIRECTOR UIS

Dr. MILTON MANRIQUE GALLARDO

DIRECTOR USP

Dr. GUILHERME F.B. LENZ E SILVA

Profesor Escuela Politécnica, Universidad de São Paulo

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA

2017

A mis padres Mauricio y Claudia,  
Por su amor infinito y constante apoyo.

A Jhoan Tarazona,  
Por estar a mi lado y ser mi compañero de vida.

A mi abuela Aleja,  
que me brindó su amor incondicional;  
y a mi abuelo Luis,  
que siempre creyó en mí,  
y porque ahora me cuidan desde el cielo.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, por lo que soy, por lo que tengo, por lo que quiero ser.

A mi director en la Universidad de São Paulo, el profesor Dr. Guilherme F.B. Lenz e Silva por dejarme hacer parte de su equipo de trabajo, por su dedicación, por su tiempo y ayuda.

A mi director en la Universidad Industrial de Santander, el profesor Dr. Milton Manrique Gallardo, por darme su voto de confianza.

A la ingeniera de materiales y amiga Leidy Hernández, por su ayuda y apoyo en todo el proceso, por su disposición en mantener el buen equipo que fuimos, y por tener una sonrisa para mostrarme.

A las Dra. Giselle Amaral, por su amabilidad en el laboratorio y su ayuda en las correcciones del portugués en el libro.

A la universidad de São Paulo y a la Universidad Industrial de Santander por la posibilidad del intercambio académico.

A las personas, laboratorios y entidades que contribuyeron para la realización de este trabajo.

A mi tía Aleyda Daza y al Dr. Mario Mantilla por su ayuda y apoyo en todos mis proyectos de vida.

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	14
1. ANTECEDENTES.....	15
2. OBJETIVOS.....	18
2.1. OBJETIVO GENERAL .....	18
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	18
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	19
3.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES .....	19
3.2. DETERMINACIÓN Y CALCULO DE PELETS.....	20
3.3. PRUEBA DE COMPRESIÓN .....	21
3.4. PRUEBA DE CAÍDA .....	22
3.5. ENSAYO DE REDUCCIÓN .....	22
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	24
4.1. CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS .....	24
4.2. ENSAYO DE AUTO-REDUCCIÓN.....	30
4.3. PRUEBAS DE RESISTENCIA .....	35
5. CONCLUSIONES .....	38
6. RECOMENDACIONES .....	39
BIBLIOGRAFÍA .....	40
REFERENCIAS.....	41
ANEXOS .....	43

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Porcentajes de dosificación para la peletización de las muestras con carbón vegetal y coque de petróleo.....	20
Tabla 2. Especificaciones de la distribución de lotes para la fabricación de pelets auto-reductores para los diferentes ensayos. ....	21
Tabla 3. Lotes para la fabricación de pelets auto-reductores para las pruebas de compresión en verde. ....	21
Tabla 4. Lotes de la fabricación de pelets auto-reductores para la prueba de caída. ....	22
Tabla 5. Lotes de la fabricación de pelets reductores para los ensayos de reducción.....	23
Tabla 6. Datos de humedad y material volátil del polvo de acería eléctrica.....	25
Tabla 7. Resultados de humedad, material volátil, cenizas y carbono fijo de las muestras de carbón vegetal y coque de petróleo.....	28

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Formación del polvo de acería eléctrica (PAE) [2][4].....	15
Figura 2. Zonas del horno rotativo horizontal Waelz. [10].....	16
Figura 3. Esquema horno vertical tubular usado en los ensayos de reducción de los pelets auto-reductores.....	23
Figura 4. Difracción de rayos X de las principales fases encontradas en el polvo de acería eléctrica. ....	24
Figura 5. Análisis granulométrico del polvo de acería eléctrica. a) Frecuencia. b) Frecuencia acumulada.....	26
Figura 6. Microscopia electrónica de barrido del polvo de acería eléctrico. a) electrones secundarios 30.000X b) electrones secundarios 150.000X.....	26
Figura 7. Análisis granulométrico del carbón vegetal. a) Frecuencia. b) frecuencia acumulada. ....	27
Figura 8. Análisis granulométrico del coque de petróleo. a) Frecuencia. b) frecuencia acumulada. ....	27
Figura 9. Microscopia electrónica de barrido de los agentes reductores empleados. a) Carbón vegetal, electrones secundarios 500X. b) Coque de petróleo, electrones secundarios 500X.....	29
Figura 10. Análisis granulométrico del hidróxido de calcio, usado como aglomerante del proceso. a) Frecuencia. b) frecuencia acumulada. ....	29
Figura 11. Microscopia electrónica de barrido de los pelets auto-reductores con carbón vegetal después del proceso de reducción, electrones retrodispersados 20.000X. a) antes de la reducción. b) 450°C. c) 650°C. d) 800°C. e) 1050°C. f) 1150°C. ....	30

Figura 12. Microscopia electrónica de barrido de los pelets auto-reductores con coque de petróleo después del proceso de reducción, electrones retrodispersados 20.000X. a) antes de la reducción. b) 450°C. c) 650°C. d) 800°C. e) 1050°C. f) 1150°C. ....	31
Figura 13. Difracción de rayos X de los pelets auto-reductores después del proceso de reducción en cada temperatura de trabajo. ....	32
Figura 14. Pérdida de masa de los pelets auto-reductores con carbón vegetal (línea continua) y coque de petróleo (línea punteada) en el rango de temperatura de 450°C hasta 1150°C. ....	33
Figura 15. Fracción de reacción de los pelets auto-reductores en las diferentes temperaturas de trabajo en función del tiempo. a) Coque de petróleo. b) carbón vegetal.....	34
Figura 16. Material volátil después del proceso de reducción a altas temperaturas. a) alambre de acero inoxidable. b) crisol contenedor del pelet. ....	34
Figura 17. Microscopia electrónica de barrido del material volátil colectado del alambre y el crisol de trabajo después del proceso de reducción a altas temperaturas. a) electrones retrodispersados 20.000X. b) electrones retrodispersados 40.000X. ....	35
Figura 18. Resistencia de los pelets auto-reductores. a) en verde en función del tiempo. b) después de la reducción en función de la temperatura. ....	36
Figura 19. Pruebas de caída de los pelets auto-reductores en función del diámetro y el tiempo. a) carbón vegetal. b) Coque de petróleo. ....	36

## LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Análisis EDS del polvo de acería eléctrica.....	43
Anexo B. Análisis EDS del carbón vegetal. ....	43
Anexo C. Análisis EDS del coque de petróleo. ....	43
Anexo D. Análisis EDS del pelet reducido a 450°C.....	44
Anexo E. Análisis EDS del pelet reducido a 650°C. ....	44
Anexo F. Análisis puntual a 650°C.....	44
Anexo G. Análisis EDS del pelet reducido a 800°C.....	45
Anexo H. Análisis EDS del pelet reducido a 1050°C.....	45
Anexo I. Análisis EDS puntuales del pelet reducido a 1150°C. ....	45
Anexo J. Análisis EDS de material volátil.....	46

## RESUMEN

**TÍTULO:** EVALUACIÓN DE PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS DE PELETS AUTO-REDUCTORES PARA RECICLAJE DE RESIDUOS DE ZINC EN EL PROCESO WAEELZ VARIANDO EL TIPO DE REDUCTOR\*

**AUTORES:** Iván Mauricio Daza Prada\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Polvo de acería eléctrica, proceso Waelz, reducción, carbón vegetal, coque de petróleo, zinc.

**DESCRIPCIÓN:** La industria del acero en horno de acería eléctrica tiene como consecuencia la producción de residuos con alto contenido de zinc los cuales son posteriormente reciclados; estos residuos son conocidos como polvos de acería eléctrica (PAE) y considerado altamente tóxico por la presencia de diferentes elementos en forma de óxido principalmente. Existen diferentes procesos para la recuperación del zinc, entre ellos el proceso Waelz es uno de los más utilizados en todo el mundo, se caracteriza por el uso de un horno rotativo donde el zinc es recuperado por medio de los materiales volatilizados después de las reacciones de reducción que ocurren dentro. En este trabajo se estudian la peletización y reducción del PAE teniendo en cuenta las condiciones para garantizar la recuperación total del zinc, a partir de los cambios físicoquímicos de los pelets auto reductores en una serie de diez experimentos, variando el tipo de reductor y manteniendo constante como sistema de aglomeración, hidróxido de calcio y melaza de caña, además la variación de la temperatura de reducción en un rango desde 450°C hasta 1150°C. el comportamiento físico de los pelets fue evaluado por medio del ensayo de resistencia a la compresión y caída en verde con un tiempo de secado de 14 días y después de la reducción. El porcentaje de reducción es evaluado a través de la pérdida de masa y la fracción de reacción en cada temperatura. La caracterización de las materias primas es realizada con microscopía electrónica de barrido (SEM), difracción de rayos X (DRX), Fluorescencia de rayos X (FRX), análisis granulométrico con láser, entre otros. Finalmente son encontrados resultados debido a la variación del tipo del carbón, tanto en las pruebas de resistencia como en los ensayos de reducción, teniendo en cuenta la recuperación del contenido de zinc del polvo de acería eléctrica.

---

\*Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.  
Director: Dr. Milton Manrique Gallardo. Codirector: Dr. Guilherme F.B. Lenz e Silva

## ABSTRACT

**TITLE:** EVALUATION OF PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF SELF-REDUCING PELLETS FOR ZINC WASTE RECYCLING IN THE WAEZL PROCESS VARYING THE TYPE OF REDUCER \*

**AUTHORS:** Iván Mauricio Daza Prada \*\*

**KEYWORDS:** Electric arc furnace dust, waelz process, reduction, charcoal, petroleum coke, zinc.

**DESCRIPTION:** The steel industry in electric arc furnace (EAF) has consequently the production of high zinc residues which are subsequently recycled; these residues are known as electric arc furnace (AEF) dusts and considered highly toxic because of the presence of different elements in the form of oxide mainly. There are different processes for the recovery of zinc, among them the Waelz process is one of the most used worldwide, is characterized using a horizontal rotary kiln where the zinc is recovered by means of volatilized materials after the reduction reactions occurring within this. In this work has been study the agglomeration, pelletizing and reduction of electric arc furnace dust, taking into account the stoichiometric conditions to guarantee the total recovery of zinc, from the physico-chemical changes of the auto-reducing pellets in a series of ten experiments, varying the type of reducer (charcoal and petroleum coke) and maintaining constant as agglomeration system, calcium hydroxide and cane molasses in the same proportions, in addition to the variation of the reduction temperature in a range from 450 ° C to 1150 ° C. The physical behavior of the pellets has been evaluated by means of the test of resistance to the compression and fall in green with a time of drying of 14 days and after the reduction process. The reduction percentage is evaluated through mass loss and the reaction fraction at each temperature as a function of time with increasing temperature. The characterization of the raw materials is performed with scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD), X-ray Fluorescence (XRF), laser particle size analysis, among others. Finally, results are found due to the variation of the carbon type, both in the resistance tests and in the reduction tests, considering the recovery of the zinc content of the electric arc furnace dust.

---

\*Degree project

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales.  
Adviser: Dr. Milton Manrique Gallardo. Coadviser: Dr. Guilherme F.B. Lenz e Silva

## INTRODUCCIÓN

La producción en las acerías eléctricas, principalmente de aceros revestidos (galvanizados) los cuales presentan mayor resistencia a la corrosión, generan un polvo de acería eléctrica, también conocido como PAE, considerado un residuo altamente tóxico por la presencia de hierro, zinc, plomo, magnesio y calcio, en diferentes estructuras mineralógicas. Para el tratamiento y la recuperación de los elementos químicos presentes en el PAE existen diferentes procesos, tanto por vía hidrometalúrgica como por vía pirometalúrgica; siendo el proceso Waelz el más utilizado para el tratamiento de PAE en la forma de pelets auto-reductores aglomerados, y el aprovechamiento del zinc en la forma de óxidos sin la necesidad de generar escoria líquida.

El proceso Waelz es un proceso con ya varios años de aplicación, usado para el reciclaje de polvo de acería eléctrica en diversos países del mundo. Como dato adicional se estima que de los 7,5 millones de toneladas de PAE generado, actualmente en el mundo tan solo el 45% son reciclados.

La empresa brasilera grupo Votorantim, conocida por su trabajo con dicho proceso para la recuperación del zinc, determinó que en el proceso existen dos etapas de gran importancia, la peletización de las materias primas y el proceso de reducción para la recuperación del zinc. Estas etapas serán evaluadas y mejoradas, estudiando las diferentes propiedades físicas de los pelets auto-reductores antes del proceso de reducción, que corresponde principalmente al tiempo de fabricación, manipulación, contacto con el medio y almacenamiento; y después del proceso de reducción, para evaluar la calidad del aglomerante con la exposición al fuego; siempre haciendo variación del tipo de reductor utilizado. Además, la determinación de la temperatura óptima de reducción teniendo en cuenta factores como la pérdida de masa con el aumento de la temperatura, y el uso de los dos tipos de carbones más usados como reductores. Manteniendo siempre como variable principal la recuperación del zinc.

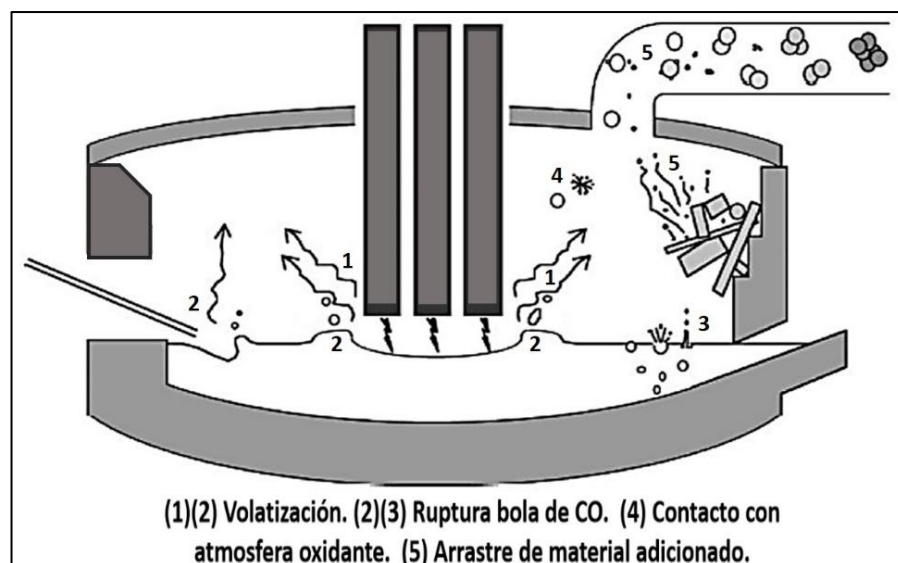
## 1. ANTECEDENTES

En la actualidad, con las nuevas tecnologías y los cambios en la industria, se puede observar el aumento de la producción de acero en el mundo, principalmente la producción de acero en hornos de arco eléctrico. También se ve reflejado en el aumento de la producción de aceros revestidos con mayor resistencia a la corrosión, donde su uso está generando chatarras con altos contenidos de zinc que son recicladas posteriormente, aproximadamente entre 10 y 20 kilogramos por tonelada de acero producido [1].

### Polvo de acería eléctrica (PAE)

El proceso de fabricación de acero en la industria de acería eléctrica y la chatarra tienen una fuerte influencia en la formación de polvo que es considerado altamente tóxico por el consejo nacional del ambiente [1]. La formación de PAE es generalmente dada por la volatilización de los metales, la vaporización del hierro debajo del arco, la expansión de las burbujas de monóxido de carbono [2,3]. En la Fig. 1 se muestra el proceso de formación del PAE.

**Figura 1.** Formación del polvo de acería eléctrica (PAE)

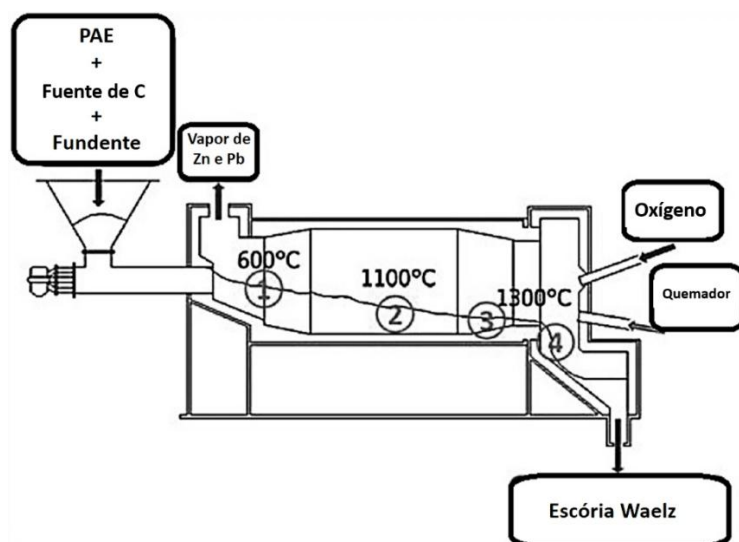


Grillo [4] demostró que los mecanismos de formación de los polvos como se observa en la figura 1 son: volatilización (1 y 2), ruptura de la burbuja de CO (2 e 3), el contacto con la atmosfera oxidante (4) y el arrastre de material adicionado al horno (5). El PAE no tiene una composición química definida, porque ella depende de la carga metálica, del tipo de acero producido en el horno eléctrico, de la chatarra utilizada y de los aditivos que hacen parte del proceso [4,3]. Generalmente presenta los elementos que la componen en diferentes formas estructurales; el hierro se puede hallar en forma de magnetita ( $Fe_3O_4$ ), wustita ( $FeO$ ) o hierro metálico, y el zinc en la forma de zincita ( $ZnO$ ) o franklinita ( $ZnFe_2O_4$ ) [5-7]. Las partículas en su mayoría son menores que  $10\ \mu m$ , con una densidad entre  $3,50$  e  $4,74\ g/cm^3$  y humedad entre  $0,1$  e  $0,3\%$  para sistemas a seco [6]. La morfología predominante de partículas es en forma esférica [7].

### Proceso Waelz

Actualmente la tecnología predominante para la recuperación del zinc contenido en el PAE es el proceso Waelz [8]. En este proceso el PAE es mezclada con carbón y aglomerado, para después ser introducido en forma de pelets auto-reductores en un horno rotativo, el cual se encuentra inclinado [6,9]. Las reacciones dentro del horno general la volatilización del zinc y el plomo, que es recuperado en la forma de óxido Waelz y después extraído por procesos piro o hidrometalúrgicos [10,11].

**Figura 2.** Zonas del horno rotativo horizontal Waelz. [10]



El horno puede ser dividido en 4 partes según la dirección de avance de la carga y puede ser observado en la Fig. 2. La 1ª zona, es dedicado al secado y precalentamiento de la carga, donde la temperatura puede alcanzar los 600° C. Ya en la 2ª zona, es el inicio de la combustión del carbón y la temperatura se encuentra bajo 1100° C, suficiente para la reducción del hierro y el plomo de los óxidos metálicos [10].

En la 3ª zona se presenta el calentamiento de la carga con una temperatura encima de los 1000° C, proporcionando la reducción y vaporización del zinc. Y finalmente la 4ª zona es dedicada a la combustión del carbón residual y para proporcionar energía adicional al quemador de oxi-combustible o gas; además de la re-oxidación del hierro anteriormente reducido [10].

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el comportamiento fisicoquímico de pelets de polvo de acería eléctrica en el proceso Waelz variando el tipo de reductor.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Caracterizar el polvo de acería eléctrica y demás materias primas involucradas en el proceso de peletización.
- Comparar los pelets debido a la variación del agente reductor (carbón vegetal e coque de petróleo): en verde, con el paso del tiempo y en el proceso Waelz a diferentes temperaturas de reducción.
- Definir una temperatura de reducción total, cuantificando el material reducido en los pelets.

### 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

#### 3.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES

Fue realizada la caracterización del PAE, los agentes reductores trabajados por la empresa Grupo Votorantim (carbón vegetal y coque de petróleo) y el aglomerante con los siguientes métodos de caracterización:

PAE (Polvo de Acería Eléctrica):

DRX (Difracción de Rayos X), FRX (Fluorescencia de Rayos X), Análisis Granulométrico (Laser), Humedad, material volátil y EDS (Microscopía Electrónica de Barrido)

Agente reductor:

*Carbón vegetal:* Análisis granulométrico (Laser), Material volátil, Carbono fijo, cenizas y EDS (Microscopía Electrónica de barrido)

*Coque de Petróleo:* Análisis granulométrico, Material volátil, carbono fijo, cenizas, EDS (Microscopía Electrónica de Barrido)

El carbón vegetal y el coque de petróleo fueron llevados a una misma granulometría a las mallas 65, 80, 100, 150 e 270 de la serie Taylor para que el tamaño de la partícula no fuera variable en el proceso. Los análisis de los dos reductores se realizaron de acuerdo a las normas ASTM D3174-11 [12], ASTM D3173-11 [13] y ASTM D3175-11 [14].

Aglomerante:

*Melaza de caña e hidróxido de calcio:* Análisis Granulométrico (Laser)

Para caracterizar tanto el PAE y los agentes reductores, como los pelets después de la reducción, se utilizó el difractómetro Bruker con radiación de Cu K $\alpha$  ( $\lambda$ : 1,54178 Å) a una velocidad de barrido de 0,02%. Para el análisis granulométrico se utilizó el granulómetro a laser HELOS. Para el análisis químico por fluorescencia de rayos X fueron determinados en muestras prensadas con calibración STD-1 (estándar) y análisis de los elementos químicos desde flúor hasta uranio. Para determinar la microestructura de los materiales fue

usado el microscopio electrónico de barrido Cambridge Stereoscan 440 por electrones secundarios (ETD) y electrones retrodispersados (vCD) con una tensión de aceleración de 20 kV, el cual implementaba una sonda de EDS para hacer el análisis químico semicuantitativo.

### 3.2. DETERMINACIÓN Y CALCULO DE PELETS

Se fabricaron dos tipos de muestras variando el tipo de reductor para las pruebas de resistencia y reducción:

PAE + Carbón vegetal + Hidróxido de calcio y melaza de caña

PAE + Coque de petróleo + Hidróxido de calcio y melaza de caña

El porcentaje de PAE seleccionado corresponde a la dosificación usada por el grupo Votorantim en el proceso Waelz, los porcentajes de carbón vegetal y coque de petróleo fueron calculados estequiométricamente para la reducción de los principales óxidos presentes en el PAE (ZnO, PbO, FeO y CuO), y así mismo los porcentajes de melaza e hidróxido de calcio fueron los usados en el proceso de peletización del grupo Votorantim. En la tabla 1 se muestran los porcentajes para cada una de las materias primas en los dos tipos de muestra.

**Tabla 1.** Porcentajes de dosificación para la peletización de las muestras con carbón vegetal y coque de petróleo.

Muestra	PAE	Fuente de C	Aglomerante
1	78,9%	Carbón vegetal (13,1%)	Ca(OH) <sub>2</sub> (4%) + melaza (4%)
2	79,9	Coque de petróleo (12,1%)	Ca(OH) <sub>2</sub> (4%) + melaza (4%)

Los lotes de fabricación de pelets, fueron dispuestos como se plantean en la tabla 2.

**Tabla 2.** Especificaciones de la distribución de lotes para la fabricación de pelets auto-reductores para los diferentes ensayos.

Lote	Reductor	Prueba	Diámetro (mm)	Nº pelets
1	<b>Carbón Vegetal</b>	Compresión	10	20
2		Caída	7,5	20
3			10	20
4			15	20
5		Reducción	10	25
6	<b>Coque de Petróleo</b>	Compresión	10	20
7		Caída	7,5	20
8			10	20
9			15	20
10		Reducción	10	25
			<b>Total</b>	210

### 3.3. PRUEBA DE COMPRESIÓN

Los pelets fueron fabricados a mano (10 mm de diámetro) con adición uniforme de las materias primas para los dos tipos de muestra (carbón vegetal y coque de petróleo), y posteriormente se determinó la resistencia a la compresión en verde a lo largo de los días: 1, 3, 7 y 14. Las pruebas de compresión fueron realizadas en la máquina de ensayos universal KRATOS.

**Tabla 3.** Lotes para la fabricación de pelets auto-reductores para las pruebas de compresión en verde.

Lote	Reductor	Nº Pelets			
		1 día	3 días	7 días	14 días
1	<b>C. Vegetal</b>	5	5	5	5
6	<b>C. Petróleo</b>	5	5	5	5
<b>Total</b>		10	10	10	10

### 3.4. PRUEBA DE CAÍDA

Los pelets fueron fabricados a mano de diferentes diámetros (7,5; 10,0 y 15 mm) con adición uniforme de las materias primas para los dos tipos de muestra (carbón vegetal y coque de petróleo), y posteriormente se realizó la prueba de caída, para determinar las pérdidas de masa con la variación de la altura de caída del pelet a lo largo de los días: 1, 3, 7 y 14. Las alturas de caída fueron medidas con el medidor de distancia laser DLE 50 BOSCH Professional.

**Tabla 4.** Lotes de la fabricación de pelets auto-reductores para la prueba de caída.

Lote	Reductor	N° Pelets			
		1 día	3 días	7 días	14 días
2	Carbón Vegetal	5	5	5	5
3		5	5	5	5
4		5	5	5	5
7	Coque de Petróleo	5	5	5	5
8		5	5	5	5
9		5	5	5	5
Total		30	30	30	30

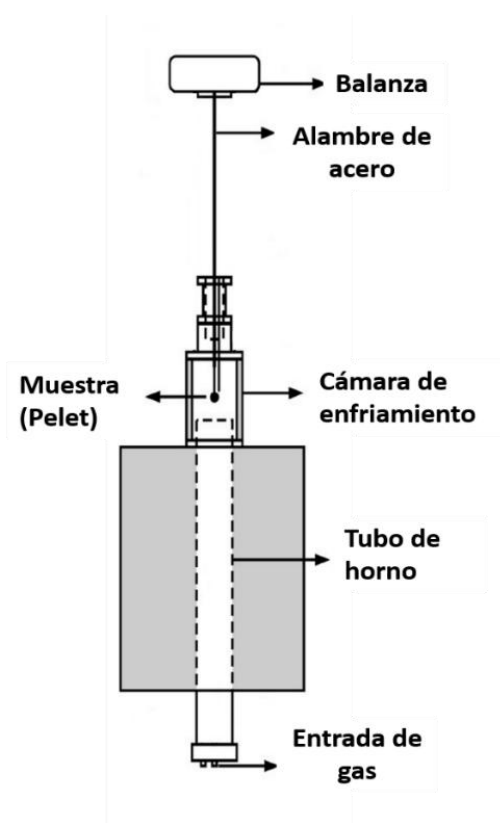
### 3.5. ENSAYO DE REDUCCIÓN

Los pelets fueron fabricados a mano (10 mm de diámetro) con adición uniforme de las materias primas para los dos tipos de muestra (carbón vegetal y coque de petróleo); y fue realizado el proceso de reducción en diferentes temperaturas (450, 650, 800, 1050 y 1150°C) y posteriormente determinada la resistencia a la compresión de los pelets, después de reducidas. El ensayo de reducción se llevó a cabo en un horno tubular vertical, con capacidad para una muestra suspendida en alambre de acero inoxidable conectado a una balanza para los cálculos de pérdida de masa, la atmosfera oxidante era controlada por el paso de nitrógeno o argón a través de una válvula en la parte inferior del horno. La estructura del horno se puede apreciar en la Fig. 3.

**Tabla 5.** Lotes de la fabricación de pelets reductores para los ensayos de reducción.

Lote	Reductor	Pelets				
		450° C	650° C	800° C	1050° C	1150° C
5	C. Vegetal	5	5	5	5	5
10	C. Petróleo	5	5	5	5	5
	<b>Total</b>	10	10	10	10	10

**Figura 3.** Esquema horno vertical tubular usado en los ensayos de reducción de los pelets auto-reductores.



Después del proceso de reducción de los pelets, se evaluó su resistencia a la compresión en la máquina de ensayos universal KRATOS y se caracterizaron con EDS (Microscopia electrónica de Barrido) y DRX (Difracción de Rayos X) para determinar las estructuras y las fases presentes.

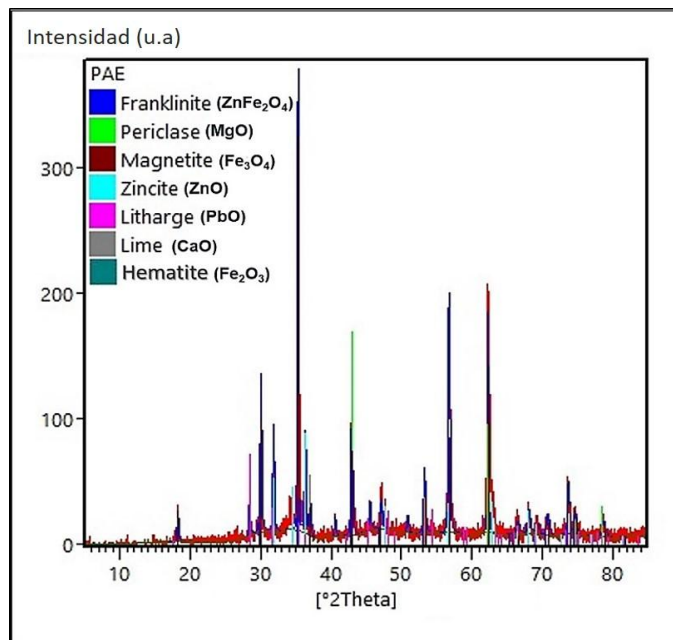
## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS

#### Polvo de acería eléctrica (PAE)

En la Fig. 4 se puede observar el difractograma del PAE. Las fases principales encontradas arrojaron datos para el zinc en la forma de ZnO y ZnO.Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (franklinita) principalmente y para el hierro en la forma de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>; además de otras fases en menor proporción como MgO, PbO y CaO.

**Figura 4.** Difracción de rayos X de las principales fases encontradas en el polvo de acería eléctrica.



Los porcentajes de humedad y material volátil son mostrados en la tabla 6. Los valores pueden variar de acuerdo al contacto o humedad relativa del ambiente en el que se encuentre.

**Tabla 6.** Datos de humedad y material volátil del polvo de acería eléctrica.

Muestra	% Humedad	% Material Volátil
PAE	1,16 ± 0,1	11,24 ± 1,20

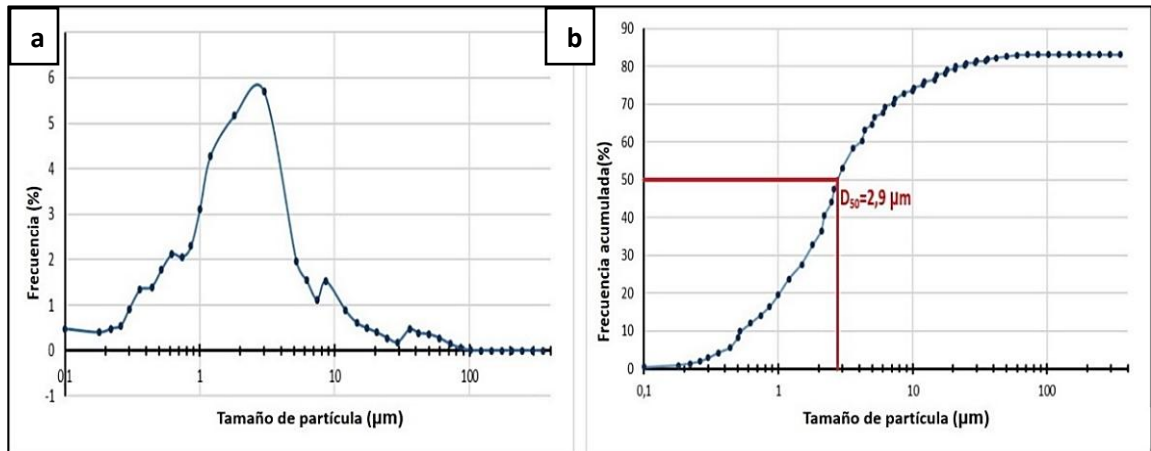
En la tabla 7 se puede observar el análisis químico del PAE. Según los resultados el elemento en mayor proporción es el hierro en sus diferentes estados de oxidación en torno al 35%; y el zinc analizado como ZnO está presente sobre el 20% de contenido. Además, los compuestos que se pueden resaltar por su contenido son CaO, SiO<sub>2</sub>, PbO y MgO. Cabe resaltar que las pérdidas a fuego (PF) presentan un porcentaje de 14%, lo cual junto a los resultados de material volátil hallados anteriormente prueban la alta volatilidad del polvo de acería eléctrica.

**Tabla 7.** Análisis químico obtenido por fluorescencia de rayos X del polvo de acería eléctrica.

Elemento o Compuesto	Porcentaje (%)	Elemento o Compuesto	Porcentaje (%)
Fe	35,376	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,723
ZnO	20,423	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,296
PF	14,5	CuO	0,244
CaO	12,395	Br	0,206
SiO <sub>2</sub>	5,754	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,204
Cl	2,451	TiO <sub>2</sub>	0,126
MnO	1,818	SnO <sub>2</sub>	0,067
PbO	1,548	BaO	0,051
K <sub>2</sub> O	1,516	SrO	0,047
MgO	1,297	NiO	0,026
SO <sub>3</sub>	0,927	Rb <sub>2</sub> O	0,0005
		<b>Total</b>	100 %

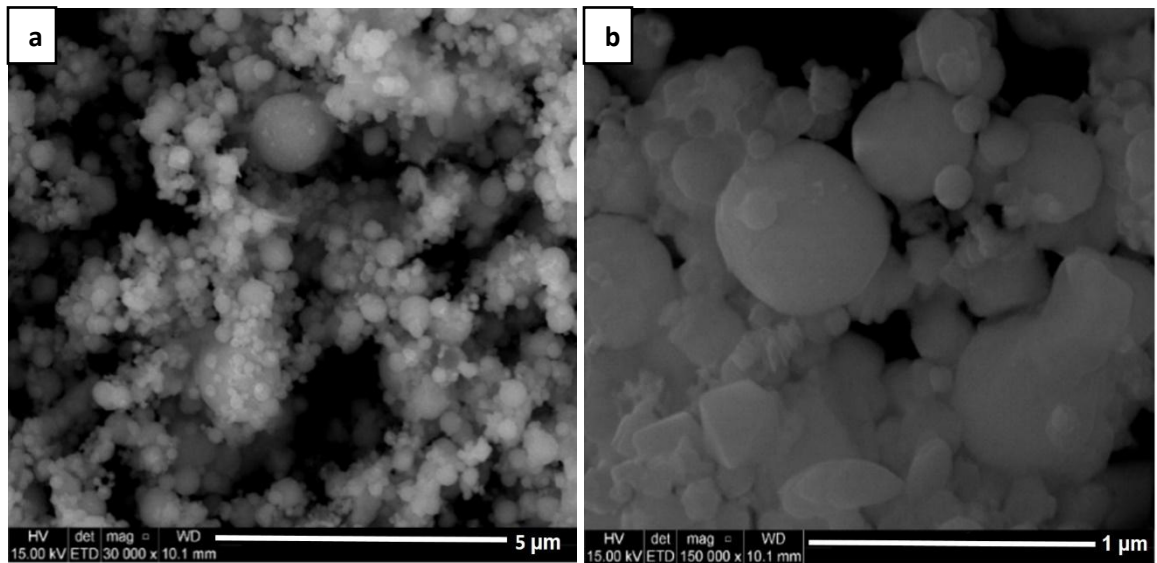
En la Fig. 5 Se puede observar el análisis granulométrico del PAE, según los resultados el tamaño de las partículas se encuentra en el rango de 0,12 µm hasta 50 µm aproximadamente, con D50 en 2,9 µm, de lo cual se deduce que el tamaño de partícula general es mayormente pequeño, otorgando al polvo de acería eléctrica alta reactividad y alto índice de aglomeración por el área de contacto relativamente alta.

**Figura 5.** Análisis granulométrico del polvo de acería eléctrica. a) Frecuencia. b) Frecuencia acumulada.



En la Fig. 6 se puede observar la micrografía de microscopía electrónica de barrido del PAE, a partir de los resultados se puede apreciar la predominancia de la forma esférica y el tamaño menor de las partículas; y según el análisis semicuantitativo por dispersión de energía (EDS) (Ver anexo A), la región evaluada está compuesta principalmente de hierro, zinc y oxígeno.

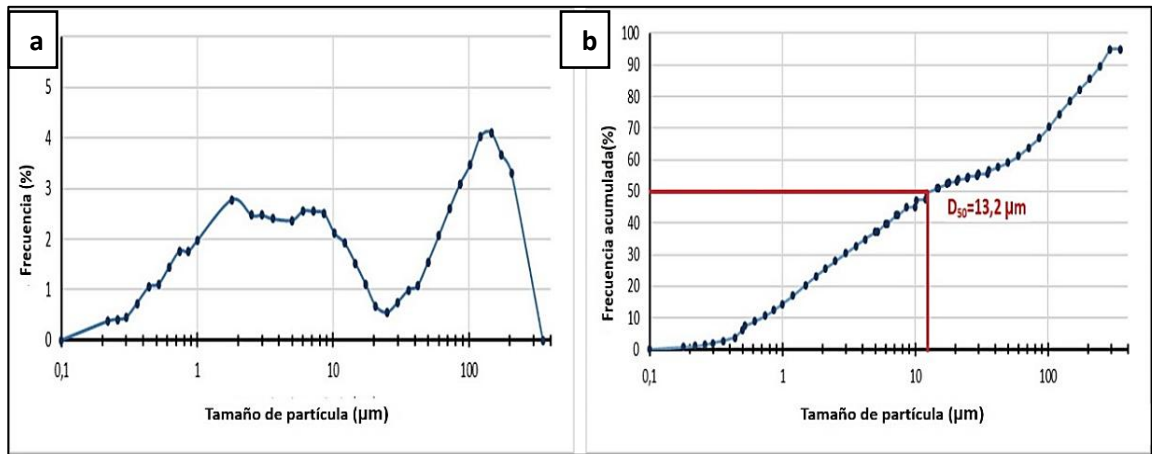
**Figura 6.** Microscopia electrónica de barrido del polvo de acería eléctrico. a) electrones secundarios 30.000X b) electrones secundarios 150.000X.



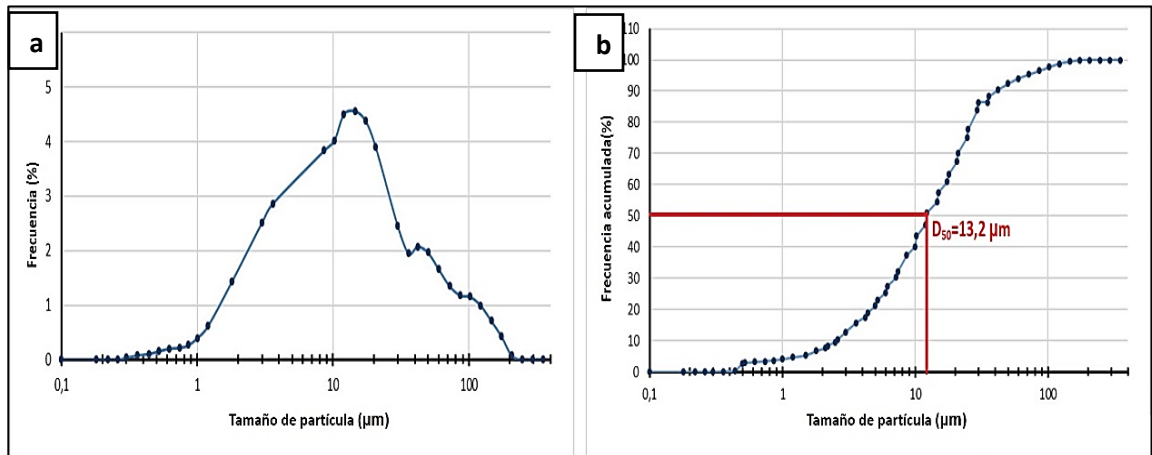
## Carbón vegetal y coque de petróleo

En las Fig. 7 y 8 se pueden observar las distribuciones granulométricas del carbón vegetal y el coque de petróleo respectivamente. El carbón vegetal presenta partículas distribuidas homogéneamente en el rango de 0,1  $\mu\text{m}$  hasta 310  $\mu\text{m}$ ; y el coque de petróleo partículas en el rango desde 0,3  $\mu\text{m}$  hasta 310  $\mu\text{m}$ . Además, para los dos carbones el D50 obtenido fue de 13,2  $\mu\text{m}$  lo cual da similitud en condiciones en el tamaño de partícula.

**Figura 7.** Análisis granulométrico del carbón vegetal. a) Frecuencia. b) frecuencia acumulada.



**Figura 8.** Análisis granulométrico del coque de petróleo. a) Frecuencia. b) frecuencia acumulada.



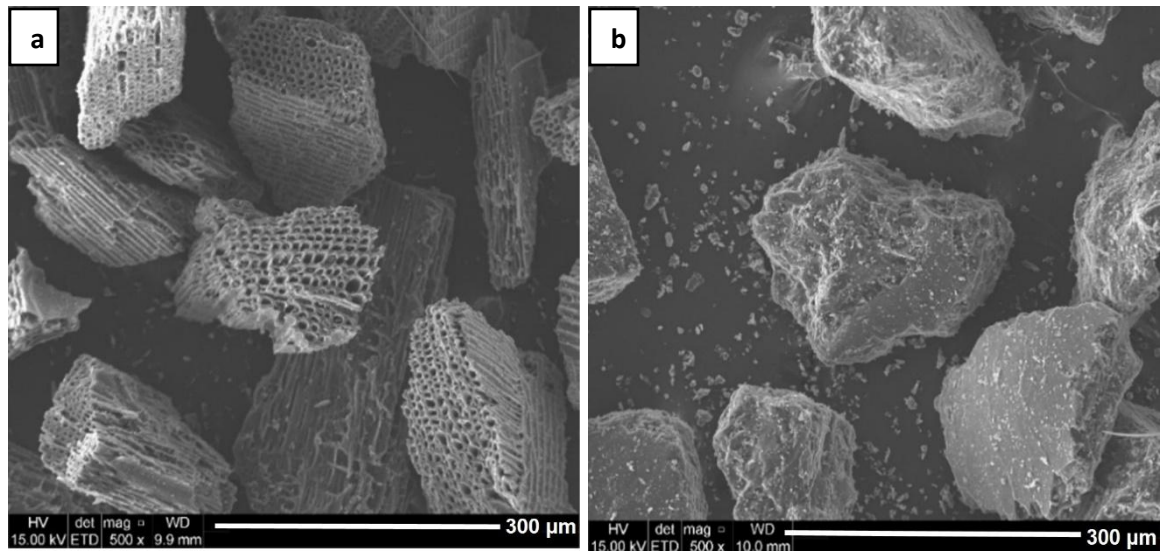
En la tabla 8 se presentan los resultados para los ensayos de humedad, material volátil, cenizas y carbono fijo del carbón vegetal y el coque de petróleo utilizados como agentes reductores. Según los datos se puede apreciar la diferencia de 4% en el porcentaje de humedad que presenta cada uno, lo cual podría explicar la facilidad de aglomeración de los pelets con carbón vegetal. El carbón vegetal presenta un porcentaje mayor de material volátil, relacionado al grado de reactividad y al proceso de reducción. El coque de petróleo presenta un poder calorífico menor que el carbón vegetal, debido a que su porcentaje de cenizas es mayor. Los porcentajes de carbono fijo obtenidos en cada carbón fueron los utilizados para el cálculo estequiométrico de reducción.

**Tabla 8.** Resultados de humedad, material volátil, cenizas y carbono fijo de las muestras de carbón vegetal y coque de petróleo.

<b>Muestra</b>	<b>% Humedad</b>	<b>% Material Volátil</b>	<b>% Cenizas</b>	<b>% Carbono Fijo</b>
Carbón vegetal	5,09 ± 0,1	30,23 ± 1,00	0,77 ± 0,26	69,00 ± 0,52
Coque de petróleo	1,20 ± 0,1	11,25 ± 0,24	14,37 ± 0,17	74,38 ± 0,05

En la Fig. 9 se puede observar la micrografía por microscopía electrónica de barrido la estructura del carbón vegetal (a) y el coque de petróleo (b). En el carbón vegetal se puede apreciar la forma acicular y la gran porosidad que presentan las partículas, lo que le confiere mayor área de contacto en el momento del proceso de reducción. El coque de petróleo presenta partículas más uniformes, más compactas y comparadas con el carbón vegetal una baja porosidad. En el EDS del carbón vegetal (Ver anexo B) el elemento presente en este tipo de carbón es el carbono, mientras que en el EDS del coque de petróleo (Ver anexo C) además del carbono, hay presencia de azufre (S), característico de este material según *Mantovani* [6] en su caracterización de agentes reductores para la peletización de polvo de acería eléctrica.

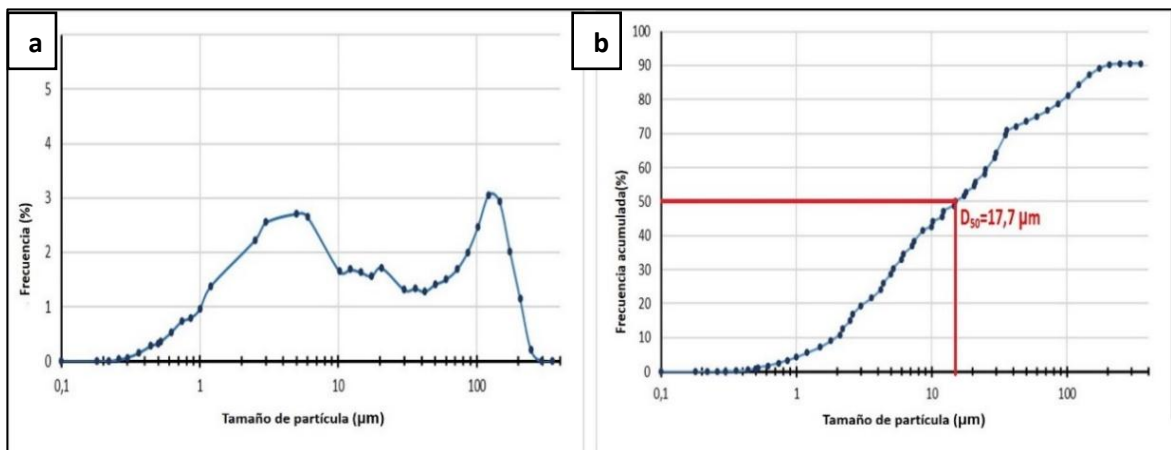
**Figura 9.** Microscopia electrónica de barrido de los agentes reductores empleados. a) Carbón vegetal, electrones secundarios 500X. b) Coque de petróleo, electrones secundarios 500X.



### Hidróxido de calcio

En la Fig. 10 se puede observar el análisis granulométrico del hidróxido de calcio, utilizado como aglomerante de los pelets. El tamaño de partícula se encuentra en el rango de 0,2 µm hasta 125 µm, la distribución es heterogénea.

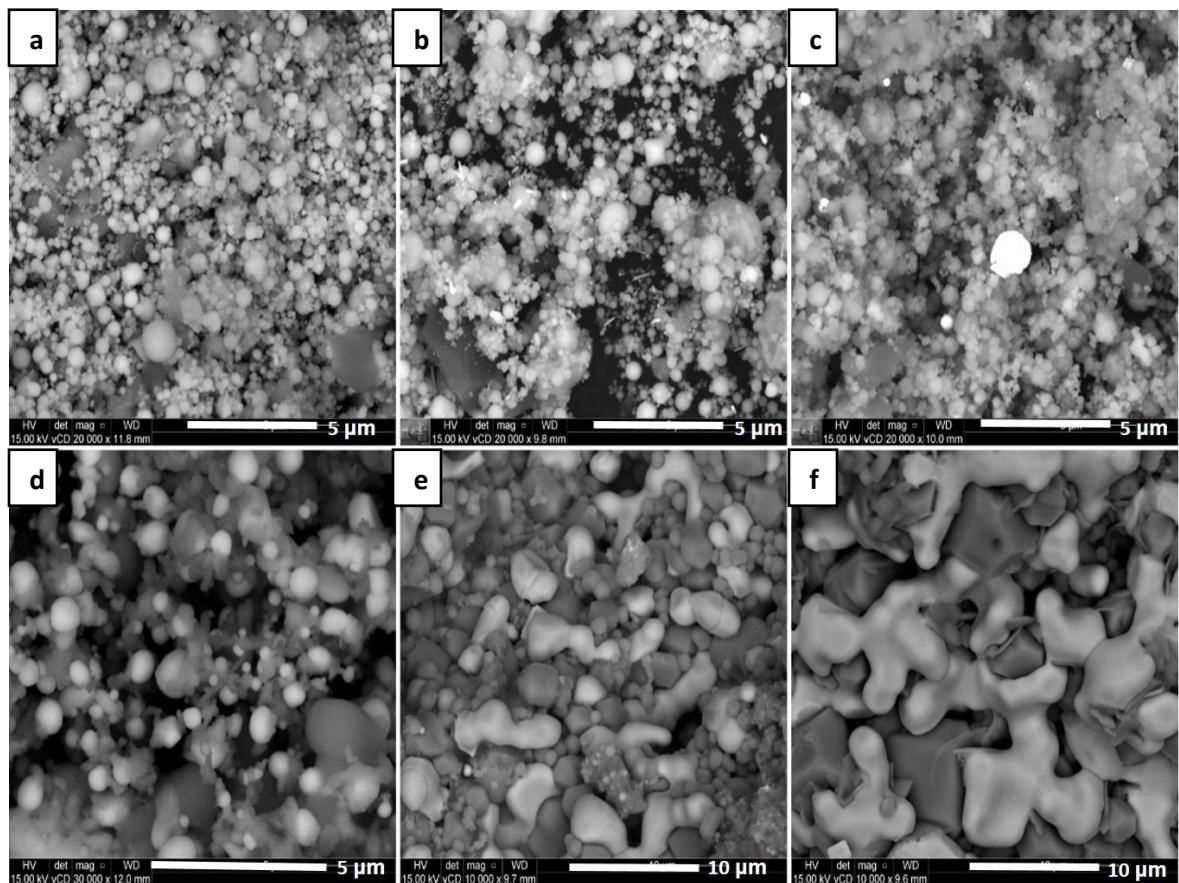
**Figura 10.** Análisis granulométrico del hidróxido de calcio, usado como aglomerante del proceso. a) Frecuencia. b) frecuencia acumulada.



## 4.2. ENSAYO DE AUTO-REDUCCIÓN

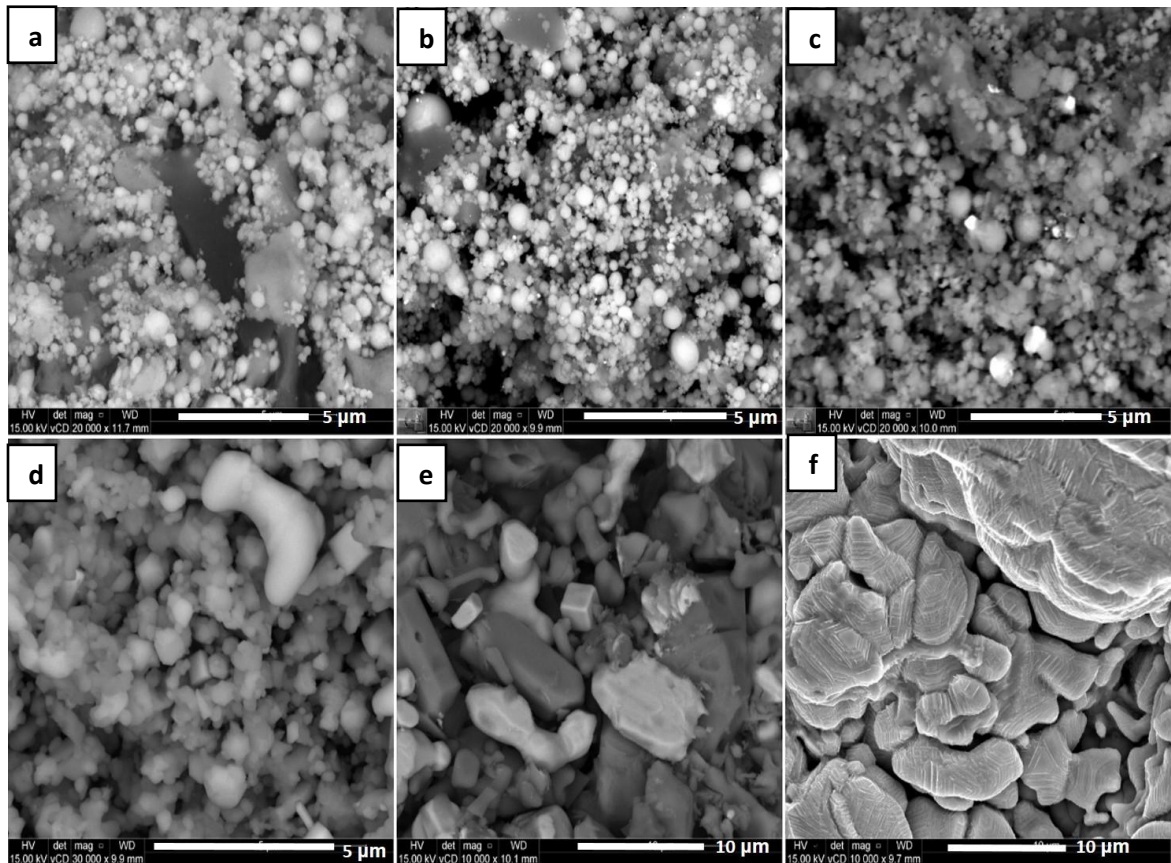
En la Fig. 11 se pueden observar las micrografías de los pelets con carbón vegetal después de reducidos comparadas con la micrografía del pelet antes de ser reducido (Fig. 11a). A 450°C (Fig. 11b) la morfología de las partículas es esférica, en esta temperatura según el EDS (Ver anexo D) la composición química es rica en hierro, zinc, calcio y oxígeno. A 650°C (Fig. 11c) las partículas comienzan a perder su esfericidad y se van tornando amorfas y más finas, según el EDS (Ver anexo E) no se tiene un cambio relevante en la composición química, pero se puede notar la presencia de partículas brillantes identificadas con EDS puntual (Ver anexo F) como plomo.

**Figura 11.** Microscopia electrónica de barrido de los pelets auto-reductores con carbón vegetal después del proceso de reducción, electrones retrodispersados 20.000X. a) antes de la reducción. b) 450°C. c) 650°C. d) 800°C. e) 1050°C. f) 1150°C.



A 800°C (Fig. 11d) empieza el crecimiento de las partículas y el aumento de la densidad de partículas de plomo es evidente en la estructura de los pelets debido a que el óxido plomo está muy cerca de su temperatura de fusión (888°C). La composición química es mostrada en el EDS (Ver anexo G). A 1050°C (Fig. 11e) las partículas se están ligando unas con otras y se puede observar que la estructura del pelet se encuentra en un estado de inicio de fusión por el aspecto amorfo de las partículas. El EDS (Ver anexo H) presenta el hierro, calcio y oxígeno como elementos principales, no existen porcentajes de zinc, debido a que el óxido de zinc fue reducido y evaporado. A 1150°C (Fig. 11f) la estructura se encuentra en un estado alto de fusión del material por el evidente tamaño y forma amorfa de las partículas. Los resultados del EDS (Ver anexo I) muestran que las fases claras son ricas en hierro y las fases más oscuras son ricas en calcio.

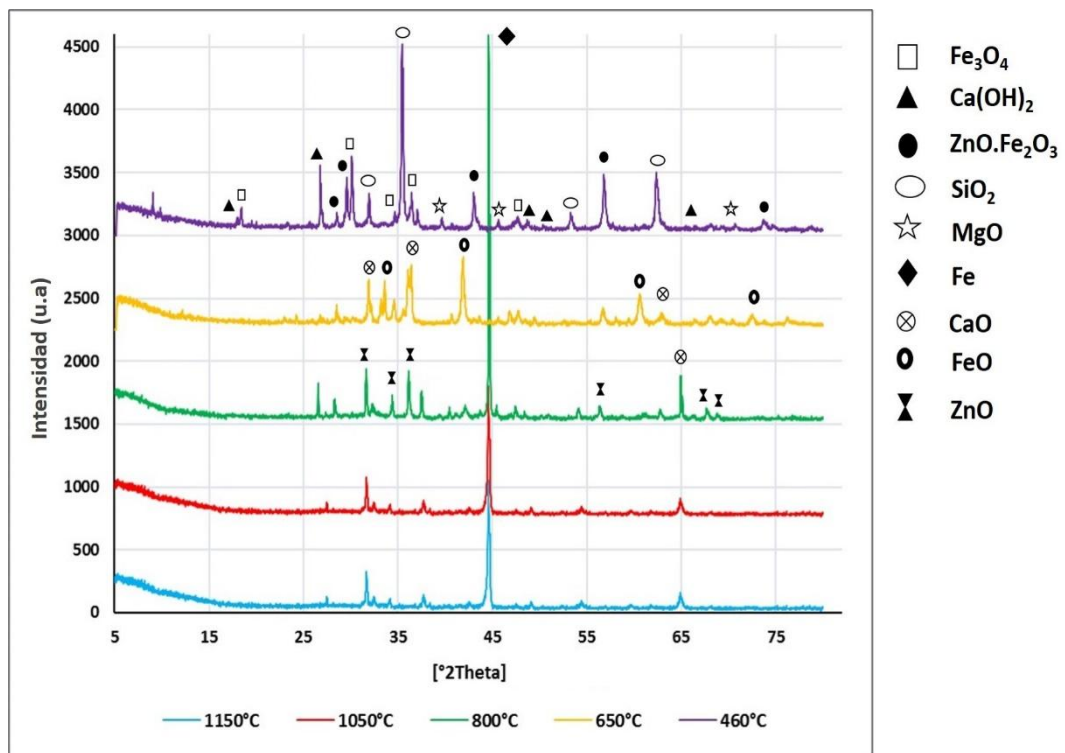
**Figura 12.** Microscopia electrónica de barrido de los pelets auto-reductores con coque de petróleo después del proceso de reducción, electrones retrodispersados 20.000X. a) antes de la reducción. b) 450°C. c) 650°C. d) 800°C. e) 1050°C. f) 1150°C.



En la Fig. 12 se pueden observar las micrografías de los pelets reducidos con coque de petróleo los cuales presentan un comportamiento similar a los reducidos con carbón vegetal a una rata de velocidad menor.

Los cambios estructurales ocurren al aumentar la temperatura y son independientes del tipo de reductor utilizado; en los difractogramas presentados en la Fig. 13 se pueden observar que a 450°C las fases principales y secundarias son  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$  y  $\text{MgO}$ ,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{SiO}_2$  respectivamente, ocurre la reducción  $\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{Fe}_3\text{O}_4$ , la cual ocurre a temperaturas inferiores a los 700°C.

**Figura 13.** Difracción de rayos X de los pelets auto-reductores después del proceso de reducción en cada temperatura de trabajo.

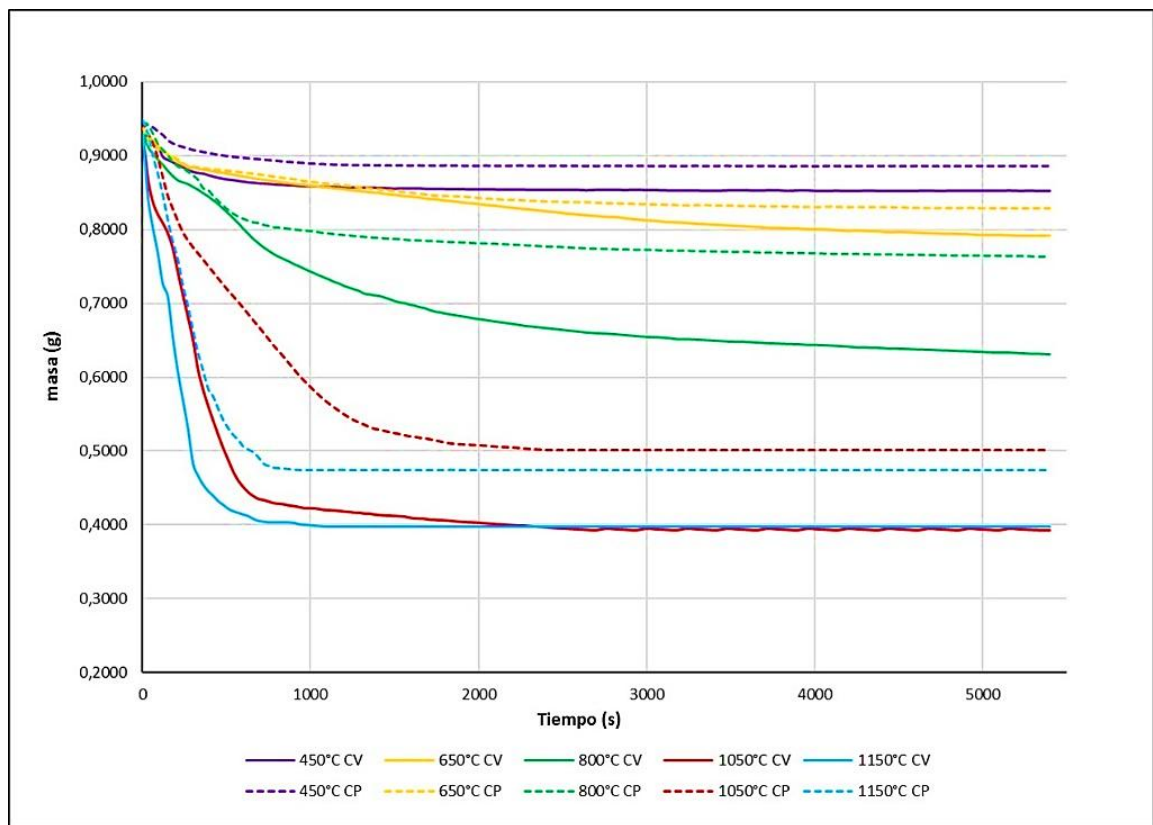


A 650°C son identificadas las fases  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{FeO}$  y  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$  como fases principales y  $\text{ZnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{SiO}_2$  como fases secundarias, ocurre la reducción  $\text{Fe}_3\text{O}_4 - \text{FeO}$ , la cual ocurre a temperaturas inferiores a los 800°C. Aumentando la temperatura, a 800°C el zinc está presente en la forma de  $\text{ZnO}$ ,  $\text{ZnFe}_2\text{O}_4$  y  $\text{Zn}$  y el hierro como  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  y  $\text{Fe}$ . A 1050°C la reacción carbotérmica toma lugar resultando la reducción del zinc y gran parte del hierro

reducido, las fases a esta temperatura están compuestas de hierro metálico y FeO, y como fases secundarias MgO, CaO y SiO<sub>2</sub>.

En la figura 14 se presentan las pérdidas de masa en función del tiempo durante los procesos de reducción de las diferentes temperaturas de trabajo de los pelets con carbón vegetal y coque de petróleo. La pendiente de reducción en base al tiempo es mayor para las temperaturas de 1050° y 1150°C, es decir, con un aumento de la temperatura la reacción ocurre en menos tiempo y la estabilización de pérdida de masa es más rápida.

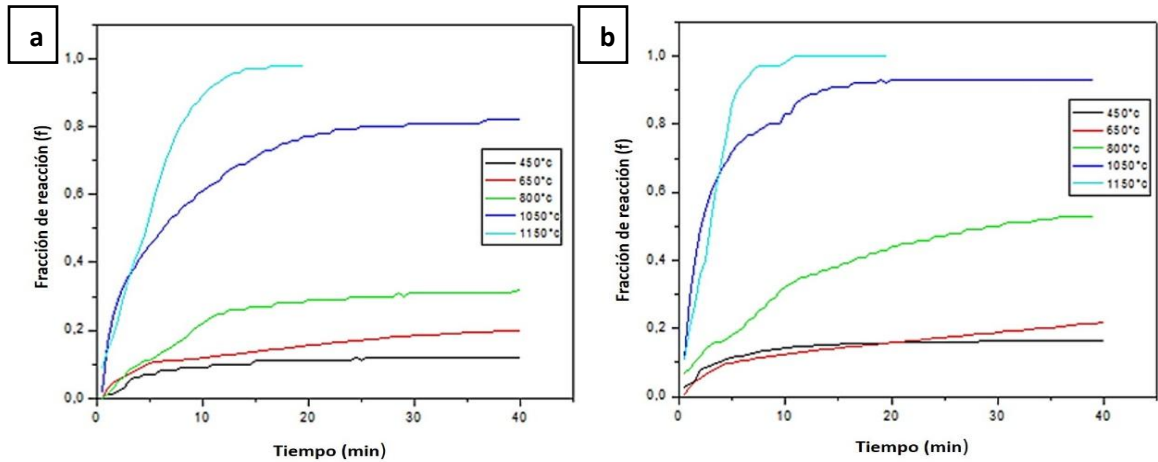
**Figura 14.** Pérdida de masa de los pelets auto-reductores con carbón vegetal (línea continua) y coque de petróleo (línea punteada) en el rango de temperatura de 450°C hasta 1150°C.



Se puede apreciar que el carbón vegetal presenta mejores resultados para el proceso de reducción, pues tanto a la temperatura de 1050 como a 1150°C, ambos reducen 0,5 gramos de masa que corresponden al 55% de la masa inicial, lo cual indica un límite de reducción, que se traduce a la reducción total, y es comprobado a partir de la fracción de reacción

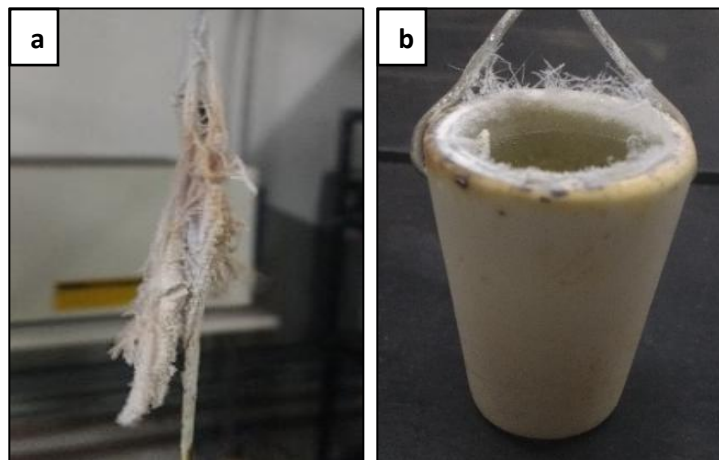
mostrada en la figura 15, donde el pelet con carbón vegetal presenta buenos resultados de reacción desde los 1050°C.

**Figura 15.** Fracción de reacción de los pelets auto-reductores en las diferentes temperaturas de trabajo en función del tiempo. a) Coque de petróleo. b) carbón vegetal.



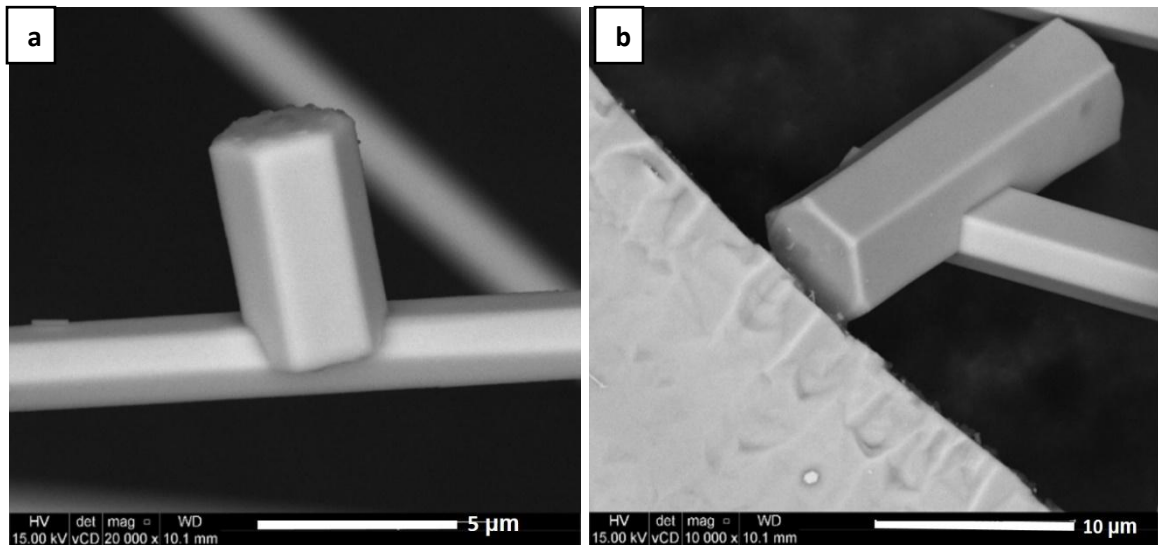
En temperaturas superiores a los 1050°C se percibió tanto en el alambre de trabajo como en el crisol donde se alojaba el pelet durante la reducción, la presencia de un material blanco con textura de suave y en forma de pequeñas agujas con alta volatilidad. En la Fig. 16 se puede apreciar lo dicho anteriormente.

**Figura 16.** Material volátil después del proceso de reducción a altas temperaturas. a) alambre de acero inoxidable. b) crisol contenedor del pelet.



A partir de la micrografía presentada en la Fig. 17 de estructuras hexagonales y con el análisis semicuantitativo de EDS (Ver anexo J) indicaban la presencia de zinc, lo cual afirmó la recuperación del mismo, pues a esas temperaturas los pelets no existía rastro de este.

**Figura 17.** Microscopia electrónica de barrido del material volátil colectado del alambre y el crisol de trabajo después del proceso de reducción a altas temperaturas. a) electrones retrodispersados 20.000X. b) electrones retrodispersados 40.000X.



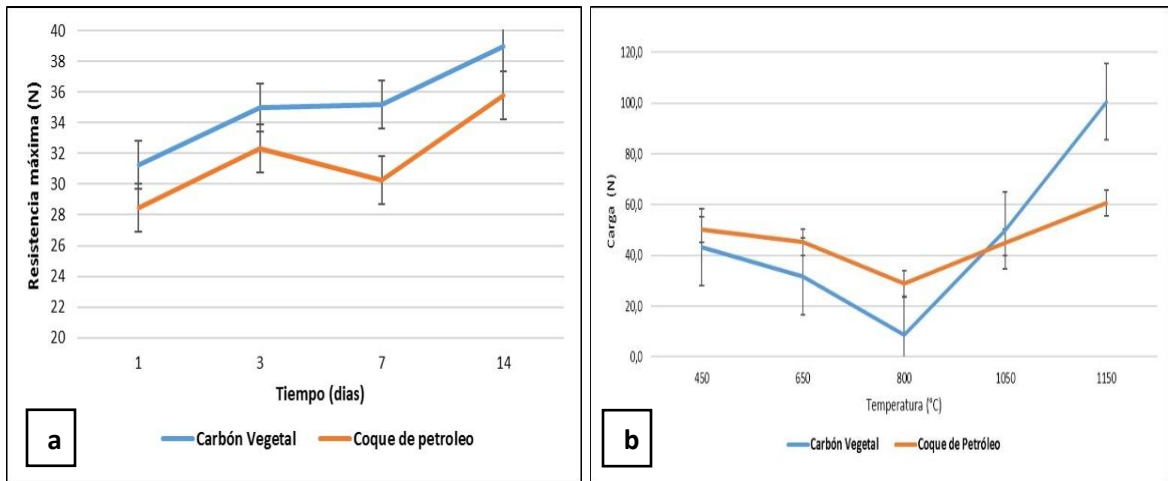
#### 4.3. PRUEBAS DE RESISTENCIA

Los resultados de las pruebas de resistencia a la compresión antes de reducción (en verde) a lo largo de 14 días y después de la reducción en el rango de temperatura de 450°C hasta 1150°C son presentados en la Fig. 18.

Para las pruebas en verde el aumento de la fuerza soportada fue de un 30% del tomado inicialmente, lo cual indica que los pelets pueden ser almacenados antes de reducirlos sin sufrir daño alguno. Los mejores resultados de resistencia fueron de los pelets con carbón vegetal, lo cuales se encuentran sobre los pelets con coque de petróleo con una diferencia de fuerza soportada hasta de 4N. Para las pruebas después de reducción muestran una disminución de la resistencia en el rango de 450 a 800°C, puede ser explicado por la formación de grietas en la superficie del pelet los cuales causan su fragilización. En el

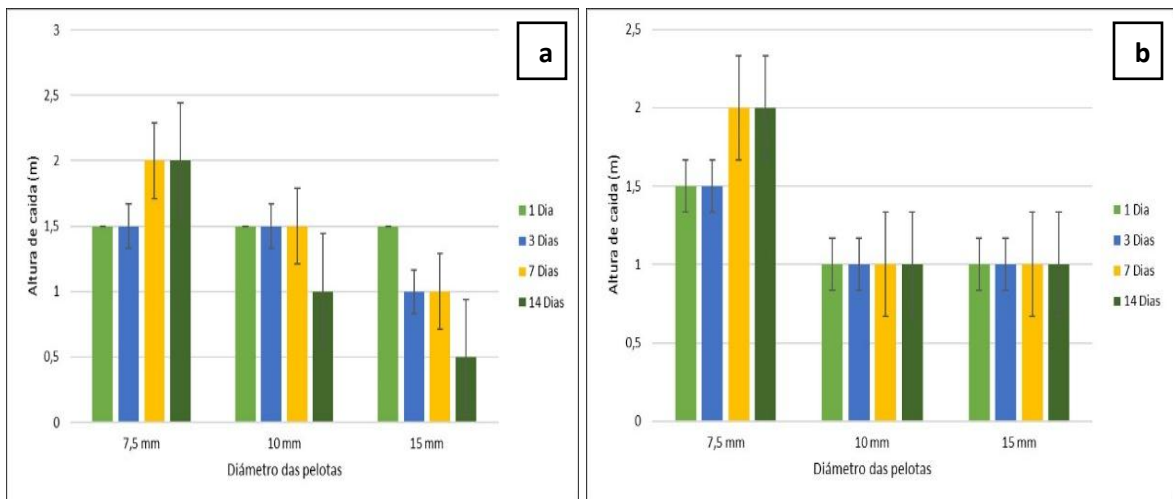
rango de 800 a 1150° C la resistencia aumenta y es al final que los pelets con carbón vegetal soportan la fuerza más significativa, resultado de la presencia de hierro metálico en estado de sinterizado generando una estructura interna más compacta.

**Figura 18.** Resistencia de los pelets auto-reductores. a) en verde en función del tiempo. b) después de la reducción en función de la temperatura.



En la Fig. 19 se presentan los resultados de las pruebas de caída de los pelets a lo largo del tiempo, y haciendo variación del diámetro de fabricación.

**Figura 19.** Pruebas de caída de los pelets auto-reductores en función del diámetro y el tiempo. a) carbón vegetal. b) Coque de petróleo.



A partir de los datos se infiere que disminuir el diámetro de los pelets con carbón vegetal, disminuye el riesgo de quebrarse con el paso de los días y a diámetros mayores la tendencia a quebrarse es mayor debida a la cantidad de masa que poseen y la dureza que van adquiriendo con el tiempo. Sin embargo, para los pelets con coque de petróleo la tendencia es a permanecer constante en el tiempo independiente de su diámetro. Los pelets con carbón vegetal presentan mayor resistencia que con coque de petróleo, aunque independientemente del tipo de reductor utilizado se permite establecer un diámetro de pelet de 7,5 mm ideal por su alta resistencia mecánica.

## 5. CONCLUSIONES

- El polvo de acería eléctrica (PAE) presenta una composición química principalmente con hierro en la forma de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  y zinc en la forma de  $\text{ZnO}$  y  $\text{ZnO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$  como constituyentes primarios; una estructura de partículas con tamaño promedio de  $2,9\ \mu\text{m}$  y principalmente esféricas, lo cual le confiere un alto grado de aglomeración con el hidróxido de calcio, la melaza de caña, y los agentes reductores, en los cuales se determinaron características propias de cada tipo de carbón.
- Los pelets de polvo de acería eléctrica con carbón vegetal presentan mejor resistencia mecánica, soportando fuerzas de hasta 39 N en verde para tiempos de almacenamiento de 14 días y hasta 100 N después del proceso de reducción en el rango de temperatura de  $450^\circ$  a  $1150^\circ\text{C}$ , comparados con los que contienen coque de petróleo que soportan fuerzas de hasta 36N y 60N para pruebas de pelets en verde y después de reducidos, respectivamente; determinando un diámetro ideal de 7,5 mm para los pelets fabricados con los dos tipos de reductores.
- La temperatura de reducción ideal para la recuperación completa del zinc encontrado en los volátiles es de  $1050^\circ\text{C}$ , con fracción de reacción sobre el 90% y pérdida de masa de hasta 55% de su masa inicial, sin llevar el horno a una temperatura mayor.

## 6. RECOMENDACIONES

- Realizar el proceso de peletización en un disco peletizador, seleccionando lotes representativos de pelets para el análisis a nivel industrial.
- Analizar la basicidad del polvo de acería eléctrica por los contenidos de  $\text{CaO}$  y  $\text{SiO}_2$  hallados en la fluorescencia de rayos X, analizando el efecto en sus propiedades mecánicas y en el proceso de reducción.
- Variar el tipo de aglomerante utilizado durante el proceso de peletización y hacer la comparación con el hidróxido de calcio y la melaza de caña en las propiedades mecánicas y en el proceso de reducción.

## BIBLIOGRAFÍA

FÁBIO GONÇALVES RIZZI, FELIPE FARDIN GRILLO, DENISE CROCCE ROMANO ESPINOSA, JORGE ALBERTO SOARES TENÓRIO. Caracterização da poeira gerada no processo de reciclagem da poeira de aciaria elétrica. São Paulo; En: Seminário. Tecnologia, Metais, Materiais e Minerais, Vol. 10; 2013, Págs. 224-230.

GRILLO, FELIPE FARDIN. Recuperação do Zn e Fe da poeira de aciaria elétrica proveniente da produção de aço carbono; Vitória, 2011; 108 Págs. Tesis de doctorado.; Instituto Federal do Espírito Santo.

JUNCA, EDUARDO. Reciclagem de poeira de aciaria: estudo da redução da poeira da aciaria LD, elétrica e Ferrita de zinco; São Paulo, 2014; 160 Págs. Tesis de doctorado.; Universidade de São Paulo, Escola Politécnica.

MANTOVANI, MARIO CESAR. Caracterização de Poeiras Geradas em Fornos Elétricos A Arco e seu Estudo Quando aglomeradas na forma de Pelets Auto-Redutoras.; São Paulo, 1998; 165 Págs. Tesis de doctorado.; Universidade de São Paulo, Escola Politécnica.

PAULINO, MATEUS ALVES SEGUNDO. Caracterização da poeira de aciaria elétrica e estudo termodinâmico visando a recuperação da ferrita de zinco  $ZnFe_2O_4$ ; Fortaleza, 2013; 41 Págs. Tesis de maestría. Universidade Federal do Ceará.

SOBRINHO, VICENTE DE PAULO FERREIRA MARQUES. Adição de poeira de aciaria elétrica em ferro gusa líquido; São Paulo, 2012; 106 Págs. Tesis de doctorado.; Universidade de São Paulo, Escola Politécnica.

TELLES, VICTOR BRIDI. Reciclagem da poeira de aciaria elétrica na sinterização de minério de ferro visando a eliminação de zinco; São Paulo, 2010; 91 Págs. Tesis de doctorado.; Universidade de São Paulo, Escola Politécnica.

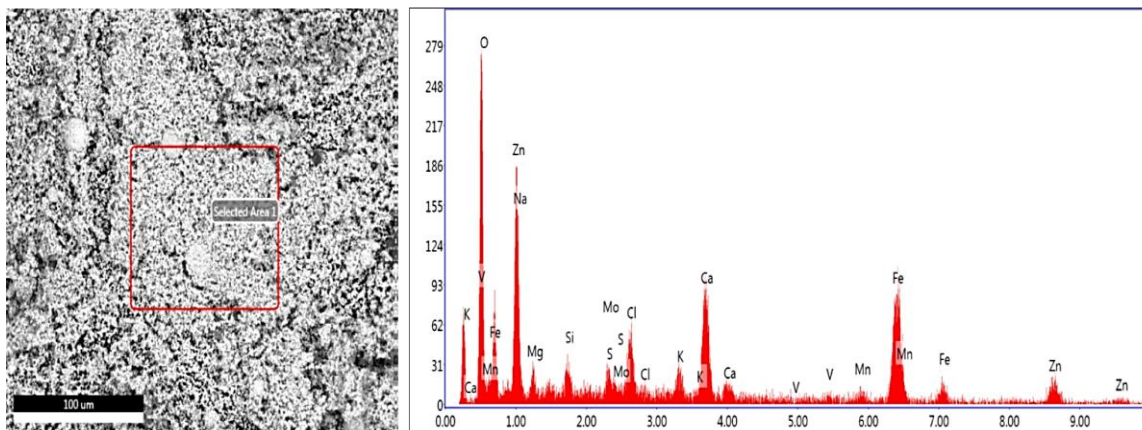
## REFERENCIAS

- [1.] FÁBIO GONÇALVES RIZZI, FELIPE FARDIN GRILLO, DENISE CROCCE ROMANO ESPINOSA, JORGE ALBERTO SOARES TENÓRIO. Caracterização da poeira gerada no processo de reciclagem da poeira de aciaria elétrica. São Paulo; En: Seminário. Tecnologia, Metais, Materiais e Minerai, Vol. 10; 2013, Págs. 224-230.
- [2.] PAULINO, MATEUS ALVES SEGUNDO. Caracterização da poeira de aciaria elétrica e estudo termodinâmico visando a recuperação da ferrita de zinco  $ZnFe_2O_4$ ; Fortaleza, 2013; 41 Págs. Tesis de maestría. Universidade Federal do Ceará.
- [3.] SOBRINHO, VICENTE DE PAULO FERREIRA MARQUES. Adição de poeira de aciaria elétrica em ferro gusa líquido; São Paulo, 2012; 106 Págs. Tesis de doctorado.; Universidade de São Paulo, Escola Politécnica.
- [4.] GRILLO, FELIPE FARDIN. Recuperação do Zn e Fe da poeira de aciaria elétrica proveniente da produção de aço carbono; Vitoria, 2011; 108 Págs. Tesis de doctorado.; Instituto Federal do espírito Santo.
- [5.] TELLES, VICTOR BRIDI. Reciclagem da poeira de aciaria elétrica na sinterização de minério de ferro visando a eliminação de zinco; São Paulo, 2010; 91 Págs. Tesis de doctorado.; Universidade de São Paulo, Escola Politécnica.
- [6.] MANTOVANI, MARIO CESAR. Caracterização de Poeiras Geradas em Fornos Elétricos A Arco e seu Estudo Quando aglomeradas na forma de Pelets Auto-Redutoras.; São Paulo, 1998; 165 Págs. Tesis de doctorado.; Universidade de São Paulo, Escola Politécnica.
- [7.] JUNCA, EDUARDO. Reciclagem de poeira de aciaria: estudo da redução da poeira da aciaria LD, elétrica e Ferrita de zinco; São Paulo, 2014; 160 Págs. Tesis de doctorado.; Universidade de São Paulo, Escola Politécnica.
- [8.] F. F. GRILLO, J. L. COLETI, D. C. R. ESPINOSA, J. R. OLIVEIRA AND J. A. S. TENÓRIO. Zn and Fe Recovery from Electric Arc Furnace Dusts, São Paulo.; En: conferencia. Materials Transactions, Vol. 55; 2014, Págs. 351-356.

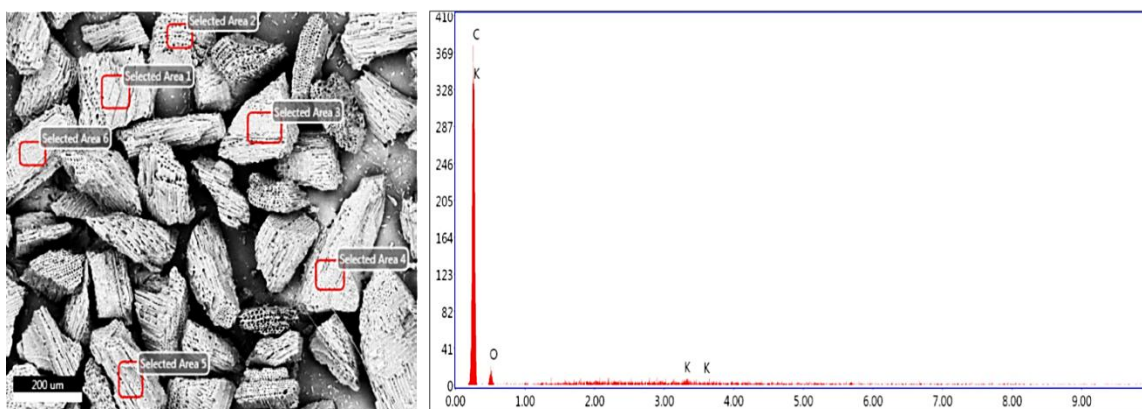
- [9.] RUETTEN JUERGEN, RON CRITTENDON. Environmental Friendly Recycling of EAF steel mill dust, Bali; En: conferencia SEAISI, Vol 10; 2012 Mayo. Págs. 1-9.
- [10.] R. BUSÈ, D. MOMBELL, C. MAPELLI. Recupero dei metalli dalle polveri di aspirazione dei forni: processo Waelz. Ponte Nossa, En: Seminario: La Metallurgia Italiana, Vol.; 2014. Págs. 1-27.
- [11.] G. STROHMEIER, J.E BONESTELL. Steelworks residues and the walez kiln treatment of electric arc furnace dust. United States, En: Seminario: Iron and Steel Engineer, Vol. 73; 1996, Págs. 125-137.
- [12.] ASTM D3174-11.; Standard Test Method for Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal; 5 Págs.; 2012.
- [13.] ASTM D3173-11.; Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke; 4 Págs.; 2012.
- [14.] ASTM D3175-11.; Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke1; 7 Págs.; 2012.

## ANEXOS

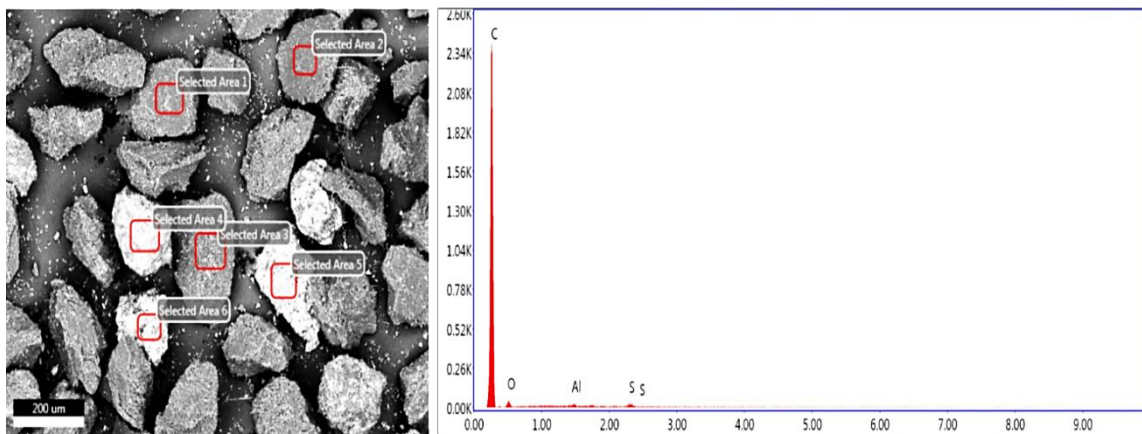
### Anexo A. Análisis EDS del polvo de acería eléctrica.



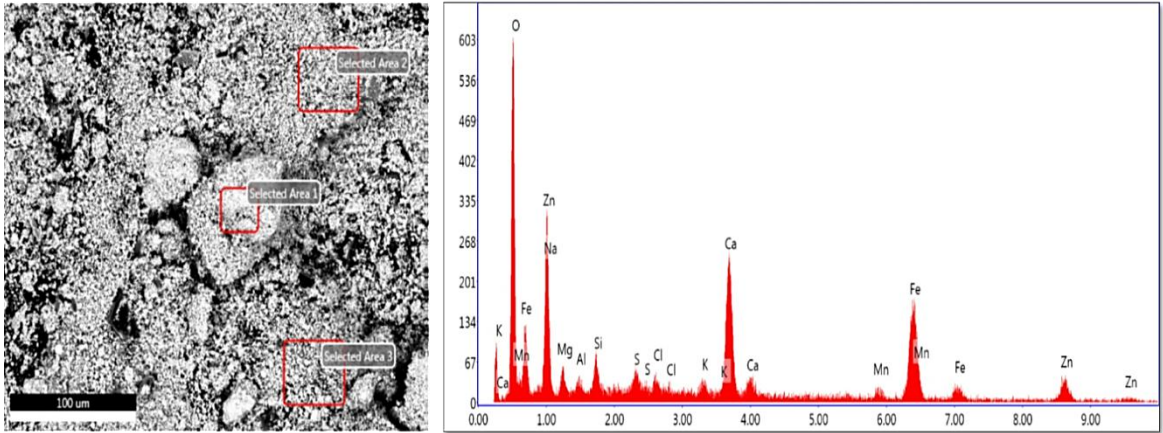
### Anexo B. Análisis EDS del carbón vegetal.



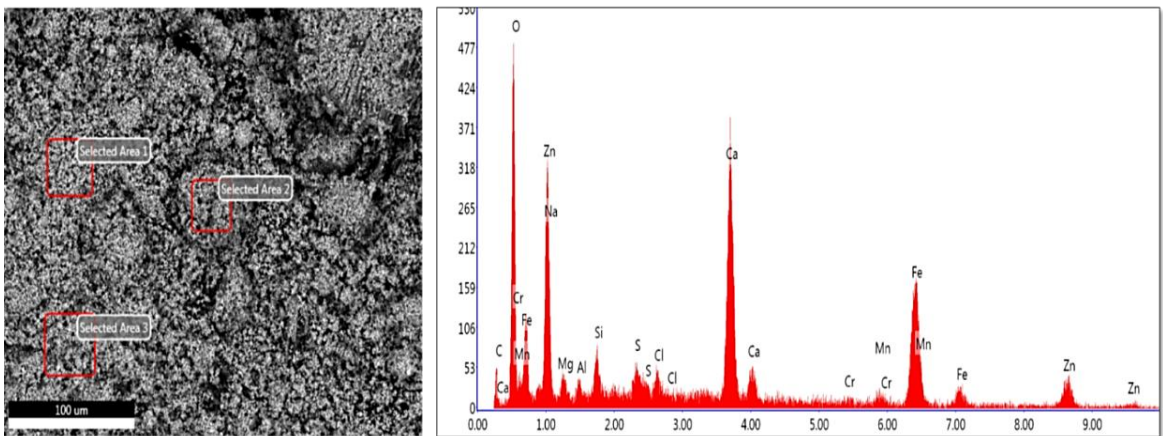
### Anexo C. Análisis EDS del coque de petróleo.



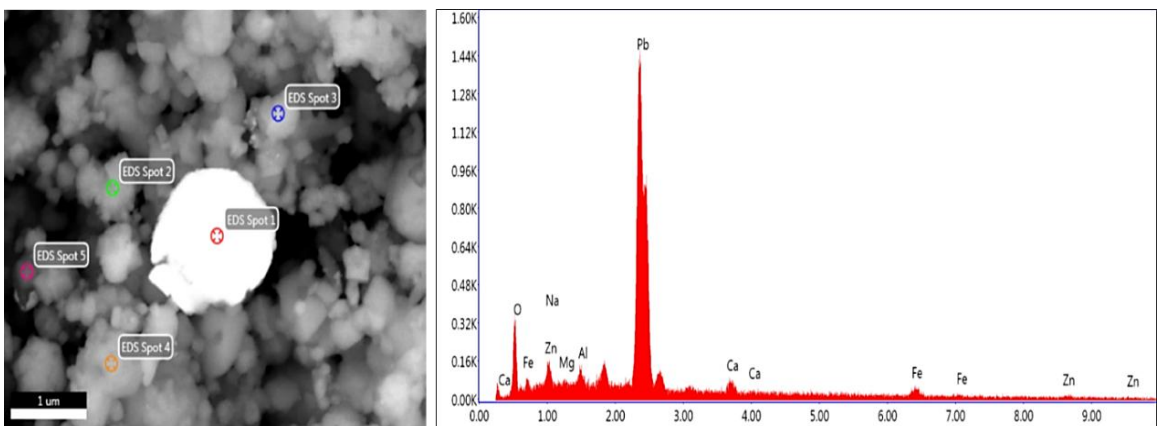
**Anexo D. Análisis EDS del pelet reducido a 450°C.**



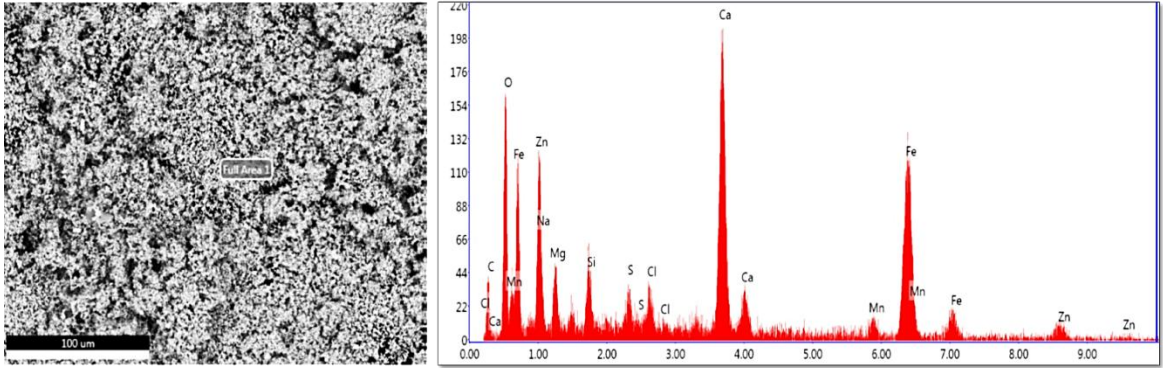
**Anexo E. Análisis EDS del pelet reducido a 650°C.**



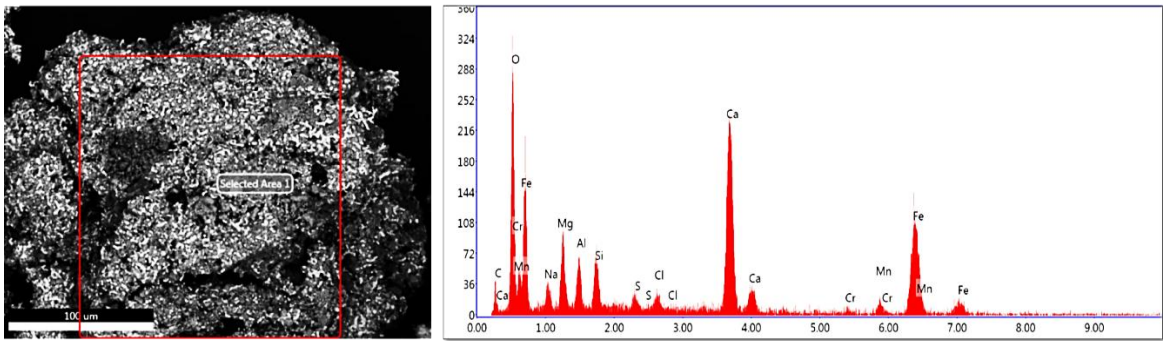
**Anexo F. Análisis puntual a 650°C.**



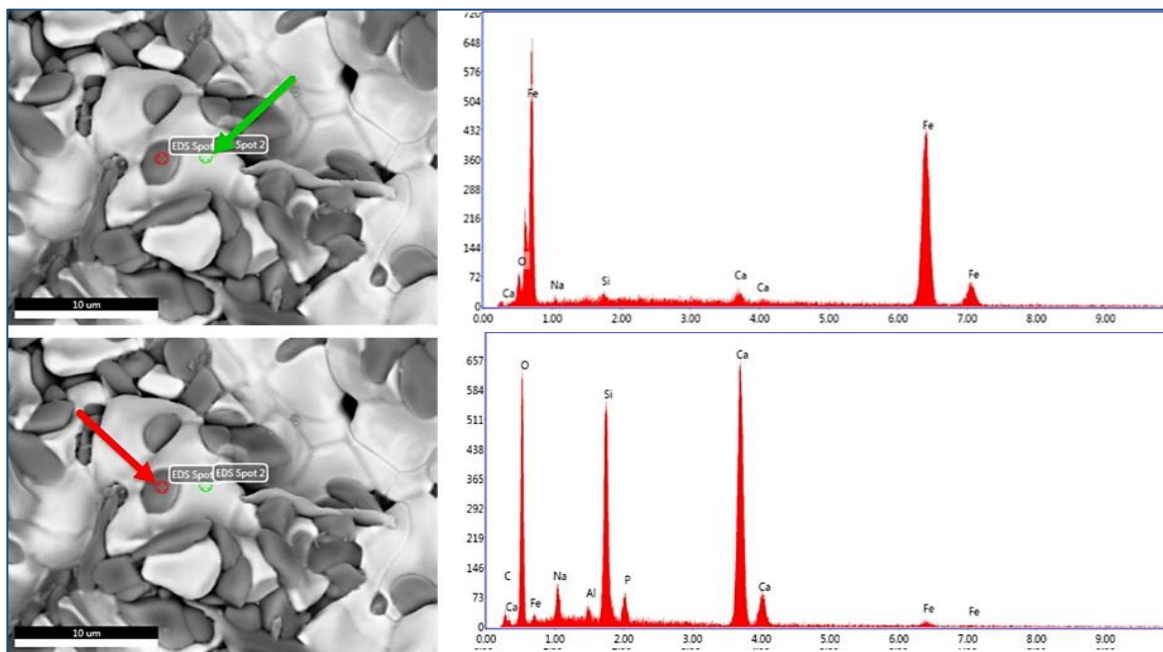
**Anexo G.** Análisis EDS del pelet reducido a 800°C.



**Anexo H.** Análisis EDS del pelet reducido a 1050°C.



**Anexo I.** Análisis EDS puntuales del pelet reducido a 1150°C.



**Anexo J. Análisis EDS de material volátil.**

