

# ANÁLISIS DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL RESIDUO SÓLIDO DE SEDIMENTACIÓN RESIDUAL A PARTIR DEL TRATAMIENTO QUÍMICO SUPERFICIAL DEL PERFIL DE ALUMINIO

## CHEMICAL COMPOSITION ANALYSIS OF THE SOLID RESIDUAL SEDIMENTATION WASTE FROM THE SURFACE CHEMICAL TREATMENT OF THE ALUMINUM PROFILE

---

**Brenda Mc Neil<sup>1</sup>, Lilia González<sup>1</sup>, Jorge Fundora<sup>1</sup>, Alexander Cueli<sup>1</sup>**

(1) Laboratorio de Ensayos de Tropicalización (LABET), El Morro No.7246 Km 2½ Rto. Cojímar, La Habana - Cuba  
(e-mail:mcneilb200@gmail.com)

*Recibido: 29/01/2024 - Evaluado: 03/03/2024 - Aceptado: 27/03/2024*

<https://doi.org/10.65093/aci.v15.n2.2024.15>

---

### RESUMEN

En la Empresa de Producciones de Aluminio el tratamiento químico al que son sometidos los perfiles de aluminio, antes de ser lacados, tiene lugar en las cubas de decapado, desoxidado, desengrase, enjuagues y pasivado y da lugar a un residual que es conducido a una planta de tratamiento; siendo separado en un residual líquido, que retorna al proceso, y un residual sólido, que hasta el momento se almacenaba sin uso. El objetivo de esta investigación es determinar y analizar la composición química de este residuo sólido. La metodología utilizada son procedimientos de normas cubanas e internacionales. El resultado de la composición química obtenida reflejó similitud con los principales constituyentes del cemento ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , y  $\text{SO}_3$ ), condición que permite aprovechar dicho desecho sólido como remplazo en la fabricación de materiales de la construcción; ofreciendo una vía factible para eliminar la disposición inadecuada del residuo antes mencionado.

### ABSTRACT

At the Aluminum Production Company, the chemical treatment to which the aluminum profiles are subjected, before being lacquered, takes place in the pickling, deoxidizing, degreasing, rinsing and passivation tanks and gives rise to a residue that is taken to a treatment plant; being separated into a liquid residue, which returns to the process, and a solid residue, which until now was stored without use. The objective of this research is to determine and analyze the chemical composition of this solid waste. The methodology used are procedures of Cuban and international standards. The result of the chemical composition obtained reflected similarity with the main constituents of cement ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , and  $\text{SO}_3$ ), a condition that allows taking advantage of this solid waste as a replacement in the manufacture of construction materials, offering a feasible way to eliminate the inadequate disposal of the aforementioned waste.

Palabras clave: decapado, secado, tamizado, cementos  
Keywords: pickling, drying, sieving, cement

## INTRODUCCIÓN

El aluminio resiste a la corrosión en condiciones ordinarias y es inoxidable al aire libre, por recubrirse de una fina capa de óxido natural que protege al resto de las piezas. Esta capa superficial no siempre proporciona garantías adecuadas para su empleo arquitectónico exterior en lugares expuestos, donde la apariencia junto con la resistencia a la abrasión, la corrosión y la erosión son factores determinantes de la calidad del producto colocado. No se recomienda pintar sobre esta capa protectora naturalmente formada debido:

1. Su bajo espesor (0,5  $\mu\text{m}$ ).
2. Es moderadamente permeable.
3. Es mala base para el anclaje de pintura.

Por lo anteriormente expuesto se debe eliminar la capa de óxido natural tratando al aluminio mediante procesos industriales de tratamiento superficial con productos químicos, que al reaccionar con el metal base forman una capa superficial, la cual esta químicamente anclada.

Antes de aplicar cualquier recubrimiento sobre la aleación de aluminio conformada se realiza la preparación del perfil mediante el tratamiento químico superficial. Este proceso, llamado también de conversión química o adherencia del perfil, se realiza para:

- ✓ Remover grasa, polvo y otros contaminantes como grafito (Desengrasado y limpieza).
- ✓ Mejorar el aspecto superficial.
- ✓ Eliminar residuos de óxido.
- ✓ Aplicar una capa de conversión que mejore la resistencia a la corrosión.
- ✓ Lograr una mejor adherencia del revestimiento orgánico, con mayor penetración y estabilidad de las pinturas, brindando así adecuada protección al perfil.

La planta de tratamiento químico superficial de los perfiles de aluminio, tiene destinada toda su producción a la arquitectura exterior y es única de su tipo en el país, hace uso de una de las vías para la protección anticorrosivo del metal, mediante la aplicación de un recubrimiento (en este caso laca en polvo termoendurecible), siendo un método pasivo por acción de aislar o separar el metal del medio corrosivo para evitar el ataque, con una preparación previa de la superficie del perfil influye en la adherencia del recubrimiento.

La instalación para el tratamiento químico superficial de los perfiles de aluminio consta de 6 cubas en las que desarrollan estos procesos y tienen una capacidad de 15 mil litros cada una y se distribuyen de la siguiente forma:

- Una cuba para el proceso de desengrasado, desoxidado y decapado.
- Dos para enjuague con agua corriente.
- Dos para enjuague con agua desionizada (depurada en la propia planta de tratamiento de agua).
- Una para el tratamiento de pasivado.

El proceso de tratamiento químico, que ocurre en una primera cuba se realizan a la vez las tres operaciones con el uso de un producto químico que se utiliza para el desengrasado, desoxidado y decapado de la superficie del perfil de aluminio por inmersión a temperatura ambiente, y con este proceso después de 10 min queda eliminado contaminante intermetálico, se eliminan residuos superficiales de aluminio, sales solubles de Mg, Fe y Si, con pérdida de peso entre 0,6 y 1,2g/m<sup>2</sup> (especificaciones de Qualicoat 2022, [www.asoc-aluminio.es/qualicoat](http://www.asoc-aluminio.es/qualicoat)), y en una segunda cuba se realiza un primer enjuague con agua de la red y una tercera cuba para un enjuague posterior con agua desionizada para eliminar los posibles sobrantes. Por último, en una cuba se realiza el proceso de pasivado, esta etapa se produce una capa de conversión casi incolora sobre el aluminio y se lleva a cabo con el uso del producto químico para este fin, por lo que estos residuales provienen sólo de la etapa de tratamiento químico.

Los residuales que provienen del proceso de tratamiento químico que se someten los perfiles de aluminio en la cuba de desengrasado, desoxidado y decapado, de las cubas de aguas de enjuagues posteriores y de la cuba del tratamiento de pasivado, y que salen por reboso de las cubas procedentes de la instalación, son conducidos a la planta de tratamiento químico y estos residuales son tratados químicamente en un tanque neutralizador para ajustar el pH a neutro y luego pasan a otro tanque sedimentado, donde se garantiza la precipitación de todos los metales y con la dosificación de coagulante especial, se reducen los sólidos en suspensión que van al fondo, formando una capa de lodos que son extraídos periódicamente por la limpieza manual o por el filtro, y genera un residuo sólido blanco, que es almacenado (McNeil *et al.*, 2015).

Debido a que se detectó una acumulación significativa de residuos sólidos con un impacto ambientalmente negativo en el almacén, se realizó la presente investigación, con vista darle solución a la eliminación de la disposición inadecuada de estos residuos y evitar la contaminación que genera la instalación por este concepto.

Es posible producir materiales de la construcción no solo a partir de productos tradicionales, tales como la caliza, el yeso, la arcilla y la bauxita; sino también de subproductos industriales, como pueden ser fosfoyeso anhidrita, las cenizas volantes, las escorias de alto horno, de aluminio y otros subproductos. Según la literatura (Arjunan *et al.*, 1999; Valenti *et al.*, 1987), es posible producir cementos especiales que contengan estos constituyentes  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , y  $\text{SO}_3$  en su composición química.

Este trabajo tiene como objetivo determinar la composición química del residuo y dar a conocer los resultados obtenidos sobre el contenido de los principales constituyentes del cemento ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , y  $\text{SO}_3$ ) en el residuo, el cual permite su aprovechamiento como material alternativo para la fabricación de materiales de la construcción a través de su uso como material de reemplazo.

## MATERIALES Y METODOS

### Materiales

Residuo sólido de sedimentación residual. Producto del proceso en las cubas de desengrasado, desoxidado y decapado, enjuagues con agua y pasivado al que se someten los perfiles de aluminio y en el proceso de tratamiento de aguas residuales genera un residuo sólido blanco.

Se recogieron dos tipos de muestras de residuo sólido:

- ✓ Grupo 1-Muestra residuo sólido con tratamiento de la planta de residuales.
- ✓ Grupo 2-Muestra residuo sólido después que dejó de funcionar la planta de tratamiento de residuales, estos recibieron el tratamiento manualmente (Tabla 1).

### Métodos

#### *Caracterización del residuo sólido*

Composición química del residuo sólido (base seca del material), almacenado en la planta. Se utilizaron métodos de ensayos de normas cubanas, para las dos muestras (los parámetros de ensayos, en % m/m en base seca):

- ✓ NC 54-35(2014) Determinación de dióxido de silicio-  $\text{SiO}_2$
- ✓ NC 54-339 (1986) Determinación de óxido férrico-  $\text{Fe}_2\text{O}_3$
- ✓ NC 54-338 (1986) Determinación de óxido de aluminio-  $\text{Al}_2\text{O}_3$
- ✓ NC 54-341 (1986) Determinación de óxido calcio-  $\text{CaO}$
- ✓ NC 54-05(1986) Determinación de trióxido de azufre-  $\text{SO}_3$
- ✓ NC 54-004 (1986) Determinación de pérdida por ignición-PI
- ✓ NC 54-27(1986) Determinación de hidróxido de calcio-  $\text{Ca}(\text{OH})_2$

El estudio estadístico se realiza con el programa estadístico SPSS (Statistical Package for Social Science). Se aplicó la t-student para dos muestras independientes al 95 % de confianza, para comprobar si existe diferencia significativa entre los grupos, desde el punto de vista de la variabilidad del contenido de los componentes de importancia.

#### *Determinación de la densidad aparente, humedad y finura del residuo seco sólido*

**Densidad Aparente:** Masa promedio de la unidad de volumen de las partículas del agregado, incluyendo tanto poros permeables o saturables como poros impermeables o no saturables (volumen aparente o absoluto). Se determinó según Manual de Procedimiento Centro de Investigaciones para la Industria Minero-Metalúrgica CIPIMM (GAM 02-11, 2011).

**Humedad:** El % masa/masa se determinó por diferencia de peso antes del ensayo y después del mismo a una temperatura en la estufa de 90 °C, hasta lograr peso constante.

**Módulo de finura:** Es un factor empírico que permite estimar que tan fino o grueso es un material. Está definido como la suma de los porcentajes retenidos acumulados en los tamices de la serie estándar. En la medida en que se acerca a cero indica un agregado fino y en la medida que aumenta su valor indica que el agregado es más grueso. Su uso generalmente se ha centrado en la evaluación de "grados de finura". Se determinó por la norma NC 980(2013) y ASTM D 136 (2021).

#### *Estandarización del tamaño de partícula*

En el proceso de estandarización del residuo se realizó para obtener un tamaño de partícula relativamente cercano al tamaño de partículas del cemento con vista lograr una adecuada reacción entre el cemento y el residuo. Se realizó el mismo proceso para ambas muestras de residuo.

#### *Proceso de estandarización del residuo*

Del material (residuo) húmedo recogido en el almacén, se toma cierta cantidad en kg, se seca en estufa a(90°C) por 2 horas para eliminar el agua, se muele y se tamiza.

#### *Estudio granulométrico del residuo*

Se realiza el análisis del tamaño de partícula (granulométrico) del residuo antes y después de moler el mismo, con ayuda del equipo Analizador de tamaño de partículas marca Horiba 250 V2 (NC 178, 2002).

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **Caracterización del residuo sólido**

El ensayo de la composición química de las muestras se realizó por duplicado utilizándose los Métodos de ensayos de las Normas cubanas. En la (Tabla 1) se muestra los resultados de la composición química de las muestras de residuo Grupo 1 y 2.

Las muestras analizadas son las siguientes:

*Grupo1*-Muestra residuo sólido con tratamiento de la planta de residuales.

*Grupo2*- Muestra residuo sólido después que dejó de funcionar la planta de tratamiento de residuales, estos recibieron el tratamiento manualmente.

Tabla 1: Resultados de la composición química de las muestras de residuo seco Grupos 1 y 2.

Componente	Resultados de la composición química de las muestras de residuo m/m %							
	Grupo 1				Grupo 2			
	Composición Química		Promedio	Desviación Estimada	Composición Química		Promedio	Desviación Estimada
Dióxido de silicio, SiO <sub>2</sub>	25,29	25,27	25,28	0,11	25,21	25,19	25,20	0,014
Óxido férrico, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,35	3,34	3,35	0,014	3,67	3,70	3,69	0,022
Óxido de aluminio, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,27	4,30	4,28	0,022	4,18	4,16	4,20	0,044
Óxido de calcio, CaO	21,67	21,65	21,66	0,014	21,18	21,20	21,19	0,014
Trióxido de azufre, SO <sub>3</sub>	0,23	0,27	0,25	0,028	0,22	0,24	0,23	0,014
Perdida por ignición	27,14	27,17	27,15	0,022	26,67	26,69	26,68	0,014
Hidróxido de calcio, Ca (OH) <sub>2</sub>	0,74	0,75	0,74	0,014	0,73	0,75	0,74	0,014

En el análisis estadístico se plantea determinar si existe diferencia significativa en la variabilidad de la composición química entre las muestras del Grupo 1 y Grupo 2. Se muestran los resultados del estudio estadístico, y se realizó con el programa estadístico SPSS, se aplicó la t-student para dos muestras independientes al 95 % de confianza.

Cálculo de prueba estadístico:

Hipótesis estadística:  $H_0: \mu_1 = \mu_2$  (hipótesis nula no existen en variaciones significativas entre los dos grupos).

$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$  ((hipótesis alternativa si existen variaciones significativas entre los dos grupos).

Nivel de confianza 95 % y de significación  $\alpha = 0.05$

gl grado de libertad  $gl = n_1 + n_2 - 2$

En las tablas 2 y 3 se registra el resumen de los cálculos estadísticos realizados.

Tabla 2: Resultados del estudio estadístico.

Grupo 1		Grupo 2	
Parámetro	Resultado	Parámetro	Resultado
$n_1$	7	$n_2$	7
$\bar{A}_1$	11,96	$\bar{A}_2$	11,69
$S_1^2$	0,0154	$S_2^2$	0,0036

Tabla 3: Resultados del estudio estadístico.

Parámetro	Resultado
$S_p$	0,095
$t_o$	1,65
$t_c$	2,18
gl	12

Leyendas tablas 2 y 3:  $n$ - Tamaños de las muestras;  $\bar{A}_1$ - Promedio de las muestras Grupo 1;  $\bar{A}_2$  - Promedio de las muestras Grupo 2;  $S_p$ - Desviación estándar promedio;  $t_o$ - t de student obtenido calculado;  $t_c$ - t de student crítico (tabla de probabilidad); gl- Grado de libertad. Como  $t_o = 1,65 < t_c = 2,18$ , no existen diferencias significativas entre las dos medias al nivel de confianza del 95%.

El resultado del valor de *t* student a dos colas de 1,65; se observó que no hay evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula ( $t_{\text{obtenido}} 1,65 < t_{\text{critico}} 2,18$ ). Se acepta la Hipótesis nula  $H_0$ , por lo que no existe diferencia significativa en la composición química entre los dos grupos.

Este resultado estadístico comprueba, que se puede utilizar el residuo procedente de la planta de tratamiento de residuales, así como residuo procedente después de haber dejado de funcionar la planta de tratamiento de residuales para fabricar materiales de la construcción.

Este resultado estadístico indica que es posible mezclar las dos muestras Grupo 1 y Grupo 2 en el proceso de estandarización, porque no existe variación significativa en los resultados de la composición química entre estos, y así determinar el contenido de la mezcla final.

Composición química de la mezcla final (unión Grupo 1 y Grupo 2)

En la Tabla 4, se muestra la mezcla final de residuo de la unión del Grupo 1 y Grupo 2, y el resultado del análisis estadístico, reflejando que no existe diferencia significativa en los resultados de la composición química entre los dos grupos.

Tabla 4: Resultados de la composición química de la muestra de residuo seco final.

Componente	Composición química % m/m	
	Promedio	Desviación estándar
Dióxido de silicio, $\text{SiO}_2$	25,24	0,048
Óxido férrico, $\text{Fe}_2\text{O}_3$	3,37	0,023
Óxido de aluminio, $\text{Al}_2\text{O}_3$	4,24	0,057
Óxido de calcio, $\text{CaO}$	21,42	0,26
Trióxido de azufre, $\text{SO}_3$	0,24	0,012
Perdida por ignición	26,92	0,28
Hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$	0,74	0,012

Se realizó un análisis de la composición química de los cementos de uso general que se fabrican, a través de una revisión bibliográfica (Abreu, 2014; Sanjuán & Chichón, 2014). En la tabla 5, se observan los resultados de la composición química de los cementos fabricados en Cuba : Cemento Portland Puzolánico PP35 producido por la industria de cemento cubana, tiene propiedades similares al Cemento Portland Ordinario P35.

Tabla 5: Resultados de la revisión bibliográfica de la composición química de los cementos fabricados en Cuba.

Componente	Cemento uso general rango	Cemento uso general	Cemento Cubano PP35	Cemento Cubano P35
Dióxido de silicio, $\text{SiO}_2$	19,8-26,45	20,3	25,71	22,37
Óxido férrico, $\text{Fe}_2\text{O}_3$	2,1-4,5	4,24	3,39	3,13
Óxido de aluminio, $\text{Al}_2\text{O}_3$	4,1-9,5	4,51	5,76	5,19
Óxido de calcio, $\text{CaO}$	58,2-65,6	63,30	58,40	62,11
Trióxido de azufre, $\text{SO}_3$	0,1-2,2	2,26	3,16	2,96
Perdida por ignición	0,2-2,8	3,35	3,18	2,18
Hidróxido de calcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$	0,1-2,8	0,63	0,88	0,75

En la tabla anterior aparecen los valores en el rango de los constituyentes principales de la composición química del cemento uso general y comparando con Cemento Portland Puzolánico PP35 y Cemento Portland Ordinario P35, están dentro de los valores del rango de las especificaciones de los principales constituyentes del cemento uso general.

La Tabla 6, muestra la comparación de la composición química del cemento PP 35 (revisión e información bibliográfica), con los valores de los resultados de la composición química de la muestra final de residuo sólido (resultado de la mezcla del Grupo 1 y Grupo 2).

Tabla 6: Resultados de la comparación de la composición química entre el residuo final y el cemento PP35.

Compuesto	Resultados de la comparación de la composición química % m/m.	
	Residuo (mezcla final)	Cemento PP35
Dióxido de silicio, SiO <sub>2</sub>	25,24	25,71
Óxido férrico, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,37	3,39
Óxido de aluminio, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,24	5,76
Óxido de calcio, CaO	21,42	58,40
Trióxido de azufre, SO <sub>3</sub>	0,24	3,16
Perdida por ignición	26,92	3,18
Hidróxido de calcio Ca, (OH) <sub>2</sub>	0,74	0,88

En la Tabla 6, se aprecian los valores de los resultados de la determinación de la composición química del residuo (mezcla final) (resultado de la mezcla del Grupo 1 y Grupo 2) que, al compararlo con los principales constituyentes Cemento Cubano PP35, se evidencia que el residuo tiene los cuatro constituyentes principales del cemento CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> y SO<sub>3</sub> en su composición química, por lo que corrobora los valores de los resultados obtenidos en el estudio, y con esta condición permite que este residuo pueda ser utilizado en materiales de la construcción.

En la figura 1, se representan los valores de los resultados obtenidos de la comparación de la composición química del residuo con el cemento PP35, y se demuestra que el residuo tiene los cuatro constituyentes principales del cemento CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub> y SO<sub>3</sub> en su composición química.

#### GRÁFICO DE LA COMPARACIÓN DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL RESIDUO Y EL CEMENTO PP35

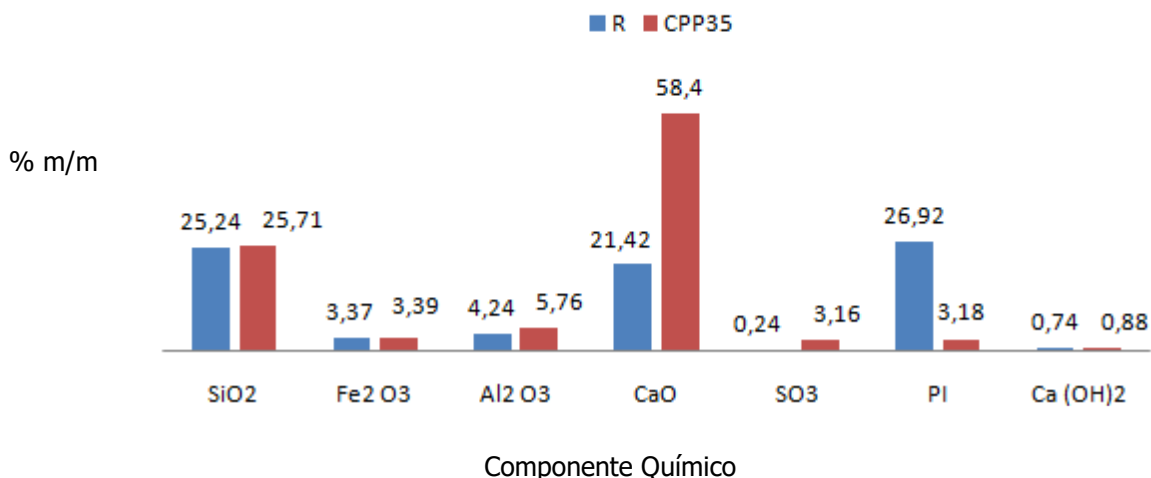


Fig. 1: Comparación de los resultados de la composición química del residuo con el Cemento PP35.

Leyenda: R- Muestra Residuo; CPP 35- Muestra Cemento PP35; Dióxido de silicio. SiO<sub>2</sub>; Óxido férrico. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; Óxido de aluminio. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; Óxido de calcio. CaO; Trióxido de azufre. SO<sub>3</sub>; Perdida por ignición. PI, Hidróxido de calcio. Ca (OH)<sub>2</sub>

A continuación, en la Tabla 7 aparecen los resultados de densidad específica, porcentaje de humedad y finura de la muestra (Mezcla final de residuo, resultado de la mezcla del Grupo 1 y Grupo 2).

Tabla 7: Resultados de densidad específica, porcentaje de humedad y finura de la muestra. (Mezcla final de residuo).

Ensayos	Resultados	Método
Determinación del peso específico (aparente).	0,77 g/cm <sup>3</sup>	Determinación del peso específico. Manual de Procedimiento Centro de Investigaciones para la Industria Minero-Metalúrgica CIPIMM. GAM 02-11.
Determinación de la humedad.	11,75 %	Equipo ADAM, Determinador de Humedad.
Determinación de la finura	0,2	NC 980 (2013) y ASTM C 136 (2021)

Los resultados de la Tabla 7, muestran que la densidad del residuo es de 0,77 g/cm<sup>3</sup>, es menor que la del cemento (1,44 g/cm<sup>3</sup>) y contiene un alto índice de humedad (11,75 %) y el resultado de la finura 0,2, clasifica menor de 2, muy fino o extrafino según la norma ASTM C 136 (2021).

#### Estandarización del tamaño de partícula

Se comprobó a través del análisis estadístico mostrado en la Tablas 2 y 3, que los valores de los resultados de las dos muestras de residuos no presentan variabilidad significativa entre los componentes, permitió que se mezclaran las dos muestras, para el proceso de estandarización.

En el proceso de estandarización del residuo se realizó para obtener un tamaño de partícula relativamente cercano al tamaño de partículas del cemento con vista lograr una adecuada reacción entre el cemento y el residuo.

Del material residuo húmedo recogido y mezclado del almacén, se secó en estufa a 110° C por 2 horas para eliminar el agua, se molió en un molino de martillos y se tamizó con malla 100 para lograr partículas de tamaño cercanas a las partículas del cemento.

#### Estudio granulométrico del residuo. NC 178 (2002). Análisis granulométrico-Áridos

En esta etapa de trabajo se muestra en la Tabla 8, el estudio granulométrico del residuo con el analizador de tamaño de partículas marca Horiba250 V2.

Tabla 8: Resultados del estudio granulométrico sin moler el residuo para el residuo Nuevo.

Porcentaje	Rango	Tamaño promedio	Mediana	Método
100 %	Por debajo 678,50 µm	75,81 µm	14,85 µm	Analizador de tamaño de partículas marca Horiba 250 V2
64,84 %	Por debajo 45 µm			

Como se aprecia en la Tabla 8, el resultado del estudio granulométrico para la muestra sin moler indica que, el tamaño de las partículas que la componen se encuentra en el rango aproximado entre 678,50 µm y el 64,84 % por debajo 45 µm. El tamaño promedio de partículas es de 78,81 µm y la mediana de 14,85 µm.

En la Tabla 9, se reflejan los valores de los resultados de la muestra analizada del tamaño de las partículas y posterior al secado y molienda, contiene 100 % de tamaño, expresado en el rango por debajo de 20 µm. El tamaño promedio de partículas es de 6,83 µm y la mediana de 6,51 µm.

Tabla 9: Resultados del análisis del tamaño de las partículas posterior al secado y molienda a la muestra residuo Nuevo.

Porcentaje	Rango	Tamaño promedio	Mediana	Método
100 %	Por debajo 20 µm	6,83 µm	6,51 µm	Analizador de tamaño de partículas Horiba 250 V2
64,84 %	Por debajo 45 µm			



## CONCLUSIONES

A partir del análisis de los resultados obtenidos, en el presente estudio, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Para el residuo seco se determinó la composición química y se comprobó en los valores de los resultados obtenidos, la presencia de los principales constituyentes del cemento  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$  y  $\text{SO}_3$ , y esta condición permite aprovechar como material de remplazo para la fabricación de materiales de la construcción ya realizada y es factible para eliminar la disposición inadecuada de estos residuos.
- Se cumple el objetivo de dar a conocer la composición química del residuo, y que demuestra el contenido de los principales constituyentes del subproducto, para darle uso como material alternativo de remplazo, y presenta potencialidades de utilización en el desarrollo de otros materiales, y dar valor agregado al residuo.
- A partir de los resultados obtenidos de la caracterización de la composición química de las muestras Grupo 1 y Grupo 2, se realizó un análisis estadístico, el cual evidenció que no existe variabilidad significativa en el contenido de constituyentes entre los dos grupos de muestras con y sin tratamiento de la planta residual, lo cual permite la unión de ambas muestras.
- El material fue sometido al proceso de estandarización, secado, molido y tamizado, lográndose una granulometría cercana a la del cemento para lograr la reacción química entre el residuo y el cemento.
- La densidad de la muestra es de  $0,77 \text{ g/cm}^3$ , menor que la del cemento ( $1,44 \text{ g/cm}^3$ ).
- La muestra contiene un alto índice de humedad (11,75 %), lo que interfiere en la calidad de la molienda, siendo necesario secar primeramente por espacio de 2 h a una temperatura de  $90^\circ\text{C}$ .
- El estudio granulométrico para la muestra sin moler, indica que el tamaño de las partículas que la componen se encuentra en el rango aproximado entre  $678,50 \mu\text{m}$ , el 64,84 % por debajo  $45 \mu\text{m}$ . El tamaño promedio de partículas es de  $78,81 \mu\text{m}$  y la mediana de  $14,85 \mu\text{m}$ .
- El tamaño de las partículas que componen la muestra analizada posterior al secado y molienda se encuentra en el rango aproximado entre  $19,90 \mu\text{m}$  y  $1,72 \mu\text{m}$  por gráfico. La muestra analizada contiene 100 % por debajo de  $20 \mu\text{m}$ . El tamaño promedio de partículas es de  $6,83 \mu\text{m}$  y la mediana de  $6,51 \mu\text{m}$ .

## REFERENCIAS

- Abreu, N. (2014). *Introducción del cemento PP35 en la producción de hormigones estructurales en Cayo Santa María*, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Facultad de Construcciones. Departamento de Ingeniería Civil. Trabajo de Diploma. p. 48. <https://dspace.uclv.edu.cu/items/cd5a66c2-ae55-46b6-ae69-41b2faa148b9>
- Arjunan, P., Silsbee, R. & Roy, D.M. (1999). Sulfoaluminate-belite cement from low-calcium fly ash and sulfur-rich industrial by-products. *Cement and Concrete Research*, 29(8), 1305-1308. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00072-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00072-1)
- ASTM D 136 (2021). Método de ensayo para análisis granulométrico de agregado grueso y fino. Clasificación del tamaño de las partículas.
- GAM 02-11 (2011). Determinación del peso específico. Manual de Procedimiento Centro de Investigaciones para la Industria Minero-Metalúrgica.

McNeil, B.L., González, L. del C. & Marrero, R. (2015). Aplicación de un tratamiento ecológico superficial para el perfil de aluminio. *Tecnología Química*, 35(3), 334-342. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2224-61852015000300007&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852015000300007&lng=es&tlng=es), p. 2-4

NC 54-35(2014). Determinación de dióxido de silicio-  $\text{SiO}_2$ .

NC 980 (2013). Finura, granulometría y su clasificación.

NC 178 (2002). Análisis granulométrico-Áridos.

NC 54-339(1986). Determinación de óxido férrico-  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

NC 54-338 (1986). Determinación de óxido de aluminio-  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

NC 54-341(1986). Determinación de óxido calcio-  $\text{CaO}$ .

NC 54-05(1986). Determinación de trióxido de azufre-  $\text{SO}_3$ .

NC 54-004(1986). Determinación de pérdida por ignición-PI.

NC 54-27(1986). Determinación de hidróxido de calcio-  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

Sanjuán, M.A.B. & Chichón, S.Y. (2014). *Introducción a la fabricación y normalización del cemento portland*, p. 20 – 21. Publicaciones de la Universidad de Alicante (<http://publicaciones.ua.es>).

Valenti, G.L., Santorol, L. & Garofano, R. (1987). High-temperature synthesis of calcium sulphoaluminate from phosphogypsum. *Thermochimica Acta*, 113, 269-270. [https://doi.org/10.1016/0040-6031\(87\)88330-2](https://doi.org/10.1016/0040-6031(87)88330-2)