


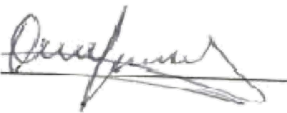
**Nota de Aceptación:**


**Proyecto de Diseño Aprobado**, en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Pontificia Universidad Javeriana Cali para optar el título de Ingeniero Industrial.

  
HERNÁN CAMILO ROCHA NIÑO  
Decano de la Facultad de Ingeniería y Ciencias

  
JORGE ENRIQUE ÁLVAREZ PATIÑO  
Director Carrera Ingeniería Industrial

  
MARIO FERNANDO MUÑOZ VÉLEZ  
Director(a) Proyecto de Diseño

  
ANDRÉS FELIPE TORRES  
RECALDE  
Jurado 1

  
MANUEL ALEJANDRO ROJAS  
MANZANO  
Jurado 2

Santiago de Cali, mayo 22 de 2023

**Ingeniero Jorge Enrique Álvarez Patiño**

Director de Carrera de Ingeniería Industrial  
Pontificia Universidad Javeriana  
Cali

Asunto: Carta de aval para la entrega definitiva del documento Proyecto de Diseño 2022202

Por medio de la presente doy aval para la entrega final a la carrera, del documento que soporta el Proyecto de Diseño 2022202, bajo mi dirección, desarrollado por los estudiantes Mariam Abadía Palacios, Juan José Bruzón Vallejo, Carlos Andrés Jurado Patiño y Mariana Naomi Prado Yabe titulado *“Diseño de un proceso para la fabricación de abrasivos empleando el compuesto alúmina-espinela proveniente de escoria de aluminio”*.

Cordialmente



Mario Fernando Muñoz Vélez  
Director de Proyecto de Diseño 2022202



Mariam Abadía Palacios



Juan José Bruzón Vallejo



Carlos Andrés Jurado Patiño



Mariana Naomi Prado Yabe



# Diseño de un proceso para la fabricación de abrasivos empleando el compuesto alúmina-espínela proveniente de escoria de aluminio

Mariam Abadía Palacios<sup>a,d</sup>, Juan José Bruzón Vallejo<sup>a,d</sup>, Carlos Andrés Jurado Patiño<sup>a,d</sup>, Mariana Naomi Prado Yabe<sup>a,d</sup>, Mario Fernando Muñoz Vélez<sup>b,d</sup>, Adriana Gómez Gómez<sup>c,d</sup>

<sup>a</sup>Estudiante de Ingeniería Industrial

<sup>b</sup>Profesor, Director del Proyecto de Grado, Departamento de Ingeniería Civil e Industrial

<sup>c</sup>Profesora, Co-directora del Proyecto de Grado, Departamento de Ingeniería Civil e Industrial

<sup>d</sup>Pontificia Universidad Javeriana, Cali, Colombia

---

## Resumen

La fundición de aluminio produce un residuo llamado escoria de aluminio, que representa aproximadamente el 4,3% del material procesado. Este residuo contiene componentes contaminantes, como nitruros de aluminio (AlN), que liberan gases de amoníaco al entrar en contacto con el agua. Por lo tanto, la disposición adecuada de esta escoria ha sido un desafío para las empresas del sector debido a su potencial contaminante.

Para abordar este problema, se diseñó un proceso para obtener alúmina-espínela a partir de la escoria de aluminio, con el objetivo de utilizarla en la fabricación de vidrios opalizados. Se realizó un lavado y calcinación de la escoria a 1 100°C durante cuatro horas para obtener la alúmina-espínela, que luego fue sometida a molienda para eliminar las aglomeraciones. Se evaluó la viabilidad técnica y financiera de utilizar la alúmina-espínela en la fabricación de vidrios opalizados mediante *sandblasting*, comparándola con la alúmina comercial.

Se determinó que se necesitaba una cantidad tres veces mayor de alúmina-espínela para lograr un nivel de opalización similar al obtenido con alúmina comercial. Además, se observó que la granulometría de la alúmina-espínela era más fina que la alúmina comercial. Esto indica la posibilidad de procesar partículas de mayor tamaño con el fin de obtener alúmina-espínela con una granulometría similar a la alúmina comercial después de realizar el proceso de molienda y calcinación.

En conclusión, se demostró que es posible utilizar la alúmina-espínela obtenida de la escoria de aluminio en la fabricación de vidrios opalizados mediante *sandblasting*, considerando las recomendaciones propuestas para optimizar el proceso. Esto ofrece una solución más sostenible para el manejo de la escoria de aluminio y brinda una alternativa de aprovechamiento de este residuo en la industria del vidrio.

*Palabras claves: alúmina, calcinación, residuo post industrial, sostenibilidad.*

---

## Abstract

Aluminum smelting generates a residue called aluminum dross, which represents approximately 4.3% of the processed material. This residue contains contaminants such as aluminum nitrides (AlN), which release ammonia gases when in contact with water. Therefore, proper disposal of this dross has been a challenge for companies in the industry due to its potential for environmental contamination.

To address this issue, a process was designed to obtain alumina-spinel from aluminum dross, with the aim of using it in the production of opalescent glass. The dross underwent washing and calcination at 1 100°C for four hours to obtain alumina-spinel, which was then subjected to grinding to remove agglomerations. The technical and financial feasibility of using alumina-spinel in the manufacturing of opalescent glass through sandblasting was evaluated, comparing it with commercial alumina.

It was found that three times the amount of alumina-spinel was required to achieve a similar level of opalescence compared to commercial alumina. Additionally, the particle size distribution of alumina-spinel was finer than that of commercial alumina. This suggests the possibility

of processing larger particles to obtain alumina-spinel with a similar particle size distribution as commercial alumina after the grinding and calcination process.

In conclusion, it was demonstrated that alumina-spinel obtained from aluminum dross can be successfully utilized in the production of opalescent glass through sandblasting, considering the proposed recommendations to optimize the process. This offers a more sustainable solution for managing aluminum dross and provides an alternative for utilizing this waste material in the glass industry.

*Key Words: alumina, calcination, post-industrial residue, sustainability.*

## CONTENIDO

I.	DEFINIR .....	5
A.	Contexto y Justificación .....	5
B.	Grupos de interés .....	8
C.	Requerimientos .....	9
II.	MEDIR .....	12
A.	Plan de recolección de datos .....	12
B.	Exploración de mercado .....	14
III.	ANALIZAR .....	18
A.	Análisis de Oportunidad .....	18
B.	Revisión de literatura .....	21
C.	Exploración de ideas y selección de alternativa .....	25
D.	Objetivos .....	27
E.	Plan de trabajo (PdT) .....	27
IV.	DISEÑAR .....	28
A.	Desarrollo del diseño de la solución .....	28
B.	Validación del diseño propuesto .....	32
1)	Cantidad de alúmina-espínela aprovechada de la escoria de aluminio .....	32
2)	Tamaño de partícula de alúmina-espínela después de la calcinación y molienda .....	33
3)	Costo del proceso del proceso de recuperación de alúmina-espínela proveniente de la escoria de aluminio .....	34
4)	Costo del proceso de producción del producto a base de alúmina-espínela .....	38
5)	Rugosidad del producto prototipo .....	39
V.	VERIFICAR .....	42
A.	Medición de los impactos .....	42
B.	Estandarización de la solución .....	43
C.	Conclusiones .....	47
D.	Recomendaciones .....	48
VI.	GLOSARIO .....	48
VII.	REFERENCIAS .....	49
VIII.	ANEXOS .....	51

---

## Índice de Tablas

TABLA I.....	10
TABLA II.....	13
TABLA III.....	18
TABLA IV.....	22
TABLA V.....	25
TABLA VI.....	27
TABLA VII.....	34
TABLA VIII.....	35
TABLA IX.....	37
TABLA X.....	38
TABLA XI.....	38
TABLA XII.....	40
TABLA XIII.....	41
TABLA XIV.....	41
TABLA XV.....	43
TABLA XVI.....	44
TABLA XVII.....	44
TABLA XVIII.....	45
TABLA XIX.....	46
TABLA XX.....	46
TABLA XXI.....	47
TABLA XXII.....	51

## Índice de Figuras

Fig. 1. Difractograma muestra de escoria de aluminio[3].....	5
Fig. 2. Difractograma de tres muestras de diferente tamaño de escoria de aluminio calcinada (alúmina-espínela), T1 escoria menor o igual a 75 µm, T2 escoria mayor a 75 µm y menor a 150 µm y T3 escoria mayor a 150 µm y menor a 300 µm[3].....	6
Fig. 3. Toneladas métricas de producción de aluminio en Latinoamérica del septiembre del 2021 a septiembre del 2022[6].....	7
Fig. 4. Matriz de Poder vs Interés de los grupos de interés del proyecto.....	9
Fig. 5. SIPOC del proceso de recuperación de alúmina-espínela.....	14
Fig. 6. Diagrama de Flujo de Proceso Actual de la recuperación de Alúmina-Espínela para el diseño del producto a definir.....	15
Fig. 7. Diagrama de aspectos externos e internos para el desarrollo del proyecto.....	16
Fig. 8. Matriz DOFA.....	18
Fig. 9. Pronóstico del mercado del aluminio por industria del usuario final para 2031 [26].....	19
Fig. 10. Diagrama de Ishikawa para la oportunidad del producto.....	20
Fig. 11. Matriz AHP de criterios de selección de alternativas.....	26
Fig. 12. Matriz de selección.....	26
Fig. 13. Diagrama de flujo del proceso de obtención y aplicación de alúmina-espínela.....	29
Fig. 14. Imágenes del proceso de apagado, secado a 100 °C y zarandeado.....	30
Fig. 15. Imágenes de comparación entre alúmina-espínela obtenida con el crisol vs alúmina-espínela obtenida con ladrillos refractarios.....	30
Fig. 16. Imagen de la alúmina-espínela obtenida después del proceso de calcinación de escoria de aluminio.....	31
Fig. 17. Imagen del vidrio antes de iniciar el proceso de SB con ambos materiales abrasivos.....	31
Fig. 18. a) Vidrio opalizado con alúmina comercial. b) Vidrio opalizado con alúmina comercial (izquierda) y alúmina-espínela (derecha).....	32
Fig. 19. Cuarteo de la muestra de alúmina-espínela.....	33
Fig. 20. Equipo tamizadora eléctrica para granulometría.....	34
Fig. 21. a) Tanque de almacenamiento [48], b) Horno para secado de escoria [49] y c) Molino de bolas [50].....	36
Fig. 22. a) Tamizadora [51], b) Horno para calcinar [52] y c) Balanza para producto terminado [53].....	36
Fig. 23. Máquina Keyence durante la prueba de rugosidad.....	39
Fig. 24. Muestra para prueba de líneas del vidrio opalizado con a) Alúmina comercial. b) Alúmina-espínela.....	40
Fig. 25. Muestra para prueba de áreas del vidrio opalizado con a) Alúmina comercial. b) Alúmina-espínela.....	40
Fig. 26. a) Acabado del vidrio opalizado con alúmina comercial. b) Acabado del vidrio opalizado con alúmina-espínela.....	42
Fig. 27. Irregularidades del acabado del opalizado con alúmina-espínela.....	42

## Diseño de un proceso para la fabricación de abrasivos empleando el compuesto alúmina-espínela proveniente de escoria de aluminio

### Breve resumen del proyecto (*Business case*)

Durante el proceso de fundición del aluminio, se genera de manera constante un residuo conocido como escoria de aluminio. Este residuo representa un peligro para el medio ambiente cuando se desecha en rellenos sanitarios, debido a su capacidad contaminante al entrar en contacto con el agua. Sin embargo, la escoria de aluminio contiene diversos elementos en su composición que podrían ser recirculados y reutilizados en la industria. Este residuo ofrece una amplia oportunidad para su implementación en la fabricación de productos abrasivos, tales como lijas, piedras esmeriles, discos pulidores, vidrios opalizados, *sandblasting*, entre otros. Por lo tanto, se lleva a cabo la generación de un prototipo que permite verificar la viabilidad técnica a través de estudios de calidad. Además, se realiza una evaluación de la viabilidad financiera mediante un estudio de mercado y tomando decisiones basadas en costos.

Problema ( <i>Problem statement</i> )	Impacto en los actores ( <i>Business Need—Stakeholders</i> )
Dada la creciente demanda del aluminio y su amplio uso en diversos sectores industriales, su producción a través del proceso de fundición genera de forma continua un residuo conocido como escoria de aluminio. Esta escoria se forma como resultado de la reacción química entre el aluminio líquido y la atmósfera durante el proceso de fundición. El manejo adecuado de esta escoria se ha convertido en un desafío para las empresas fundidoras, ya que la eliminación inadecuada en los rellenos sanitarios puede generar contaminación y liberación de varios gases contaminantes al entrar en contacto con el agua. Por lo tanto, surge una oportunidad para mejorar esta situación, explorando alternativas para el aprovechamiento de la escoria de aluminio. Investigaciones previas realizadas en la Universidad Javeriana Cali han demostrado que mediante un proceso de calcinación, es posible transformar la escoria en un compuesto con un contenido elevado de alúmina, el cual puede ser utilizado en la industria. Esta representaría una valiosa oportunidad tanto para las empresas fundidoras de aluminio, que generan de manera constante la escoria, como para aquellas compañías que requieren alúmina pura, ya que podrían sustituir su materia prima actual, haciendo que	El grupo de investigación SIGMA y los estudiantes del grupo de Proyecto de Diseño 2022-2022 se identifican como actores clave dentro de este proyecto y, por lo tanto, deben recibir prioridad en términos de involucramiento y gestión cercana. Asimismo, las empresas interesadas, tanto aquellas relacionadas con el tratamiento de aluminio como las involucradas en la producción de alúmina, muestran un nivel de interés medio-alto. Sin embargo, su poder de influencia en el proyecto es relativamente bajo. Por lo tanto, es importante mantener a estos dos grupos informados sobre los avances y los resultados derivados del proyecto.

### PLAN DE TRABAJO PROPUESTO

*Escriba aquí las actividades y sus fechas. Puede ser también el pantallazo del Project.*

Actividad	Fecha de entrega
Precisar los requerimientos de materiales para la producción de abrasivos.	6 de febrero 2023
Definir los requerimientos de maquinaria, mano de obra y el gasto energético.	7 de febrero 2023
Llevar a cabo de manera correcta el tamizaje y la clasificación del porcentaje de tamaño de partícula por cada rango.	13 de febrero 2023
Llevar a cabo el proceso de calcinación de la escoria de aluminio de tamaño de partícula previamente establecido para obtener el compuesto alúmina-espínela	15 de marzo 2023
Prototipar el producto abrasivo con la adición del componente alúmina-espínela.	25 de marzo 2023
Evaluar la funcionalidad de los abrasivos basado en los tamaños de partícula aplicados.	05 de abril 2023
Determinar la viabilidad técnica del abrasivo a través de la comparación de atributos físico-mecánicos con abrasivos de óxido de aluminio.	25 de abril 2023
Determinar los costos de producción de los abrasivos	2 de mayo 2023
Estudio de mercado para la estimación del número existente de clientes interesados y la demanda.	5 de mayo 2023
Efectuar la proyección de los flujos de caja relacionados a la producción de abrasivos	10 de mayo 2023
Ejecutar la evaluación de alternativas a través de la comparación de estimaciones de VPN y TIR.	12 de mayo 2023

## I. DEFINIR

### A. Contexto y Justificación

El 7,3% de la corteza terrestre se compone de aluminio, siendo este el tercer metal más abundante [1]. Es por esto por lo que es utilizado industrialmente y además por la favorabilidad de sus propiedades fisicoquímicas, permitiendo producir una gran cantidad de productos como vehículos, electrodomésticos, puertas, ventanas, etc. Sin embargo, para su transformación y futuras aplicaciones, el aluminio se debe someter a un proceso de fundición a una temperatura de aproximadamente 660°C, para que, en su estado líquido, se vierta en un molde y tome la forma deseada. En consecuencia, el aluminio en estado líquido reacciona con la atmósfera, oxidándose y produciendo una capa superficial llamada escoria de aluminio [2]. Esta escoria se considera un residuo en la industria productora de aluminio que además puede ser contaminante. Si se somete a un proceso de lavado para eliminar nitruros presentes en el residuo, produce gases de amoníaco al reaccionar con el agua. Por otra parte, una vez lavado el material, es posible someterlo a un proceso de calcinación, para purificar la escoria de aluminio, promoviendo principalmente la formación de alúmina, pues la escoria de aluminio en condiciones normales está compuesta de aluminio (Al), óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), espinela ( $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ), espinela defectuosa ( $\text{Mg}_{0,388}\text{Al}_{2,408}\text{O}_4$ ) y nitruros de aluminio (AlN-C y AlN-H) como se puede apreciar en la figura 1 [3]. Mientras que en la figura 2, se muestran los resultados obtenidos por Orozco y Vega (2022), donde la escoria de aluminio calcinada para diferentes tamaños de partícula evidenció un aumento en la cristalinidad del material y la presencia de dos fases, alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y espinela ( $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ) [3]. Esto logrado gracias a que, en la investigación, los diferentes tamaños de partícula permiten evidenciar las muestras con mayor o menor presencia de alúmina.

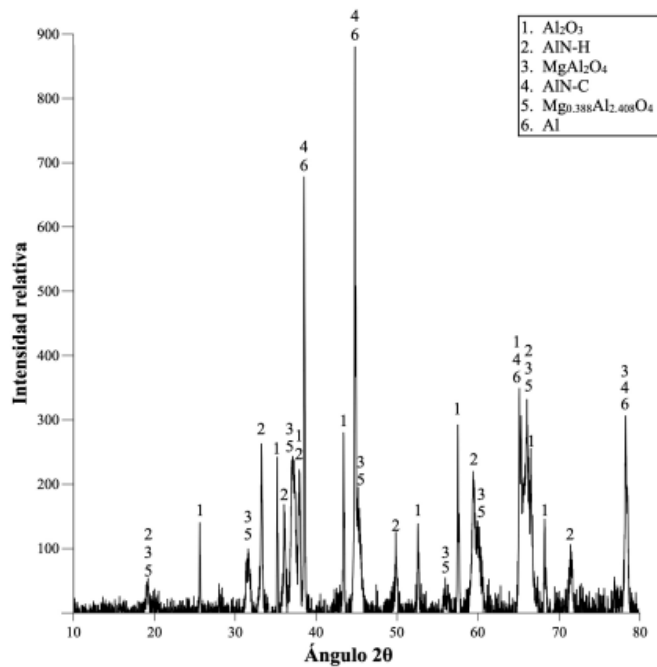


Fig. 1. Diffractograma muestra de escoria de aluminio [3].

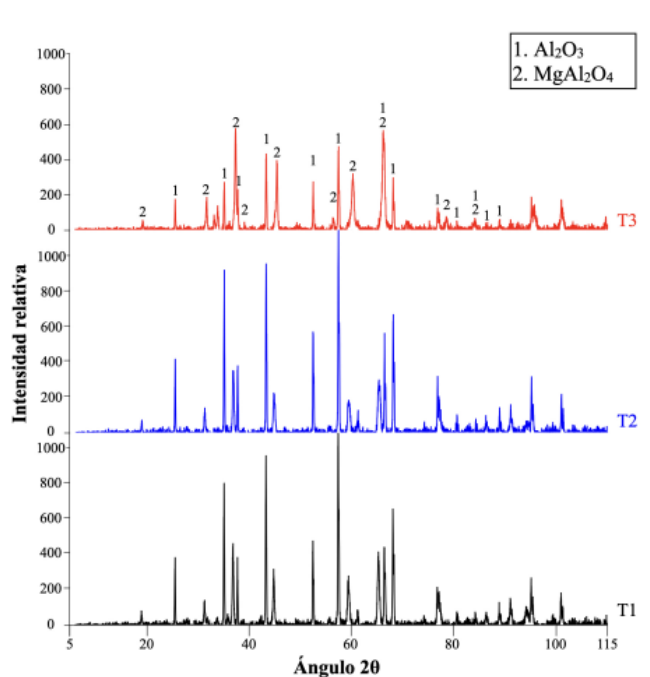


Fig. 2. Diffractograma de tres muestras de diferente tamaño de escoria de aluminio calcinada (alúmina-espínela), T1 escoria menor o igual a 75  $\mu\text{m}$ , T2 escoria mayor a 75  $\mu\text{m}$  y menor a 150  $\mu\text{m}$  y T3 escoria mayor a 150  $\mu\text{m}$  y menor a 300  $\mu\text{m}$  [3].

Ahora bien, en los resultados obtenidos por Orozco y Vega con base en el difractograma, no se cuantifica el porcentaje exacto entre alúmina y espínela de tal manera que permita calcular la eficiencia de la calcinación, por lo que se requiere mayor investigación. Y también se debe tener presente que para calcular la eficiencia por este método que sirva de referencia para un proceso productivo, se deben considerar las pérdidas significativas que existen en los diferentes equipos de molienda, tamizaje y calcinación, que son cantidades que se miden en esta investigación.

Por otro lado, se conoció un método que, a nivel laboratorio, a partir de escoria de aluminio es posible obtener un producto que contenga las fases de alúmina alfa, mullita y jadeíta, por medio de un proceso de lixiviación con 0.5 M NaOH para ajustar el pH, seguido de un proceso de calcinación a 1 200 °C. Sin embargo, los autores recomiendan que, por el consumo energético para la calcinación, consumo de reactivos, el agua requerida y las fases adicionales en el producto calcinado, se considera que no es un método conveniente para aplicarse a mayor escala [4].

Sin embargo, la importancia de la obtención de un alto porcentaje de alúmina, mediante el proceso de calcinación de la escoria de aluminio, es que se presenta una oportunidad en el mercado, dado que la alúmina tradicional extraída de la bauxita es una materia prima ampliamente utilizada en diversas industrias; como por ejemplo el área aeroespacial, automotriz y de construcción, entre otras [5]. Esto gracias a que la alúmina tiene alta resistencia a la compresión, rigidez dieléctrica, dureza, resistencia al choque térmico, resistencia a la abrasión, conductividad térmica, índice de refracción y una importante resistencia eléctrica, incluida cuando se usa a altas temperaturas [6]. Sin embargo, esta materia prima debe ser extraída y es un recurso finito en el medio ambiente, el cual se ha procesado durante el último año a gran escala. De hecho, en Latinoamérica entre julio y agosto del 2022 se produjeron 226 000 toneladas métricas de aluminio en su producción primaria, demostrando que es un mercado muy dinámico y con un alto potencial de oportunidades de mejora [5], [7]. De hecho, como se observa en la figura 3, la producción primaria de este aluminio viene incrementando en Latinoamérica en el último año (desde septiembre del 2021 hasta septiembre de 2022).

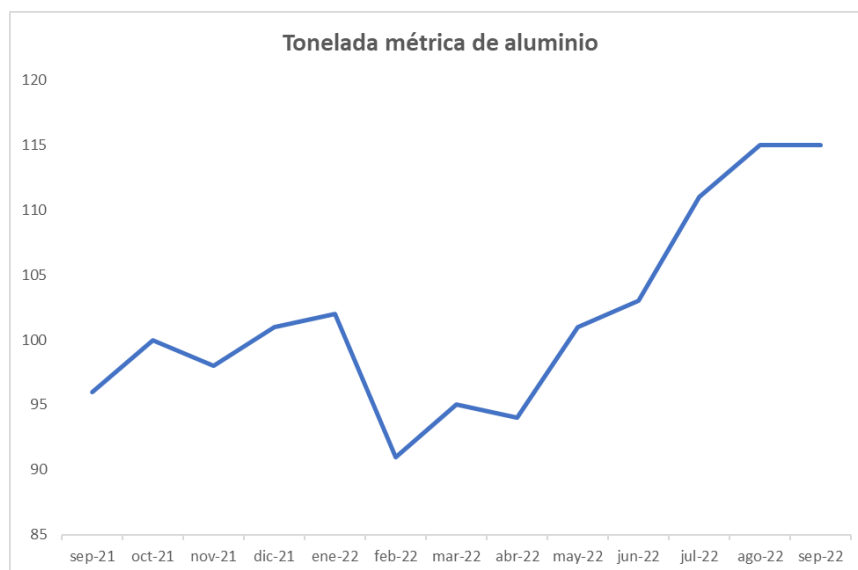


Fig. 3. Toneladas métricas de producción de aluminio en Latinoamérica del septiembre del 2021 a septiembre del 2022[6].

La industria colombiana no produce aluminio primario a partir de bauxita por lo que debe ser importado al igual que la alúmina. En 2020 según el Observatorio de Complejidad Económica (OCE), en Colombia se importó 42,1 millones de aluminio crudo y según el DANE para 2022 hubo un incremento del 7% respecto al año anterior en la fabricación de productos metalúrgicos básicos. En cuanto al departamento del Valle del Cauca en una de las industrias con mayor reconocimiento en el mercado, Alúmina S.A., tan solo en uno de sus procesos productivos hace extrusión de 2 238 toneladas de aluminio cada mes y que sumado al resto de industrias fundidoras, pueden producir cantidades significativamente altas de escoria de aluminio [8]. Cabe resaltar que no se logró encontrar información regional o nacional de la cantidad exacta de alúmina que se produce a partir de aluminio o de otro compuesto.

Es decir que, la recuperación de la alúmina-espínela a través de la calcinación de escoria de aluminio crea la oportunidad de darle valor a un residuo generado en el sector industrial de productos de aluminio del Valle del Cauca, tanto en el ámbito ambiental como económico. En la Resolución 909 de 2008, expedida por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, regula el uso de la alúmina en Colombia. Además, establece los estándares de calidad ambiental para el agua, aire y suelo, y también regula el manejo de residuos peligrosos y sustancias químicas. Específicamente, menciona el tema de la calcinación y secado en la producción de alúmina [9]. Por otro lado, se encuentra la Ley 1333 de 2009 que establece las normas para la prevención y control de la contaminación ambiental [10]. Esta sanciona las infracciones en materia ambiental, por lo que es necesario conocer la afectación contaminante de la escoria de aluminio al subsuelo. Por eso el equipo de trabajo planteó una investigación de la aplicación que tiene este compuesto (alúmina-espínela), que es recuperado de la escoria de aluminio, y se propuso el diseño de un proceso industrial que permite su aprovechamiento [7]. Cabe resaltar que el proyecto se realizó sobre un producto definido por el grupo de trabajo con base en la mencionada investigación.

Además, el aprovechamiento del residuo brinda diferentes beneficios para los sectores industriales que implementen la alúmina-espínela proveniente de la escoria de aluminio, en la fabricación de productos usualmente fabricados con alúmina pura. Sin embargo, cabe resaltar que el primer beneficiado es el medio ambiente, pues en condiciones normales esta escoria es confinada en rellenos sanitarios, generando gases tóxicos y lixiviados que contaminan los afluentes hídricos. No obstante, al reutilizar el material, se puede emplear el concepto de economía circular, donde las empresas que aprovechan la escoria de aluminio podrían tener una fuente de ingreso adicional, ya sea vendiendo la escoria a un tercero o fabricando algún producto derivado de la alúmina-espínela. De esta manera se da un valor agregado a este residuo, pues tiene una ventaja medioambiental por encima de otros productos. Además, las empresas de la industria del aluminio pueden acceder a un beneficio económico potencial puesto que, al utilizar un residuo en la fabricación de nuevos productos, se está disminuyendo la inversión en costos de materia prima, los costos de logística en la adquisición de esta y su debido almacenamiento.

Adicionalmente, dentro de los beneficios para los sectores industriales, por aprovechar y valorar los residuos, se encuentra la oportunidad, dependiendo de los parámetros establecidos por las autoridades ambientales regionales, que puedan posicionarse como Negocios Verdes y Sostenibles en la categoría de Eco-productos Industriales en el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Además de recibir de las autoridades ambientales, según su capacidad, fortalecimiento social-ambiental y económico. El reconocimiento como Negocio Verde le ayuda al Ministerio de Ambiente a alcanzar la meta que se propuso de posicionar 12 630 Negocios Verdes en Colombia dentro del marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible para el 2030 [11].

Cabe resaltar que, dentro de los posibles usos de este material cerámico proveniente de la escoria de aluminio calcinada, se destaca que se mantiene la propiedad de resistencia a altas temperaturas, por lo que puede usarse para aplicaciones industriales como la fabricación de productos refractarios. También, se han encontrado casos donde la alúmina pura (óxido de aluminio) es usada para la fabricación de pinturas aislantes, lijas, piedras esmeriles, vidrios cerámicos y opalizados e incluso puede ser empleada para el servicio de limpieza *sand-blasting*. Esto se menciona debido a que el mercado internacional demanda anualmente entre 500 000 y 1 000 000 de toneladas métricas de alúmina [12].

Con base en la investigación de Orozco y Vega (2022), se concluye que la escoria de aluminio calcinada puede ser aprovechada [3], por lo que, se plantea el diseño de un proceso, disminuyendo la contaminación del medio ambiente y previniendo posibles problemas tanto legales como económicos de las empresas que generan este desecho. La falta de implementación inmediata del proyecto produce que la escoria de aluminio se deseche en rellenos sanitarios. Según la empresa referencia -de la que posteriormente se darán detalles-, el costo de disposición de la escoria de aluminio en los rellenos sanitarios incurre en el costo de transporte desde la empresa al relleno sanitario. Es por ello que la empresa prefiere almacenar la escoria, regalarla o negociarla con un tercero (Véase Anexo 6). Según la Lista Europea de Residuos [13], [14], contenida en el Convenio de Basilea, se clasifica la escoria de aluminio como desecho peligroso debido al posible contacto con la humedad del ambiente o el agua. Esta genera gases tóxicos e incluso lixiviación de sales que contaminan tanto a los mantos acuíferos, como la fauna y flora [15], [16]. Por lo tanto, es importante atender esta problemática diseñando un proceso productivo en el cual se busquen aplicaciones de la alúmina-espínela proveniente de la escoria de aluminio. De lo contrario, las empresas que desechan la escoria de aluminio podrían exponerse a posibles problemas legales por la disposición incorrecta de un residuo que contamina el medio ambiente, además de incumplir con la respectiva normativa de responsabilidad social y de exponer a los empleados a un residuo que puede ser peligroso.

En resumen, existe una oportunidad de mejora en la cual se benefician las empresas que desechan la escoria de aluminio y las empresas que usan la alúmina como materia prima, ya que mediante el proceso de calcinación de esta, se puede dar un nuevo uso a la alúmina-espínela proveniente de la escoria de aluminio, con la finalidad de darle una nueva vida a materiales que ya están circulando en la industria y son desperdiciados, de manera que se aporta a la disminución de la contaminación y de los efectos contraproducentes, generando un aprovechamiento con beneficios económicos, sociales y ambientales que soportan un sistema más sostenible.

Esta oportunidad puede alcanzar a todo el sector fundidor del aluminio, ya que constantemente genera la escoria de aluminio. De hecho, como se evidenció en la entrevista con la empresa referencia (ver Anexo 6) se producen 130 kg de escoria por cada tres toneladas fundidas de aluminio en su producción mensual, lo cual quiere decir que el 4,33% de su producción se convierte en escoria que puede ser usada como materia prima de otros productos, a través del proceso de calcinación, el cual, de acuerdo a la investigación realizada por Orozco y Vega (2022), puede tener un rendimiento entre el 30% y 50%, pues en peso (kg) la escoria no es convertida en su totalidad en el compuesto alúmina-espínela ya que procesos como el macerado, la molienda y los tamizados generan pérdidas [3].

## B. Grupos de interés

Posterior a la identificación del contexto, justificación y alcance del proyecto, es de suma importancia identificar los grupos de interesados en el proyecto, o en su defecto, grupos a los que el proyecto puede llegar a afectar de manera positiva o negativa. La distinción de los grupos de interés tiene un efecto valioso a la hora de encaminar el proyecto hacia un objetivo mucho más claro, puesto que revela cuál es su interés e influencia dentro del proyecto, ayudando a precisar cuáles son las necesidades u oportunidades que este puede generarles, creando así una línea de trabajo más clara para el equipo desarrollador del proyecto. Por ende, se realizó una lluvia de ideas, con el fin de tener un panorama certero de los posibles impactados y afectados por los resultados del proyecto. Posteriormente, se hizo un análisis general que permitiera categorizar por grupos a cada uno de los *stakeholders*, basado en sus posibles intereses en común y su relación con el alcance del proyecto. Así, se logró tener como resultado a cuatro grupos de interés plenamente identificados, englobando los aspectos más específicos de la lluvia de ideas.

En primer lugar, los estudiantes del grupo de Proyecto de Diseño 2022-202, el cual se compone por los estudiantes que llevaron a cabo la evaluación de la oportunidad de un proceso de aprovechamiento de la escoria de aluminio posterior a su calcinación, que es un proyecto que permite aprovechar una oportunidad importante de acumular experiencias académicas constructivas para el futuro profesional. También, logran agregar nuevas líneas de investigación a la formación académica y profesional en complemento a las competencias adquiridas durante la carrera de pregrado de Ingeniería Industrial.

En segundo lugar, las empresas de la industria del aluminio del Valle del Cauca que tienen como materia prima el aluminio y utilizan procesos de transformación como la fundición para la obtención de productos. Estas son empresas con alto interés en la propuesta que se realizó, sin embargo, no tienen un poder relevante dentro de la matriz (véase figura 4) por el hecho de que el desperdicio de la escoria de aluminio aún no se considera como un problema priorizado dentro de las empresas del sector. En su mayoría realizan una mala disposición del residuo, donde se pierden todas las propiedades y el potencial de la alúmina-espínela proveniente de la escoria de aluminio. A raíz de esto, las empresas incurren en costos adicionales, por lo que se crea una oportunidad en la reducción de costos de producción, ya que, con la utilización de la alúmina-espínela, estas empresas tienen una potencial fuente de ingresos. Además, al no estimar esta situación como un problema en la actualidad, el proyecto les presenta una oportunidad en la cual pueden reutilizar un material resultante de sus procesos actuales o venderla a terceros, por lo que las empresas de la industria del aluminio en el Valle del Cauca se verán beneficiadas en los ámbitos del modelo de negocios, sus finanzas y su contribución al medio ambiente.

Otro grupo de interés, son las empresas que usan la alúmina como materia prima en sus procesos productivos. Estas no tienen un notorio interés por cambiar su materia prima por la alúmina-espínela obtenida mediante la calcinación de escoria de aluminio debido a que es un compuesto desconocido que no se ha aprovechado a gran escala. En este sentido, las principales empresas afectadas por la sustitución creada por la alúmina-espínela son las comercializadoras que importan la alúmina en Colombia como Global Link SAS, Soldaduras Industriales SAS y GlassTols que venden la alúmina en diferentes presentaciones de tamaño de partícula, pureza, cantidad, etc. Sin embargo, el uso de la alúmina-espínela, trae impactos positivos como lo son beneficios tributarios, por el hecho de aportar al medio ambiente pues, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, promueve la implementación de organizaciones direccionadas a la acción climática y a la protección del ambiente. Algunos de estos son: un descuento del impuesto sobre la renta por las inversiones en control, conservación y mejoramiento del medio ambiente y exclusiones al IVA para los bienes que se venden en el territorio nacional asociados al desarrollo de actividades que generan impactos

ambientales positivos [17]. También cabe resaltar que la alúmina-espinela obtenida de la escoria de aluminio podría ser de menor costo por provenir de un residuo y podría tener el potencial de emplearse como sustituto de la alúmina pura, según las necesidades y requerimientos de los productos fabricados por estas empresas.

El último grupo de interés se compone por el equipo de investigación de Ingeniería Sísmica y Materiales (SIGMA) de la Pontificia Universidad Javeriana de Cali que está categorizado en el rango A1 del escalafón de investigación definido por el Ministerio de Ciencias de Colombia [18]. Y, a través de este proyecto, se fortalecen o amplían las líneas de investigación alrededor de la escoria de aluminio. Esto con el fin de generar nuevo conocimiento e investigación aplicada, ya que, como grupo de trabajo, se visualizan como líderes nacionales e internacionales en su respectiva línea de investigación, por lo que se afecta positivamente la clasificación en el escalafón de grupos investigativos del Ministerio de Ciencias.

Ahora, posterior a la descripción y posibles afectaciones de los grupos de interés, es menester emplear herramientas de priorización para los grupos identificados, en vista de que estos no tienen el mismo grado de interés, influencia, poder de decisión o urgencia acerca del resultado que el proyecto obtenga. Es entonces como a través de la “Matriz poder vs interés”, se visualiza las relaciones de importancia que tienen los grupos de interés sobre el uso industrial de la alúmina-espinela proveniente de la escoria de aluminio. Esta herramienta de priorización es un apoyo para la ejecución de estrategias que impacten de manera certera a los grupos de interés. La priorización de los cuatro grupos identificados se observa en la figura 4, en donde en el eje horizontal se observa la valoración de escalas de interés y el eje vertical es el poder de influencia que generan los grupos de interés.

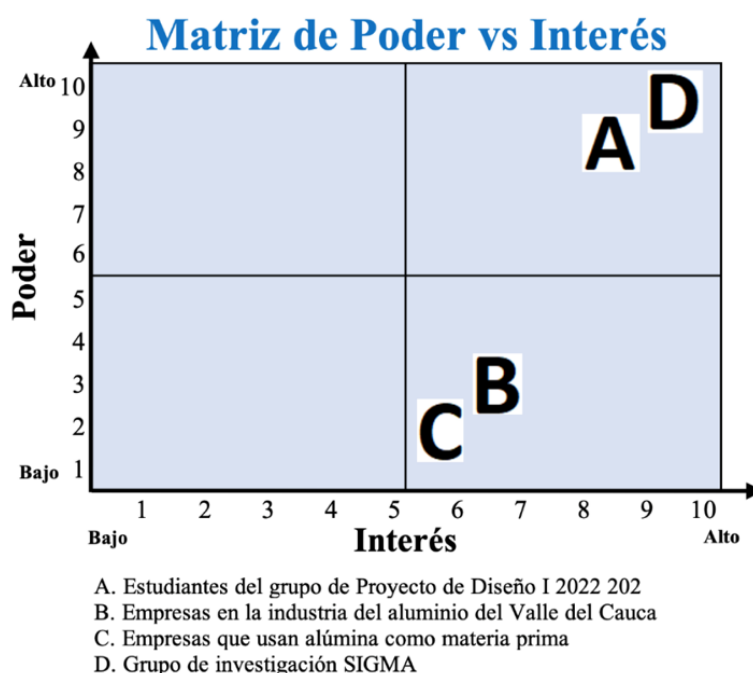


Fig. 4. Matriz de Poder vs Interés de los grupos de interés del proyecto.

El insumo principal para la categorización, priorización y posterior gráfica se genera a través de evaluaciones numéricas que permiten dar una visión más clara de la importancia de cada uno de los grupos de interés dentro de la matriz (ver Anexo 2). Derivado de la figura 4, se pueden resaltar dos grupos de interés que predominan en los ámbitos interés y poder: el grupo de investigación SIGMA y los estudiantes del grupo de Proyecto de Diseño 2022-202, para lo cual se presentan como actores clave dentro del proyecto. En consecuencia, deben ser priorizados de tal forma que se involucren y se gestionen con suficiente cercanía. Por otra parte, el grupo de interesados de empresas, tanto las que tratan aluminio como las que producen con alúmina, presentan un nivel de interés medio-alto, con una diferencia aún mayor con respecto al poder de influencia que ejercen dentro del proyecto, siendo este de baja magnitud. Por consiguiente, a estos dos grupos se les debe mantener informados con respecto a los avances y resultados derivados.

### C. Requerimientos

Una vez identificados los grupos de interés y su prioridad en el desarrollo del proyecto, el grupo de trabajo requiere una identificación de los requerimientos de estos mismos, pues ellos son quienes guían las expectativas del proyecto y hasta dónde se pueden llegar a cumplir dentro del alcance planteado.

Dado el origen de este proyecto, proveniente de estudios realizados previamente por el grupo de investigación SIGMA de la Universidad Javeriana de Cali, se tuvo en cuenta que los grupos de interés provienen de un potencial interés en el caso de las empresas en la industria del

aluminio, dado que ninguna de las productoras de aluminio contactadas por grupo, fueron quienes plantearon la problemática con interés en una solución. Estas empresas que se han planteado con anterioridad en el desarrollo de la priorización de los grupos de interés surgen como potenciales interesados puesto que su papel en la industria les permitiría un beneficio potencial, gracias al desarrollo del proyecto. Es por esto por lo que se realizó una búsqueda de posibles compañías interesadas en el proyecto, entre las empresas de la industria de aluminio del Valle del Cauca; es así como se encontró una empresa ubicada en Juanchito donde gracias a la ayuda del Ingeniero Fernando Saray, dueño de la empresa Tecnikas Saray se logró tener una perspectiva de las expectativas que un empresario de la industria del aluminio puede tener en un proyecto como este. También se logró realizar una visita industrial a la empresa Comelec, en la vía a Yumbo, donde fue posible la visualización del proceso de fundición del aluminio y en donde se hicieron entrevistas para la obtención de información relevante para el proyecto.

Por otro lado, en el caso de las empresas que trabajan con alúmina como materia prima, se lograron dos contactos en dos áreas industriales diferentes. Por un lado, se visitó una empresa dedicada a la venta y distribución de abrasivos “Mundo Abrasivos del Valle Ltda” (ver Anexo 9), donde se evidenció el interés de esta compañía en poder encontrar las mismas cualidades del óxido de aluminio (alúmina) en el material que se les brindará en el desarrollo de este proyecto. Su mayor énfasis yace en que las propiedades físicas del material se asimilen bastante y económicamente sea más favorable. En la otra compañía entrevistada (ver Anexo 14), dedicada al opalizado de vidrios, se pudo ver que la expectativa de los interesados es bastante similar a la primera compañía, pues en “Vidrios Opalizados Ramírez”, la expectativa planteada al grupo de trabajo fue únicamente que el material tuviese las mismas características en cuanto a tamaño de partícula y además fuese lo más similar en efectividad posible. Y para apoyar un poco lo encontrado en estas entrevistas, se realizó una generalización proveniente de la literatura encontrada en las investigaciones previas del proyecto.

Además, en el caso del grupo SIGMA y el grupo 202 del proyecto, se logró recolectar información de manera presencial y directa pues, por un lado, los integrantes del grupo SIGMA son docentes de la facultad que se encuentra a disposición de atender a los estudiantes realizando el Proyecto de Diseño, logrando así una entrevista donde se pudieron apreciar los requisitos de manera exitosa, siendo complementados por la opinión y expectativa del director Mario Muñoz, integrante del grupo de investigación SIGMA (Véase Anexo 4). Y, por otro lado, a través de procesos de comunicación y entendimiento del alcance del proyecto, el mismo grupo 202-202 logró plantear cuales requerimientos se tienen en el desarrollo de este.

TABLA I.

REQUERIMIENTOS DE LOS GRUPOS DE INTERÉS

GRUPOS DE INTERÉS	VoC (REQUISITOS GRUPOS DE INTERÉS)	RESTRICCIONES DE DISEÑO	ESPECIFICACIONES DE DISEÑO	LEYES, NORMAS Y ESTÁNDARES	
				Legislación y Requisitos Aplicables	Importancia o Efecto
Grupo de investigación SIGMA	Generar alternativas de aprovechamiento de la alúmina-espínela proveniente de la escoria de aluminio, que permita dar valor agregado al material y que aporten a la reducción de los efectos ambientales en los diversos sistemas productivos. (Ver Anexo 4)	Falta de información acerca del funcionamiento de los sistemas productivos sostenibles, debido a la falta de disposición y gestión de las empresas en prácticas de sostenibilidad.	El proyecto debe estar orientado a las líneas de investigación que conserva el grupo SIGMA. En este caso, el enfoque del proyecto debe reconocer una alternativa de aplicación industrial factible y sostenible de un material (alúmina).	Decisión 486 de 2000 de la Comunidad Andina [19].	Protege a las personas naturales en forma de inventores como reconocimiento a la inversión y el esfuerzo realizado por este para lograr una solución técnica que aporte a la humanidad, dando el derecho de explotación del invento durante 20 años [19], [20], los inventos están relacionado a la propiedad industrial.
		Escasez de empresas que presenten interés o necesidad ante la línea de investigación del proyecto.	Reconocer adecuadamente la oportunidad enfocada al funcionamiento del sistema productivo y su impacto, a través de hechos, datos y evidencias.	Cronograma de actividades de laboratorio.	Permite identificar horarios óptimos de asistencia a los laboratorios para la investigación práctica, con la respectiva disponibilidad de equipos, equipos de protección y profesor encargado.

		Insuficiencia de herramientas y/o tiempo disponible de laboratorios para el desarrollo óptimo de las actividades o procesos necesarios. Escasez de cantidad de equipos de protección personal en trabajos prácticos de laboratorio.		Póliza estudiantil contra todo riesgo (accidentes dentro del campus).	Protege a los estudiantes contra los riesgos derivados de las prácticas dentro de los laboratorios.
Estudiantes del grupo de Proyecto de Diseño 2022-202	El grupo requiere acceso a los repositorios y a bases de datos para la investigación del proyecto. También requiere la disponibilidad de las empresas en la industria del aluminio para la recolección de la escoria de aluminio.	Baja disponibilidad del profesor Mario Muñoz como orientador en el laboratorio de ingeniería mecánica e ingeniería civil de la Universidad Javeriana Cali.	Contar con más de 60 kg de escoria de aluminio para realizar los experimentos en el laboratorio.	Decisión 486 de 2000 de la Comunidad Andina [19], [20].	La patente protege el producto para que pueda ser explotado comercialmente por los autores si lo desean, mientras ellos son acreditados con el respectivo mérito [19], [20].
	El grupo de Proyecto de Diseño requiere que, tanto el proceso de recuperación del componente alúmina-espínela como el proceso productivo, sea viable económicamente y compita en el mercado.	Poca información sobre la cantidad de escoria total producida por la industria de aluminio.	El reposo de la escoria de aluminio sumergida en agua debe ser de mínimo una semana para liberar todo el gas de amoníaco.	Comité de ética reglamentado por la Pontificia Universidad Javeriana Cali [21].	El comité de ética introyecta los principios y valores Javerianos [21].
			Calcinar a 1 200°C para la obtención de la alúmina-espínela.		
			Moler y alcanzar una granulometría entre 75 y 300 µm.		
		Costo de proceso de recuperación de alúmina proveniente de escoria de aluminio menor o igual al costo de alúmina pura comercial.			
		Costo de proceso de producción del producto elegido menor o igual al costo de la competencia.			
		Porcentaje de pureza de alúmina-espínela superior al 90%.			
Empresas en la industria del aluminio del Valle del Cauca	Funcionalidad del producto al cual se le hará el diseño en este proyecto.	En la primera etapa del proyecto, la falta de información necesaria para la toma de la decisión del producto a diseñar es una restricción. Se dificulta la búsqueda de información sobre los componentes y materiales requeridos para la fabricación del respectivo producto a diseñar.	El producto deberá cumplir con las especificaciones que normalmente el mercado exige.	Especificaciones del producto en el mercado.	Son útiles para el proyecto, para así poder conocer que aspectos son importantes para el cliente que exige este producto en el mercado y así cumplir a cabalidad con estos aspectos.
	Aprovechar el mayor porcentaje de alúmina-espínela después de la segunda molienda.				
Empresas en la industria del aluminio del Valle del Cauca	La empresa entrevistada en representación de las empresas productoras de productos de aluminio metálico requiere que los	Escasez de las empresas referencia para realizar visitas de campo que le permitan al equipo de trabajo una recolección tanto de datos como de materiales, en este caso	La empresa referencia debe proveer al menos 60 kg de escoria de aluminio para la realización de la calcinación en los laboratorios de la universidad.	ARL de los estudiantes integrantes del grupo 2022-202.	La ARL provee la posibilidad de la realización de visitas a la empresa de parte del equipo de trabajo, de manera segura y legal.

	resultados entregados en el proyecto permitan una recuperación de la escoria de aluminio que está siendo desechada en la actualidad (Ver Anexo 5).	la escoria de aluminio que será procesada.	Recuperación al 90% de un material con alto porcentaje de alúmina, proveniente de la escoria de aluminio proporcionada por la empresa.	Cronograma de actividades.	El cronograma provee un orden y obligación del cumplimiento de las actividades planeadas, de parte de la empresa y los estudiantes del grupo de proyecto.
Empresas del Valle del Cauca que usan alúmina para hacer sus productos.	Las empresas fabricantes de productos o empresas de servicios que emplean la alúmina como materia prima. Estas requieren que el proyecto demuestre que la alúmina obtenida a partir de la escoria de aluminio no pierda sus propiedades físicas de interés y se puede usar como la alúmina obtenida de la bauxita (pura).	Carencia de algunos equipos para realizar las pruebas de calidad de la alúmina obtenida a partir de la escoria de aluminio.	Obtención de una alúmina proveniente de la escoria de aluminio mediante el proceso de calcinación, que tenga las mismas propiedades físicas de interés que la alúmina actualmente empleada en sus procesos productivos. Las propiedades requeridas por las diferentes empresas se deben mantener de igual manera o lo más similar posible a cuando se usa alúmina comercial.  Precio de adquisición de la alúmina-espínela inferior o igual al de la alúmina comercial (óxido de aluminio)	Beneficios tributarios por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [17].	Aclarar a las empresas que podrían tener descuentos sobre el Impuesto de Renta y/o exclusiones al IVA con el aval del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [17].
				Acuerdo de confidencialidad y no divulgación de la información (de ser solicitado por la empresa)	En caso de que la empresa necesite mantener su información protegida, se establecerán los términos y condiciones que regulan el intercambio de información.
				ARL vigente de los estudiantes del grupo 2022-202.	En caso de tener la oportunidad de asistir a la empresa y conocer el proceso al cual se somete la alúmina.

## II. MEDIR

### A. Plan de recolección de datos

Como se ha dicho anteriormente, este proyecto buscó diseñar un proceso en el cual se emplee la alúmina-espínela proveniente de la escoria de aluminio obtenida mediante calcinación, aprovechando este residuo, dándole un valor agregado y aumentando su vida útil. Es por esto que se realizó un plan de recolección de datos (PRD) como se puede observar en el Anexo 7, con el propósito de organizar, recolectar y analizar la información de manera que se pueda cuantificar la oportunidad del proyecto. El plan de recolección de datos consiste en describir la secuencia a seguir en la operación de obtención estadística de datos, lo que contribuye a la generación de una metodología estandarizada para recoger información. Mediante este plan se elaboran, disponen y desarrollan los documentos y herramientas necesarias establecidas dentro del proyecto [3], [22].

Además, se definió que el proyecto es un estudio de tipo exploratorio, porque se trata de la búsqueda de una oportunidad en la cual aún no hay suficiente profundidad en las investigaciones y/o estudios previos, acerca de la generación de posibles aplicaciones de la alúmina-espínela proveniente de la escoria de aluminio. En cuanto a los métodos de investigación, se encuentran: observación, inducción, deducción y análisis; de los cuales se definió que el método para este proyecto debe ser la observación. Esto se debe a que la observación del fenómeno de la extracción de la escoria de aluminio al finalizar el proceso de fundición de este y su posterior etapa de manipulación (hecha por el equipo de trabajo), permite tomar y registrar información, la cual, facilita el análisis de los datos recolectados para el enfoque de la oportunidad presentada en el proyecto [23].

Dicho lo anterior, es esencial tomar una decisión en cuanto a las fuentes, técnicas y procedimientos a llevar a cabo en la recolección de datos. Como se trata de un proyecto de tipo exploratorio, se evaluó una oportunidad operativa de un residuo industrial que, a nivel empresarial, no tiene suficiente información sobre el posible procesamiento de la escoria de aluminio y la alúmina-espínela proveniente de la misma. Por lo cual, se considera una oportunidad no sólo dentro de la industria que funde el aluminio, sino también en las industrias donde se emplea el óxido de aluminio o alúmina.

La fuente primaria para la recolección de información proviene de los requisitos expuestos por los grupos de interés, ya que arrojan la posibilidad de medir cuantitativamente los requerimientos con el objetivo de verificar el cumplimiento de la propuesta. En primer lugar, se define como una fuente primaria de información a las entrevistas realizadas en la empresa referencia -que en este caso será una muestra de las empresas de este sector productivo-. En Comelec, ubicada en el Valle del Cauca, se recolectaron los datos de generación diaria de escoria de aluminio según la cantidad de aluminio fundido. Además, se obtuvo información sobre la disposición de este residuo, donde se menciona que es difícil deshacerse de él sin afectar al medio ambiente, ya que desconocen sus posibles usos (Ver Anexo 6). Otra fuente definida en la recolección de información son las mediciones y datos experimentales de la manipulación y calcinación de la escoria de aluminio, siendo este residuo suministrado por la mencionada empresa. Esta información se toma de las pruebas de laboratorio en la Universidad Javeriana de Cali y se procede a realizar un análisis de las propiedades físicas de interés apoyado en la experimentación previa realizada por Orozco y Vega (2022), además de la oportunidad de determinar los costos de manipulación.

Así mismo, se recolectaron datos a través de fuentes de información secundarias como libros, revistas, artículos científicos, conferencias, entre otros. Teniendo en cuenta las características exploratorias del proyecto, se recopilan datos relacionados principalmente con los costos de materiales o productos terminados que emplean la alúmina pura como materia prima. Esto sirve principalmente para comparar y analizar si el proceso desarrollado con este proyecto es económicamente factible frente a los procesos actuales dentro de esta industria. Adicionalmente, se soporta en la literatura, obtenida en trabajos de grado anteriores enfocadas en esta línea de investigación, proporcionados por el grupo SIGMA de la Pontificia Universidad Javeriana sede Cali.

Por último, se determina la especificación de las variables a medir, justificado en cada requisito principal de los grupos de interés. También se identifican y definen los indicadores de desempeño o KPI's, que su objetivo es verificar el cumplimiento y ejecución del proyecto en la etapa de diseño (ver Anexo 7). A continuación, se presenta la Tabla II en donde se encuentran los indicadores de desempeño a medir de manera que se cuantifican los resultados del proyecto.

TABLA II.

INDICADORES DE DESEMPEÑO A MEDIR

Variable	Objetivo	Descripción	Indicador
Cantidad de alúmina-espínela aprovechada de la escoria de aluminio.	Conocer la cantidad de escoria de aluminio disponible a nivel regional, para ser usada en el diseño de un proceso industrial.	Se realiza el pesaje de los kilogramos de alúmina-espínela aprovechada y recuperada de la calcinación y molienda, hecha en el laboratorio de la universidad.	Porcentaje de alúmina-espínela aprovechada.  $\%alúmina - espínela \text{ aprovechada} = \frac{Kg \text{ de alúmina} - espínela \text{ aprovechada}}{Kg \text{ de escoria de aluminio generada}} * 100$
Tamaño de partícula de alúmina-espínela después de la calcinación y molienda.	Estudiar el efecto que tiene el tamaño de partícula en el desempeño del producto a fabricar.	La granulometría de la muestra de alúmina-espínela aprovechada de la escoria de aluminio se realiza mediante el tamizado en el laboratorio de suelos de la universidad y se estima su desempeño en el proceso productivo.	Porcentaje de tamaños de partícula medido en micras ( $\mu m$ ) según el número de tamiz y la abertura de malla elegido. Se debe pesar el contenido de las mallas del juego de tamices para conocer el porcentaje de alúmina-espínela según el tamaño de partícula.  $\%alúmina - espínela T_x = \frac{Peso \text{ malla No. } y}{Peso \text{ Total}} * 100$ <p>Donde x es de tamaño de partícula y donde y es la malla por usar. Malla No. 60 (250 <math>\mu m</math>) <math>\geq</math> X <math>\geq</math> Malla No. 200 (75 <math>\mu m</math>)</p>
Costo de proceso de recuperación de alúmina-espínela proveniente de la escoria de aluminio.	Identificar si el proceso de recuperación de alúmina-espínela es factible y puede competir en el mercado.	Al finalizar el proceso de recuperación de alúmina-espínela se determinará el costo en pesos colombianos.	Costo por kilogramo del proceso de recuperación de la alúmina-espínela.

Costo del proceso de producción del producto a base del compuesto alúmina-espínela.	Identificar si la producción del producto a base del componente alúmina-espínela es factible económicamente y compite en el mercado.	Al final del proceso de recuperación de la alúmina-espínela proveniente de la escoria de aluminio, se determinará el costo de este en pesos colombianos, hecho en el laboratorio de la universidad.	Costo por unidad de proceso de producción del producto a base del componente alúmina-espínela.
Rugosidad del producto prototipo.	Medir la rugosidad del producto realizado con el compuesto alúmina-espínela y compararlo con la rugosidad del producto original realizado con óxido de aluminio comercial (alúmina) para determinar la similitud entre los productos y el rendimiento que tiene la alúmina-espínela en ese proceso.	Se realizará la medición de la rugosidad en el prototipo con alúmina-espínela y en el producto hecho con óxido de aluminio para la comparación de dichos valores. Esta medición se hará utilizando un microscopio 3D para encontrar los valores de Ra (rugosidad media aritmética) y de Rz (amplitud media de la rugosidad)	Porcentaje (%) de diferencia entre la rugosidad del prototipo y la rugosidad del producto comercial:  $\text{Porcentaje de diferencia de rugosidad} = \frac{\text{Rugosidad del producto con óxido de aluminio} - \text{Rugosidad con alúmina espínela}}{\text{Rugosidad del producto con óxido de aluminio}} * 100$

### B. Exploración de mercado

Se realiza una búsqueda de información con la finalidad de medir la actualidad de las variables encontradas en el plan de recolección de datos y así poder sintetizar la información. Esto, a través de la búsqueda en la literatura, información de la empresa referencia e investigaciones realizadas previamente en la Universidad Javeriana Cali por el grupo SIGMA, -uno de los grupos de interés del proyecto-.

Como se ha mencionado anteriormente, este proyecto diseñó un proceso donde la alúmina-espínela recuperada de la escoria de aluminio se implementó en una aplicación industrial. Esto quiere decir que el proyecto diseñó el proceso de un producto elaborado con materia prima proveniente del residuo (escoria de aluminio), gracias a la implementación de la calcinación, la cual realizó el grupo 202, bajo los parámetros establecidos por Orozco y Vega (2022) y algunas mejoras que se encontraron durante el proceso, con la finalidad de tener la materia prima alúmina-espínela.

La escoria de aluminio debe ser calcinada para conseguir este compuesto de interés del proyecto, es decir, la alúmina-espínela. Para su realización, primeramente, se recolectó la escoria de aluminio generada por una empresa referencia mencionada anteriormente. En esta recolección, se encontró que la escoria debía ser tratada de una manera específica, puesto que dada las condiciones de almacenamiento y tratado que se le ha dado en la empresa Comelec, la escoria necesita de un proceso de apagado (lavado) con agua para promover la liberación controlada de los gases de amoníaco, resultantes de la reacción de los nitruros de aluminio (AlN), presentes en la escoria, con el agua puesto que este gas es tóxico y contaminante, por lo que se requiere este paso para la manipulación correcta de la escoria de aluminio. Además, una vez la escoria se encuentra libre de nitruros de aluminio, el equipo realizó la molienda y calcinación a través del proceso mostrado en la figura 5 como se puede observar a continuación.

S	I	P	O	C
Proveedores	Entradas	Proceso	Salidas	Clientes
Empresa referencia (Colmelec)	Escoria de aluminio	Lavado	Escoria libre de amoníaco	Grupo 202
Universidad Javeriana Cali	Agua			
Grupo 202	Escoria libre de amoníaco	Secado	Escoria seca	Grupo 202
Grupo 202	Escoria seca	Molienda	Escoria de aluminio con diferentes tamaños de partícula	Grupo 202
Grupo 202	Escoria de aluminio con diferentes tamaños de partícula	Tamizado	Escoria de aluminio con el tamaño de partícula buscado (<150 μm)	Grupo 202
Grupo 202	Escoria de aluminio con el tamaño de partícula buscado (<150 μm)	Calcinación	Compuesto de alúmina-espínela	Grupo 202
Grupo 202	Compuesto de alúmina-espínela	Molienda	Alúmina-espínela con los 3 tamaños de partícula diferentes a evaluar en la utilización del producto	Proceso a diseñar por el equipo 202 del producto a seleccionar

Fig. 5. SIPOC del proceso de recuperación de alúmina-espínela.

Sin embargo, este proceso desarrollado en el SIPOC evidencia solamente los materiales requeridos para la obtención de la materia prima necesaria para el diseño del proceso productivo de este proyecto; para visualizar con mayor facilidad la toma de decisiones a lo largo de este proceso y algunos puntos clave, se expone a continuación el diagrama de flujo de la recuperación de la alúmina-espínela en la figura 6.

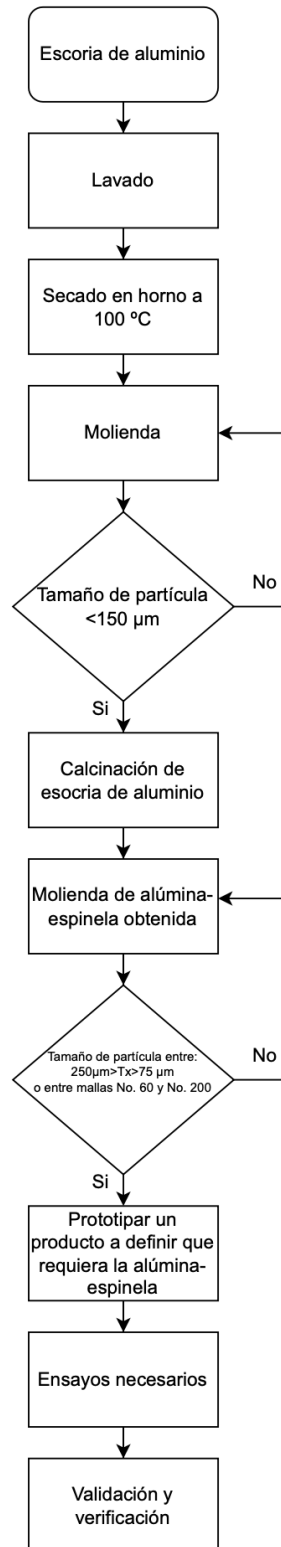


Fig. 6. Diagrama de Flujo de Proceso Actual de la recuperación de Alúmina-Espínela para el diseño del producto a definir.

Cabe mencionar que el lavado o saturado de la escoria de aluminio puede tardar varios días, dependiendo de la cantidad de nitruros de aluminio generados durante el proceso de fundición del aluminio. El lavado realizado sobre la escoria de aluminio proporcionada por la empresa Comelec, tomó tres semanas y se realizó sumergiendo la escoria en agua hasta que la producción de gases se detuviera (eliminación de la generación de burbujas), esto se verificó de forma visual. Posteriormente, la escoria se sometió a un proceso de secado a 110°C durante 48 horas. En el caso de este proyecto, el cálculo de la liberación de amoníaco no se realiza, sino que se toma de la literatura obtenida de Orozco y Vega. Posteriormente se realizó un proceso de molienda con el fin de que el tamaño de partícula fuese menor a 150 micrómetros para proceder a la calcinación de la escoria de aluminio en una mufla marca Terrígeno modelo D8 donde se programó para un ciclo de cuatro horas para llegar a una temperatura de 1 100 °C. Una vez finaliza la calcinación, el producto es un compuesto alúmina-espínela. Sin embargo, como al calentar el producto en el horno se genera una compactación por sinterizado del material, es necesario volver a moler de manera que se obtendrá alúmina-espínela con tamaño de partícula dentro del siguiente rango:  $75 \mu\text{m} \leq \text{tamaño de partícula de toda la muestra} \leq 250 \mu\text{m}$ .

Posterior a la identificación del proceso necesario para recuperar la alúmina-espínela es importante hacer un análisis de las fortalezas, debilidades, amenazas y oportunidades que se presentan en el proyecto. Por lo cual, se tuvo en cuenta en análisis de PESTEL para realizar un diagrama donde se vieran los mismos aspectos de este, pero con características internas y externas del proyecto para generar una guía clara de las necesidades que el equipo presentará a lo largo del desarrollo de este proyecto. En la figura 7, se explican los puntos donde son expuestos los aspectos que afectan al desarrollo de este proyecto en diferentes ámbitos como lo es el social, político y el económico.

<b>P</b>	<b>E</b>	<b>S</b>	<b>T</b>	<b>E</b>	<b>L</b>
<b>Político</b>	<b>Económico</b>	<b>Social</b>	<b>Tecnológico</b>	<b>Ecológico</b>	<b>Legal</b>
<b>Favorable</b>					
Incentivo tributario como el descuento del Impuesto sobre la Renta por las inversiones en control, conservación y mejoramiento del medio ambiente.	Inclusión de modelo empresarial circular en lugar de lineal	Cambio de pensamiento social acerca del impacto de los procesos productivos para con el medio ambiente	Uso de artefactos tecnológicos para tratamiento de residuos	Aumento de procesos productivos sostenibles en la industria Vallecaucana	Normativa de control, gestión y tratamiento de residuos como materia prima, por parte de las entidades de control ambiental (Minambiente, DAGMA)
			Desarrollo de tecnologías aplicables para las empresas del Valle del Cauca que busquen aplicar esta alternativa	Tendencia creciente hacia mercados más ecológicos	
	Impacto positivo en el desarrollo económico por el aprovechamiento de residuos industriales	Consciencia ambiental para las empresas del Valle del Cauca	Distintos mercados de la industria hacen uso de alúmina pura como materia prima en sus procesos productivos	Disminución de la contaminación de vertederos por causa de residuos tóxicos causados del proceso de fundición de aluminio	
<b>Desfavorable</b>					
	El diseño de un proceso para un producto de alúmina-espínela genera un costo elevado por el consumo energético del proceso de calcinación	Baja motivación de parte de las fundidoras por implementar tecnologías de aprovechamiento de residuos	El producto por seleccionar requiere de instrumentos y herramientas específicas para el diseño de su proceso productivo	Se requiere de un largo periodo de tiempo y altas temperaturas de ambiente para la evaporación absoluta del amoníaco contenido en la escoria de aluminio	
		Poca demanda de productos sostenibles debido a los costos			

Fig. 7. Diagrama de aspectos externos e internos para el desarrollo del proyecto.

Una vez, encontrados estos aspectos en la figura 7, se plantean las diferentes estrategias del grupo para el proyecto. Pues, con la matriz DOFA se tienen planteados los aspectos internos y externos del proyecto a través de oportunidades, amenazas, fortalezas y debilidades que generan la ruta a seguir para evitar inconvenientes y potencializar los aspectos positivos de la oportunidad evaluada a lo largo del documento. Este análisis, se puede evidenciar en la figura 8 a continuación.

<b>Matriz DOFA</b>	<b>Oportunidades</b>	<b>Amenazas</b>
	O1 Cambio de modelo empresarial de economía lineal a economía circular.	A1 Normativa para la gestión y utilización de residuos como materia prima.
	O2 Disminución de la contaminación en los vertederos a causa de los residuos de las fundidoras de aluminio.	
	O3 Aprovechamiento de la alúmina contenida en la escoria de aluminio.	
	O4 Planteamiento de un proceso para la producción de un producto para la industria.	A2 Poca demanda de productos sostenibles en comparación con los productos de materia prima proveniente de la extracción.
	O5 Desarrollo de tecnologías aplicables y asequibles para las empresas.	
	O6 Varios mercados de la industria podrían implementar la alúmina-espínela en reemplazo de la alúmina comercial.	
<b>Fortalezas</b>	<b>Estrategias de ataque</b>	<b>Estrategias de defensa</b>
F1 Una propuesta de economía circular va acorde a los Objetivos de Desarrollo Sostenibles que Colombia busca cumplir.	Diseño de un proceso productivo que evidencie la economía circular de acuerdo con los objetivos de desarrollo sostenible.	Propuesta atractiva para los diferentes mercados del respectivo producto a seleccionar para el diseño.
F2 Incentivos tributarios a empresas verdes.	Desarrollo de un modelo circular para la demostración de la utilización de la escoria de aluminio en el proceso de realización de un producto.	Evaluación de costos del proceso a proponer vs los incentivos tributarios, para evaluar si los incentivos cubren estos costos.
<b>Debilidades</b>	<b>Estrategias de refuerzo</b>	<b>Estrategias de retirada</b>
D1 Baja motivación de parte de las fundidoras por implementar tecnologías de aprovechamiento de residuos.	Enfoque sostenible y de economía circular en el proceso de producción para incentivar el uso de nuevas tecnologías.	Disminuir el uso de energías tradicionales en la implementación del proceso a plantear.

D2 Proceso requiere de un alto consumo energético que genera altos costos.		
--	--	--

Fig. 8. Matriz DOFA

Por otro lado, con los requerimientos de los grupos de interés de la Tabla I y con las variables definidas en el Plan de Recolección de datos (Ver Anexo 7) se definen en la Tabla III los KPI's en el estado actual para cuantificar, ejecutar y controlar el diseño del proceso de este proyecto y alcanzar, en la medida de lo posible las metas propuestas.

TABLA III.

RESULTADOS DE INDICADORES DE DESEMPEÑO

Variable	Indicadores	Actualidad	Meta												
Cantidad de alúmina-espínela aprovechada de la escoria de aluminio.	Porcentaje (%) de alúmina-espínela aprovechada después de la calcinación y la segunda molienda.	Aprovechamiento del 51,9% de partículas menores o iguales a 250 $\mu\text{m}$ [3].	>80% acordado entre el grupo de trabajo y el director para minimizar desperdicios del proceso de producción y reducir costos del producto escogido.												
Tamaño de partícula de alúmina-espínela después de la calcinación y molienda.	Porcentaje de tamaños de partícula medido en micras ( $\mu\text{m}$ ) según el número de tamiz y la abertura de malla elegido.	Con una muestra de escoria con partículas de igual o menor tamaño que 75 $\mu\text{m}$ después de calcar y moler se obtienen los tamaños de partícula (x): <table border="1" data-bbox="824 888 1174 1045"> <thead> <tr> <th>Tamaño partícula</th> <th>%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>75 <math>\mu\text{m}</math> &gt; x</td> <td>23,4%</td> </tr> <tr> <td>150 <math>\mu\text{m}</math> &gt; x &gt; 75 <math>\mu\text{m}</math></td> <td>47,9%</td> </tr> <tr> <td>180 <math>\mu\text{m}</math> &gt; x &gt; 150 <math>\mu\text{m}</math></td> <td>11,6%</td> </tr> <tr> <td>250 <math>\mu\text{m}</math> &gt; x &gt; 180 <math>\mu\text{m}</math></td> <td>10,5%</td> </tr> <tr> <td>x &gt; 250 <math>\mu\text{m}</math></td> <td>6,5%</td> </tr> </tbody> </table>	Tamaño partícula	%	75 $\mu\text{m}$ > x	23,4%	150 $\mu\text{m}$ > x > 75 $\mu\text{m}$	47,9%	180 $\mu\text{m}$ > x > 150 $\mu\text{m}$	11,6%	250 $\mu\text{m}$ > x > 180 $\mu\text{m}$	10,5%	x > 250 $\mu\text{m}$	6,5%	Tamaño de partícula que mejore la funcionalidad del producto escogido por medio de ensayos de laboratorio.
Tamaño partícula	%														
75 $\mu\text{m}$ > x	23,4%														
150 $\mu\text{m}$ > x > 75 $\mu\text{m}$	47,9%														
180 $\mu\text{m}$ > x > 150 $\mu\text{m}$	11,6%														
250 $\mu\text{m}$ > x > 180 $\mu\text{m}$	10,5%														
x > 250 $\mu\text{m}$	6,5%														
Costo de proceso de recuperación de alúmina-espínela proveniente de la escoria de aluminio.	\$ / Kg - \$ / Tonelada	No existe. El grupo de trabajo debe realizar las estimaciones de los costos como parte del proyecto.	Costo de procesamiento de alúmina-espínela inferior a \$17 600 COP bolsa de 500 g de 50 micrones al 99,78% de pureza [24].												
Costo del proceso de producción del producto a base del compuesto alúmina-espínela.	\$ / Unidad - \$ / Litro - \$ / Kg (Este indicador depende del producto a seleccionar en la etapa Analizar)	No existe. El grupo de trabajo debe realizar las estimaciones de los costos como parte del proyecto.	Costo del producto propuesto inferior al costo de otros productos del mercado (\$/unidad) (\$/litro) (\$/Kg).												
Rugosidad del producto prototipo	Porcentaje (%) de diferencia entre la rugosidad del prototipo y la rugosidad del producto comercial	No existe. El grupo de trabajo debe realizar las estimaciones de la rugosidad del producto como parte del proyecto.	Debe ser menor al 20%												

### III. ANALIZAR

#### A. Análisis de Oportunidad

El tamaño del mercado global de alúmina se estimó en más de USD 40 000 millones en 2020 y se prevé que incremente a una tasa de crecimiento anual compuesta (CAGR) del 4,7 % entre 2021 y 2028. Esto, debido a la creciente demanda de las diferentes industrias como la automotriz y la construcción, en materiales más livianos con propiedades de calidad como la alta durabilidad, baja radiación de calor y alta resistencia a temperaturas elevadas, haciendo que el óxido de aluminio (alúmina), se destaque por sus características similares. Pues, este material, generalmente producido a partir de la bauxita puede ser utilizado en diferentes aplicaciones de la ingeniería como en materiales anticorrosión, piezas resistentes al desgaste y la abrasión, industria electrónica, etc. [25]. Sin embargo, cabe aclarar que la importancia de este mercado para el diseño del proceso productivo, que se aborda en este trabajo, radica en la obtención de la materia prima (alúmina-espínela) proveniente de los procesos de fundición de aluminio, pues la propuesta yace de la obtención de escoria de aluminio de las empresas

vallecaucanas fundidoras. Por lo cual, es necesario entender el comportamiento de este mercado para así conocer la disponibilidad de la escoria en un futuro cercano y apreciar la oportunidad en la cual vive este proyecto.

De acuerdo con lo anterior, Allied Market Research publicó un pronóstico de crecimiento de la industria del aluminio, realizado hasta el año 2031, como se observa en la figura 9. El gráfico de área que permite apreciar mejor la magnitud de las tendencias, donde se prevé que esta industria seguirá aumentando su participación en un periodo de 10 años para todas las diferentes industrias donde genera productos o subproductos. De hecho, tendrá un mayor impacto en los métodos de transporte puesto que el segmento de transporte representó alrededor del 32% de la cuota de mercado mundial del aluminio en 2021 debido a que más personas en todo el mundo conducen vehículos motorizados. Por lo tanto, también se espera que el crecimiento de la industria del transporte mundial impulse el crecimiento de la industria mundial del aluminio a lo largo del periodo pronosticado [26].

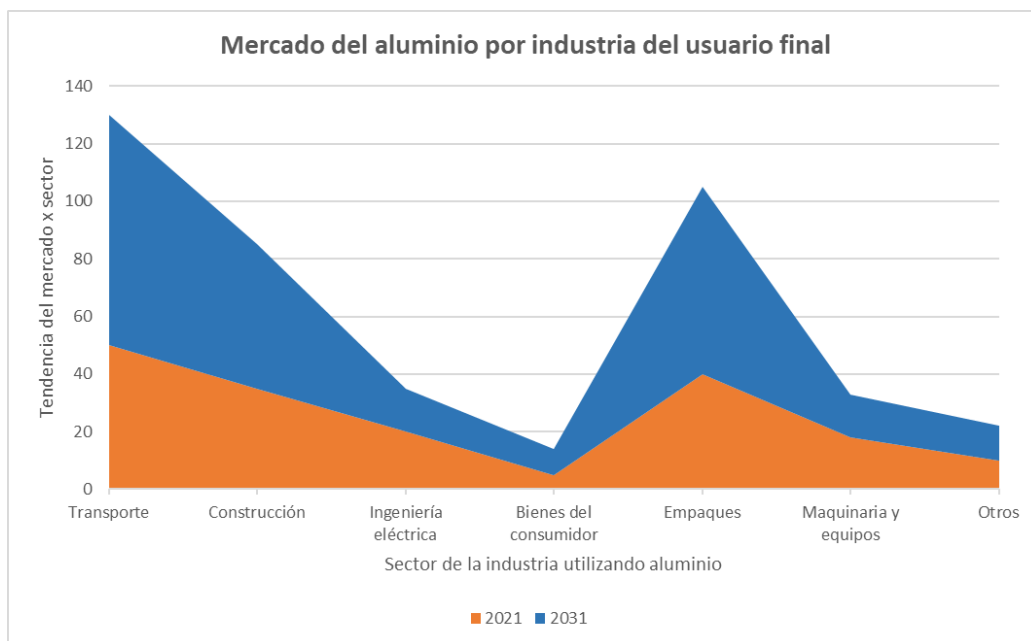


Fig. 9. Pronóstico del mercado del aluminio por industria del usuario final para 2031 [26].

Sin embargo, este gran crecimiento que se espera en la industria del aluminio se evalúa en comparación con el mercado de la alúmina, donde los diferentes productos de alúmina pura han identificado una restricción en la industria. Pues, las fluctuaciones en los precios de las materias primas utilizadas en la producción de alúmina de alta pureza generan alteraciones en el costo de las materias primas, provocando así que las empresas dedicadas a la producción de óxido de aluminio (alúmina) vean alteraciones en los márgenes de utilidad, por lo cual nace la oportunidad de una obtención de esta materia prima a través de otros métodos, como lo es la calcinación de la escoria de aluminio que permite el uso de un material ya existente en el mercado y sin fluctuaciones en los costos [27].

Una vez comprendido el comportamiento del mercado y la oportunidad evaluada en este proyecto, se hace uso del diagrama de Ishikawa, también llamado diagrama de cola de pescado, con la finalidad de comprender los aspectos más importantes para el diseño de proceso productivo a desarrollar.

La construcción de este diagrama se realizó haciendo una búsqueda de aspectos esenciales para el diseño de un producto a base de un material reciclado en distintas fuentes de literatura. Además, se logró comparar si estos aspectos son realmente importantes para los empresarios del mercado de la alúmina, pues para el equipo de desarrollo del proyecto era esencial conocer si en el Valle del Cauca se están teniendo en cuenta. Por lo cual, en una entrevista con una empresa fabricante de productos con alúmina comercial (ver Anexo 9), se llegó a conocer mejor cuales de estos requerimientos son vitales para el desarrollo de un nuevo proceso para el aprovechamiento de la alúmina-espinela (obtenida de escoria de aluminio) en un producto, como se muestra en la figura 10.

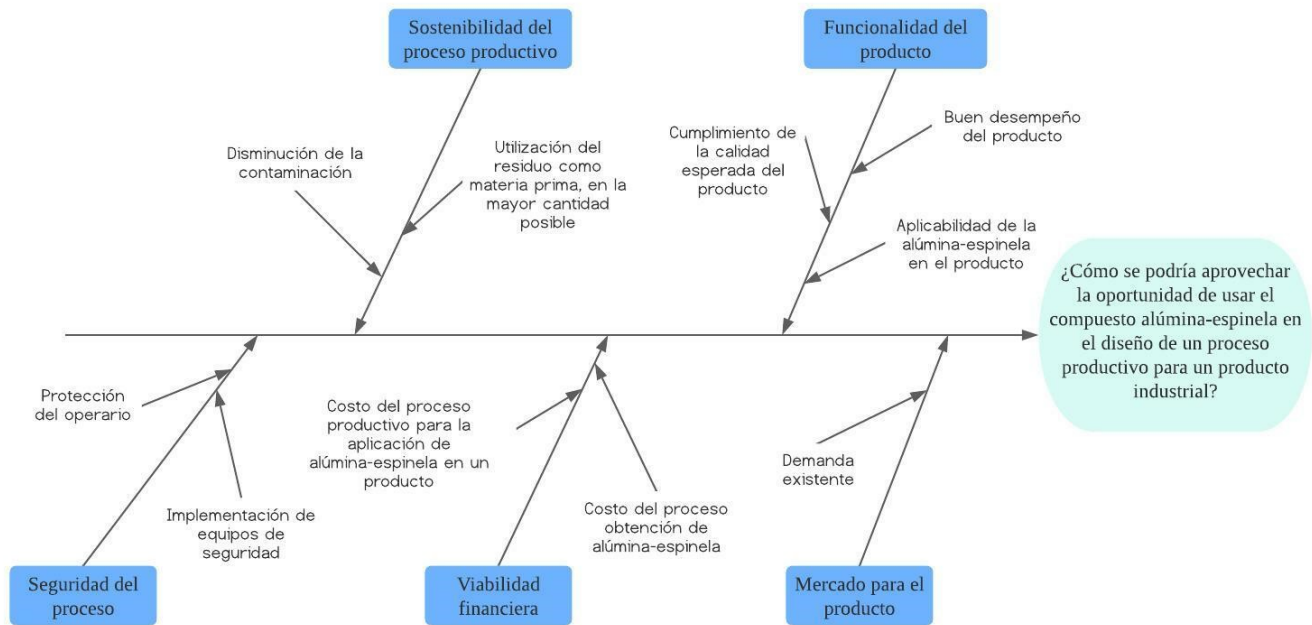


Fig. 10. Diagrama de Ishikawa para la oportunidad del producto

Ahora, con la finalidad de mantener un control de los requerimientos críticos de los grupos de interés del proyecto, se definieron los controladores seis sigmas (CTx), los cuales son esenciales para el diseño del proceso productivo del producto, a seleccionar en esta etapa del proyecto. Dichos controladores fueron establecidos gracias a la información recolectada en la etapa Definir, Medir y la información recolectada en el diagrama de Ishikawa, puesto que los requerimientos críticos de los grupos de interés en conjunto con los indicadores de desempeño permiten identificar los aspectos más importantes en referencia a costos, calidad y satisfacción, logrando así plantear tres controladores de requerimientos críticos.

En primera instancia, se define un controlador crítico para la calidad CTQ (*Critical to Quality*)

- Mejoramiento de las propiedades y/o características del producto fabricado con material original (alúmina comercial): un aspecto clave en el aprovechamiento de la alúmina-espínela contenida en la escoria de aluminio, en el producto al cual se le diseñará su proceso productivo, son las propiedades y o características que este producto debe tener, las cuales deben garantizar una mejora en el rendimiento de este. Sin embargo, se busca que, en caso de no encontrar una mejora significativa, este producto con alúmina-espínela como materia prima, mantenga las propiedades del producto fabricado normalmente con alúmina comercial (óxido de aluminio proveniente de la bauxita).

Posterior a esta etapa, se definió el controlador crítico de costo CTC (*Critical To Cost*), el cual se implementa con el fin de generar beneficios económicos por el aprovechamiento de la alúmina-espínela recuperada de la escoria de aluminio, logrando un interés en las empresas vallecaucanas que emplean la alúmina proveniente de la bauxita en sus procesos productivos, viendo una oportunidad de mercado y un aprovechamiento de residuos. El controlador se definió de la siguiente manera:

- Viabilidad financiera en la implementación de la alúmina-espínela en el diseño del proceso productivo: para la obtención de la alúmina-espínela se debe realizar el proceso de calcinación y molienda de la escoria de aluminio, el cual será evaluado económicamente para encontrar su costo de implementación, en comparación al costo de compra de alúmina comercial. Una vez cuantificado este costo, se busca evaluar financieramente si el diseño del proceso para la obtención de la alúmina-espínela es rentable para las compañías interesadas en esta alternativa sostenible. Se deben establecer los costos de maquinaria, energía y agua. Además, se deberá tener en cuenta que la disminución de costos en comparación con la alúmina comercial, no solo se evidenciará de manera económica, sino también en el valor agregado del producto verde, pues se disminuye el impacto ambiental generado por las empresas fundidoras de aluminio y las fabricantes de productos a base de alúmina.

Finalmente, se define el último controlador crítico, el cual hace referencia a la satisfacción, CTS (*Critical To Satisfaction*). Y por satisfacción, se entiende que se hace referencia a la satisfacción del cliente del diseño productivo que busca plantear este proyecto. Por esto, se define de la siguiente manera.

- Funcionalidad del producto: Es importante tanto para el proyecto como para los posibles clientes, que el producto generado del diseño del proceso utilizando la alúmina-espínela, cuente con las especificaciones necesarias para su uso; para ello se crea una ficha técnica, la cual establece las características del producto.

### B. Revisión de literatura

Actualmente la alúmina proveniente de la bauxita es empleada en muchos sectores industriales debido a sus propiedades fisicoquímicas. Teniendo en cuenta que es posible obtener alúmina-espínela a partir de la calcinación de la escoria de aluminio, se podría reemplazar esta misma en alguna de las aplicaciones industriales que tiene la alúmina pura. Para ello se requeriría realizar una cantidad de pruebas tanto físicas como mecánicas para encontrar qué tan viable es el uso de la alúmina-espínela en un proceso donde se emplea la alúmina pura. Por ello se realiza una búsqueda en la literatura sobre las aplicaciones que tiene la alúmina pura, en las que se podría rediseñar un proceso usando la alúmina-espínela. A continuación, se exponen varias aplicaciones de la alúmina en diferentes sectores productivos, con el fin de evaluar las opciones y buscar una alternativa que permita aplicar las investigaciones y avances del proyecto.

Inicialmente se evaluó la posibilidad de emplear la alúmina como materia prima en la fabricación del sustrato cerámico de las bujías. Según un estudio realizado por Barona, se demuestra que la pasta cerámica que contiene 30% de alúmina en peso presenta buen desempeño en pruebas eléctricas, mecánicas, físicas y térmicas [28], donde demuestra tener resistencia al choque térmico debido a que las partículas cerámicas se unen y forman cristales por sinterización. Sin embargo, se observó que las propiedades mecánicas disminuyen con relación al aumento de la alúmina por el hecho de la pérdida de plasticidad.

Por otro lado, la alúmina se puede moler hasta obtener un tamaño de partícula que varía entre 20-30  $\mu\text{m}$  con el objetivo de mezclarla con pintura. Como resultado se obtiene pintura aislante, en la que se reporta una microestructura cerámica multicapa que se produce por secado, termólisis y sinterizado. Esta pintura aislante se puede emplear en construcciones porque permite disminuir la temperatura interna de una edificación, impactando en el consumo de energía eléctrica por el uso de aires acondicionados [29]. Ahora bien, se identifica una posible oportunidad para el uso de la alúmina-espínela en la pintura aislante. Sin embargo, es pertinente proponer pruebas de viscosidad y de capacidad de resistencia térmica.

También se identificó el uso de alúmina en la fabricación de ladrillos refractarios. Estos son usados en la construcción de hornos de tipo colmena, gracias a la resistencia térmica alcanzada por el uso de alúmina-sílice. Pueden soportar temperaturas entre 950 y 1 080  $^{\circ}\text{C}$  [30]. Según investigaciones realizadas en Norte de Santander, Colombia, se estudió que la formulación de la mezcla alúmina-sílice, con la que se produce el ladrillo debe tener una concentración química de alúmina entre 25% y 30% [30]. Una de las grandes ventajas de emplear los ladrillos refractarios en la construcción de hornos, es que se incrementa la productividad por el hecho de disminuir los tiempos de parada, para el mantenimiento de los hornos. La mezcla alúmina-sílice le proporciona al ladrillo propiedades como mayor resistencia a la rotura por flexión, disminución de la absorción de agua, mayor contracción en cocido y la densidad aparente se mantiene constante según los ensayos realizados, por lo que cumple con los parámetros de fabricación según las normas NTC [30]. Ahora bien, se identifica una oportunidad de usar la alúmina-espínela obtenida de la escoria de aluminio en el proceso de fabricación de ladrillos refractarios. No obstante, sería necesario realizar ensayos porque la alúmina-espínela podría tener características diferentes a la alúmina pura.

Por otro lado, se encontró el *sand-blasting*, un proceso en el cual se pule una superficie con pequeñas partículas abrasivas mediante una pistola a presión. Se usa en la industria de limpieza de superficies, también para eliminar óxidos de los implantes dentales o para el opalizado de vidrios. A partir del siguiente estudio, se evaluó el posible daño que puede generar el tamaño de partícula y la presión que tiene la alúmina sobre las superficies a limpiar. La alúmina se caracteriza por ser un material con alta dureza y por esta razón la emplean para limpiar tanto pinturas como remoción de óxidos sobre metales. Se determinó que la limpieza con *sand-blasting* usando alúmina con tamaño de partícula entre 140 y 800  $\mu\text{m}$  puede generar un daño de 50  $\mu\text{m}$  de profundidad sobre la superficie. Sin embargo, optimiza la mano de obra y el tiempo de trabajo, además reduce costos en los procesos y promete la adherencia de recubrimientos sobre las superficies [31], [32].

Como se mencionó anteriormente, el *sand-blasting* (*SB*) tiene varias aplicaciones y una de ellas es el opalizado de vidrios. De acuerdo con estudios realizados, se ha demostrado que, si se somete al vidrio de cal sodada al proceso de *SB*, hay efectos sobre la resistencia térmica de este. Adicionalmente se determinan las temperaturas críticas en las que se fractura el vidrio y obtiene que los vidrios con mayor cantidad de daños fueron los que tienen menor resistencia al choque térmico [32], [33]. En caso de seleccionar esta alternativa, el opalizado por *SB* se realizaría

con la alúmina-espínela obtenida a partir de la calcinación de la escoria de aluminio. Es recomendable realizar pruebas del proceso actual y del propuesto de manera que se amplíe el conocimiento sobre esta área y se encuentre la viabilidad técnica del uso de este material recuperado.

Por otro lado, Sánchez (2004) desarrolló un proyecto con el propósito de obtener materiales vítreo-cerámicos usando vidrio reciclado con alúmina. Para la elaboración de estos materiales, necesitó tamaños de partícula entre 45 y 53  $\mu\text{m}$  y fue necesario precalentar a 120°C por 30 horas. El proceso por seguir fue el mezclado, la consolidación de los polvos cerámicos, el secado y maquinado, el sinterizado y por último la compactación en caliente [34]. Sánchez concluye que es posible la obtención de materiales vítreo-cerámicos, sin embargo, aún es necesario realizar más pruebas de las propiedades térmicas y físicas.

Además, en la industria de la producción de lijas, es conocido que debido a las propiedades abrasivas y de dureza que tiene la alúmina, se puede emplear en las lijas. Como se mencionó anteriormente, la alúmina se encuentra en la posición 9 de la escala de Mohs, estando por debajo del diamante [35]. Es decir que técnicamente la alúmina es uno de los materiales ideales dentro de este sector productivo; por lo que, al emplear alúmina-espínela, se podría estar dando un valor agregado al producto, por el uso de un residuo normalmente desechado y que puede generar daños medioambientales.

En el sector agrícola se presenta el problema de las plagas en los cultivos y cada vez la legislación internacional incrementa los criterios de competitividad que se aplican a los productos. Por lo tanto, Sandler *et al.* (2010), han realizado una investigación en las que determinaron que la alúmina se podría emplear en nano insecticidas. Se comprobó que la alúmina nanoestructurada tiene propiedades pesticidas ideales porque es un componente natural que no reacciona. El tamaño de partícula que debe tener la alúmina es de 40 a 60 nanómetros y que se proporciona un control bio-racional de plagas, es decir, que no contamina al cultivo con sustancias químicas como lo hacen los insecticidas inorgánicos. Los investigadores demostraron que hay las posibilidades de provocar resistencia a corto y mediano plazo son pocas, por lo que sería una aplicación que da valor agregado [36]. Sin embargo, el reto de esta aplicación es la obtención de la alúmina-espínela a escala nanométrica.

Por otro lado, existe un proceso de acabado abrasivo, conocido como superacabado, este se obtiene con una piedra esmerilada de óxido de aluminio de grano 600. Consiste en una piedra giratoria que oscila a altas frecuencias y la superficie de la piedra mantiene sus características constantes durante toda la vida útil de la piedra [[37]. Para la fabricación de estas piedras es necesario el uso de la alúmina mezclada con espínela, magnetita, hercinita o Titania. También puede contener magnesia o sílice como compuestos sintéticos. En este caso se considera pertinente tener en cuenta esta aplicación de la alúmina en la selección de la alternativa, por lo que también requiere espínela dentro del proceso de producción de la piedra esmerilada.

Para finalizar la investigación, se encuentra que los hormigones refractarios silicoaluminosos pueden exponerse hasta una temperatura de 1 200 °C, teniendo en cuenta que el tamaño de partícula no puede ser mayor a 6,7  $\mu\text{m}$ . Se concluye que entre más fino el tamaño de partícula de la alúmina, mejor desempeño mecánico tendrá el hormigón antes de recibir el choque térmico. Sin embargo, este estudio se hizo a nivel de laboratorio, por lo que habría una oportunidad para analizar la posibilidad de escalar el proceso para ver el comportamiento del hormigón refractario silicoaluminoso [38].

En conclusión, la alúmina tiene muchas aplicaciones industriales sobre todo por sus propiedades mecánicas, térmicas y físicas que pueden verse resumidas en la Tabla IV. Es por esto por lo que para la selección de la alternativa es necesario tener en cuenta ciertos criterios de manera que el producto o alternativa seleccionada sea a base de aspectos claves e importantes para el desarrollo del proyecto.

TABLA IV.

RESUMEN REVISIÓN DE LITERATURA

Tipo	Título	Autor (es)	Año	Industria	Objetivo	Método	Resultados	Aporte al Proyecto
Tesis	Formulación de una pasta cerámica a partir de la utilizada en la fabricación del sustrato de bujías de encendido automotriz utilizando materia prima nacional y material de	Diego Alejandro Barona Díaz	2008	Industria automotriz y mecánica.	Formular y elaborar tres pastas cerámicas, sustituyendo la alúmina con arcilla para fabricar bujías de encendido automotriz.	Realizar un muestreo de las posibles materias primas para reemplazar la alúmina, hacer análisis tanto físicos como químicos, mineralógicos y de tratamiento. Finalmente evaluar las tres pastas cerámicas	La maduración de la pasta cerámica contribuye a la homogeneización de la humedad y la plasticidad de esta [28]. También las propiedades eléctricas mejoran con el incremento del contenido de alúmina al igual que la resistencia al choque térmico.	Sería pertinente realizar una prueba con una cuarta pasta de alúmina-espínela y estudiar su desempeño con respecto a los parámetros mencionados por el autor.

	desecho de EDESA.					en la bujía para conocer la que tiene mejor desempeño.		
Journal	<i>Piezoelectric paint: Ceramic-polymer composites for vibration sensors.</i>	J.R. White, B. De Poumeyro, J. M. Hale, R. Stephen son.	2004	Industria de construcción y química.	Desarrollar un compuesto de polímero cerámico piezoeléctrico y realizar pruebas físicas y mecánicas para obtener las propiedades de este.	Mediante equipos de pulverización se prueban las propiedades del sensor.	Se obtiene que hay una resistencia prometedora a la exposición al aire y hay buenas perspectivas para fabricar sensores con mejoras sustanciales en las propiedades y en la resistencia ambiental mediante una elección de materiales y procedimientos.	Como se demuestra que, al mezclar la pintura con alúmina, se obtiene una pintura aislante, se plantea hacer un prototipado de esta pintura empleando la alúmina-espínela con el fin de realizar pruebas de viscosidad y resistencia térmica.
Artículo científico	Evaluación de mezclas de arcillas para la fabricación de ladrillos refractarios que sirvan para la reconversión tecnológica de los hornos utilizados en Norte de Santander.	Jorge Sánchez Molina <i>et al.</i> , Julia Andrea Orozco Cacique, Leidy Peñaloz a Isidro	2014	Industria de construcción y mecánica.	Fabricar ladrillos refractarios mediante el uso con el fin de analizar las propiedades físicas y químicas que tienen teniendo en cuenta que se obtienen cuatro materias primas diferentes.	Espectroscopía de aniquilación de positrones y otros métodos complementarios para detectar los cambios en el arenado de partículas de alúmina según la presión aplicada.	Los ladrillos refractarios se consideran aptos para ser empleados en la construcción de hornos ya que resisten temperaturas hasta 1 080 °C. El uso de alúmina como arcilla refractaria tuvo uno de los mejores desempeños en las pruebas de absorción de aguas, contracción y resistencia a la rotura.	Como se mencionó anteriormente con la pintura aislante, se podría reemplazar la alúmina pura por la alúmina-espínela para la realización de los ladrillos refractarios y probar si las propiedades obtenidas en dicha investigación de Norte de Santander se asemejan a las que se obtendrán en la Universidad Javeriana Cali, en caso de seleccionar esta alternativa.
Artículo científico	<i>Positron annihilation and complementary studies of copper sandblasted with alumina particles at different pressures.</i>	Pawel Horodk, Krzysztof Siemek, Jerzy Dryzek, Mirosław Wróbel.	2017	Industria química y mecánica	Obtener información sobre el impacto que tiene la presión aplicada en el SB sobre las superficies en cuanto a la dureza, resistencia, distribución y defectos provocados sobre la superficie.	Espectroscopía de aniquilación de positrones y otros métodos complementarios para detectar los cambios en el arenado de partículas de alúmina según la presión aplicada.	Se obtiene que el SB causa un incremento de microdureza únicamente a profundidades menores a 100 µm.	Como la alúmina es un material empleado en el SB, sería interesante reemplazar dicha alúmina por alúmina-espínela y realizar las mismas pruebas de laboratorio con el fin de determinar si es posible la utilización de este material recuperado en este proceso.
Investigación	<i>Thermal shock resistance of sodalime glass eroded by sandblasting.</i>	Zahra Malou, Mohamed Hamidouche, Nouredine Bouaouadja, Gilbert Fantozzi	2019	Industria química, mecánica y eléctrica.	Analizar el efecto del SB sobre vidrio en su resistencia al choque térmico.	El método empleado es de prueba-error y analizando con ayuda de un microscopio, cada etapa de esta misma.	Se demuestra que el daño del SB es similar al de una muesca aguda. La superficie del vidrio en condiciones de SB influye la resistencia al choque térmico.	La alternativa de usar la alúmina-espínela en el proceso de SB del vidrio podría generar cambios en la resistencia al choque térmico además de opacizar los vidrios. Por esto podría ser una alternativa de investigación.
Tesis	Análisis para la obtención de materiales vítreo-	Paula Andrea Sánchez Múrrillo	2005	Industria mecánica y eléctrica.	Analizar la obtención de vítreo cerámicos por medio de	Prototipar, investigar y analizar el material obtenido	Se puede obtener materiales vítreo cerámicos a partir del vidrio	La alúmina-espínela podría reemplazar el material cerámico particulado, por lo que

	cerámicos a partir de vidrio reciclado.				materiales particulados teniendo como materia prima el vidrio reciclado.	teniendo en cuenta las propiedades físicas y mecánicas del vidrio.	reciclado mediante materiales particulados.	se presenta una alternativa de profundización de esta investigación.
Tesis magistral	Optimización del proceso de bandas de lija de la empresa representaciones Acaza S.A. a través de la fabricación de especialidades de abrasivo.	Michael David Caza Proaño.	2016	Industria de construcción y producción de productos abrasivos.	Diseñar un proceso para la reutilización de los desperdicios de las bandas de lija.	Analizar el proceso actual y proponer un proceso mejorado mediante teniendo en cuenta el uso de diagramas y manuales de proceso.	Se determina que los pasos a seguir durante el proceso productivo afectan el desgaste de las lijas.	Las lijas que se fabrican con alúmina tienden a tener mayor durabilidad y mejor acabado teniendo en cuenta el tamaño de partícula empleado. En el proyecto se podría prototipar una lija con la alúmina-espínela para observar el comportamiento que tiene este y compararlo con la lija de alúmina pura.
Artículo científico	Nanoinsecticidas: Nuevas perspectivas para el control de plagas.	Teodoro Stadler, Micaela Buteler, David K. Weaver.	2010	Industria de agricultura, plantaciones y otros sectores rurales.	Emplear la alúmina nanoestructurada como insecticida porque es un material orgánico que no afecta las plantaciones.	Prototipar y probar en un cultivo el nuevo método de control de plagas y finalmente estudiar el efecto que tiene el prototipo sobre el insecto y el cultivo.	La incorporación de nanotecnología tiene un impacto directo sobre la evolución de la agricultura pues es una nueva estrategia efectiva para el control de plagas.	Es una alternativa muy interesante por lo que la escoria de aluminio si es contaminante para el medio ambiente, mientras que en este estudio se demuestra que no afecta los cultivos. En caso de tener los recursos para realizar estas pruebas de material, se podría convertir un material contaminante en un pesticida amigable con el medio ambiente.
Artículo científico	<i>Review of superfishing by the magnetic abrasive finishing process.</i>	Lida Heng, Yon Jig Kim, Sang Don Mun	2017	Industria ingenieril y automotriz.	Examinar los principios, parámetros y limitaciones del acabado magnético abrasivo (MAF).	Mediante cálculos y análisis de las propiedades mecánicas, se obtienen los resultados.	El MAF mejora la homogeneidad de las superficies. La densidad de flujo magnético, el material de la pieza de trabajo, el espacio de acabado, el aceite de esmerilado y la velocidad de rotación son efectivos en el proceso MAF.	Uno de los materiales que se pueden emplear para realizar el MAF es el óxido de aluminio y el circonio, por lo que se genera la oportunidad de estudiar la alúmina-espínela en este proceso.
Artículo científico	Evaluación de la resistencia al choque térmico de hormigones refractarios silicoaluminosos. Efecto del tratamiento térmico.	Federico Faccin, Andrea F. Prado, Analía Gladys Tomba Martínez, Leandro Ramajo	2019	Industria de construcción	Encontrar la granulometría que tenga mejor desempeño mecánico antes del choque térmico.	Análisis de hormigones refractarios empleando la alúmina y desarrollado pruebas de en procesos no severos con hormigones de diferente tamaño de partícula.	Se obtiene que entre más fino sea el tamaño de partícula de la alúmina, mejor es el desempeño mecánico que tiene el hormigón antes de recibir el choque térmico.	Es una alternativa en la que se podría aplicar el proyecto con el fin de seguir investigando si la alúmina-espínela puede tener el mismo desempeño que la alúmina-sílice empleada en este estudio.

### C. Exploración de ideas y selección de alternativa

Con base en la información encontrada en la literatura se realiza una exploración de ideas con el denominado método Disney que se desarrolla en la Tabla V para proponer diferentes alternativas que permitan el aprovechamiento de la alúmina-espínela. Mediante este método se seleccionan las alternativas más convenientes y por medio de un modelo de decisión cualitativo se escoge la mejor alternativa para el proyecto.

Este método establece tres etapas: la primera etapa es la de “Soñador” donde se da paso a libre a la creatividad; la segunda etapa es la del “Realista” donde pone en cuestión las ideas para pensar en su viabilidad y hacer la primera filtración; por último, en la tercera etapa con postura de “Crítico”, se evalúan los riesgos y posibles errores para seleccionar la mejor opción. Finalmente, con este método se eligieron cinco alternativas para ser evaluadas con el modelo de decisión de la matriz de preferencia para selección de la mejor alternativa.

TABLA V.

MÉTODO DISNEY

Alternativas de aprovechamiento para la escoria de aluminio		
Soñador ¿Por qué no?	Realista ¿Cómo?	Crítico ¿Qué falla?
Garantiza la creatividad	Garantiza la viabilidad	Previene posibles riesgos
Bujías	Con una carga de polvo de alúmina se hace un molido, secado a 430 °C, compactado en prensa a 430 bar, pulido, cocción a 1 550 °C, se esmalta y se cuece en un horno a 1 100 °C, se ensambla el electrodo y se ingresa en el horno a 1 000 °C [28].	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Altos costos de producción</li> <li>• No se cuenta con la maquinaria suficiente</li> <li>• Alta competencia en el mercado</li> <li>• Tendencia a baja demanda por la transición a vehículos eléctricos que no requieren bujías</li> </ul>
Pinturas aislantes	Se prepara pintura cerámica con polvo cerámico (alúmina y alúmina con zirconio al 20% en volumen), dispersante, resina y disolvente mezclando a alta velocidad [29].	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dificultad en la obtención de reactivos químicos y formulación usada en la producción de pintura</li> </ul>
Ladrillos refractarios	Se tritura y tamiza sílice, arcilla y alúmina para hacer una mezcla que contenga 25% o más de alúmina para ser compactada a una presión de 240 Kgf/cm <sup>2</sup> . Posteriormente se seca a 110 °C durante 24 horas y se lleva a un horno mufla a 1 280 °C [30].	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta competencia</li> <li>• Bajo valor agregado</li> </ul>
Sand-blasting (SB) / Opalizado de vidrios	Los principales componentes en este proceso son: el material abrasivo (arena, óxido de aluminio, etc.), la pistola de SB, máquina de aire comprimido, la manguera de alta presión y la boquilla. Se pueden usar diferentes tamaños de partícula [31].  Con equipos de propulsión se usa la alúmina como material abrasivo para grabar o granallar vidrio [33].	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No contar con los equipos necesarios</li> <li>• Afectación negativa en el vidrio por la presencia de espínela.</li> </ul>
Material vítreo cerámico	Se mezcla polvo de alúmina con una base de vidrio, se prensa en frío con fuerzas hasta de 5 800 lb y posteriormente se sinteriza [34].	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No contar con los equipos necesarios para las pruebas</li> <li>• No se cuenta con la maquinaria para el sinterizado</li> </ul>
Lija	Papel, tela o esponja que se recubre con adhesivo y partículas de alúmina según el tamaño requerido [35].	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta competencia</li> <li>• Maquinaria insuficiente</li> <li>• Dificultad en la fabricación de la lija</li> </ul>
Nano insecticida	A través de nanotecnología se produce alúmina nanoestructurada como nano insecticida para el manejo de plagas [36].	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Máquinas o herramientas insuficientes</li> <li>• Costosas pruebas de laboratorio</li> <li>• Dificultad de la obtención de alúmina a escala nanométrica.</li> </ul>

Piedra esmeril	Está compuesto mayoritariamente del mineral corindón (óxido de aluminio), mezclado con otras variedades [37].	<ul style="list-style-type: none"> <li>Alta competencia</li> <li>Máquinas o herramientas insuficientes</li> </ul>
Hormigón	El hormigón silicoaluminoso se formula como mezclas de agregados o chamota refractarios y cemento aluminoso, con tenores de 40 a 80% p/p de alúmina, se adiciona agua y se mezcla en trompos por 5 minutos [38].	<ul style="list-style-type: none"> <li>Alta competencia</li> <li>Afectación de las propiedades mecánicas del hormigón por la incorporación de la alúmina-espínela</li> </ul>

Es importante resaltar que para el análisis de las alternativas se decidió agrupar cuatro de ellas (SB, opalizado de vidrios con SB, lijas, piedra-esmeril) dentro del concepto de Productos Abrasivos debido a que se encuentran en el mismo sector industrial. Por ejemplo, el SB y el opalizado de vidrios son parte de los abrasivos ya que se pueden considerar como el mismo proceso industrial. Además, las piedras esmeriles y las lijas hacen parte de los productos abrasivos más usados comúnmente, pues son usados en diferentes sectores de la industria. Y, tomando en consideración las recomendaciones recibidas durante la visita a la empresa “Mundo Abrasivos del Valle Ltda” quienes brindaron la oportunidad de realizar experimentos con alúmina-espínela en sus instalaciones para prototipar algunos productos abrasivos que ellos fabrican y comercializan.

Ahora bien, ya conociendo estas cinco alternativas preseleccionadas, se tiene en cuenta que, para el desarrollo de la matriz de preferencia previamente mencionada, se realizó la matriz AHP donde cada criterio de selección fue escogido de acuerdo con el análisis de la oportunidad y las características evaluadas en la exploración de ideas. Dejando, así como criterios principales, los costos de desarrollo del producto, la demanda existente del mismo, el valor agregado y la aplicabilidad en las industrias del Valle, la cual hace referencia a la posibilidad de realización de este producto en las instalaciones del Valle del Cauca según el sector industrial.

Todos estos criterios fueron evaluados y analizados a través de la matriz AHP, la cual puede ser analizada a profundidad en el Anexo 10 para generar su valor ponderado como se observa en la figura 11 y así posteriormente conocer la importancia de cada criterio en la selección de la mejor alternativa en la matriz de preferencia evidenciada en la figura 12.

Comparación de alternativas según criterios				Criterios de selección					1	2	*(2)/(1)
Matriz de comparación por pares				Matriz Normalizada					Vector Prioridades	Vector Ponderado	Vector Consistencia
Criterios	Costos	Valor agregado	Demanda	Aplicabilidad en la industria del Valle del Cauca	Costos	Valor agregado	Demanda	Aplicabilidad en la industria del Valle del Cauca			
Costos	1	1/5	2	1/3	0.11	0.12	0.15	0.07	11%	0.45	4.02
Valor agregado	5	1	6	3	0.53	0.59	0.46	0.65	56%	2.32	4.16
Demanda	1/2	1/6	1	1/4	0.05	0.10	0.08	0.05	7%	0.28	4.03
Aplicabilidad en la industria del Valle del Cauca	3	1/3	4	1	0.32	0.20	0.31	0.22	26%	1.06	4.10
Totales	9.50	1.70	13.00	4.58	1.00	1.00	1.00	1.00	100%		

Fig. 11. Matriz AHP de criterios de selección de alternativas.

Una vez obtenidos los valores de importancia de cada criterio, se puede ver como gracias a los criterios de selección, la mejor alternativa para el desarrollo del proyecto son los productos abrasivos, pues con un puntaje de 7,18 puntos de 10 posibles, supera a las demás alternativas en la figura 12. Este método selección puede ser visualizado de manera detallada en el Anexo 11.

Criterios de selección	Peso ponderado del criterio (Según AHP)	Pintura aislante		Vidrios cerámicos		Nanoinsecticida		Productos abrasivos (Lijas, piedra esmeril, gratalina, sandblasting y opalizado de vidrios)	
		Calificación	Puntos	Calificación	Puntos	Calificación	Puntos	Calificación	Puntos
1. Costos	11%	3	0,34	2	0,22	2	0,22	5	0,56
2. Valor Agregado	56%	8	4,46	8	4,46	8	4,46	7	3,90
3. Demanda	7%	8	0,56	5	0,35	8	0,56	9	0,63
4. Aplicabilidad en la industria del Valle del Cauca	26%	5	1,30	7	1,82	4	1,04	8	2,08
<b>Totales</b>	<b>100%</b>		<b>6,66</b>		<b>6,85</b>		<b>6,29</b>		<b>7,18</b>

Fig. 12. Matriz de selección

Este proceso permite visualizar que esta alternativa fue seleccionada gracias a su distinción en aspectos como la demanda y la aplicabilidad, pues de acuerdo con la investigación realizada, esta alternativa es altamente demandada en Colombia. Normalmente estos productos se usan en toda clase de procesos industriales y artesanales como en la construcción, carpintería, y la industria mecánica automotriz. Sirven para pulir, afinar, refinar, depurar y dar acabados a otros materiales por lo cual con el tiempo se han convertido en productos de gran rotación en el mercado, haciéndolos necesarios en la industria del país [39].

De hecho, estos productos son comercializados por diferentes establecimientos en la ciudad de Cali, donde se desarrolla este proyecto. Además, diferentes empresas como la entrevistada en el Anexo 9 producen piezas abrasivas para abastecer el mercado. Y empresas como la del Anexo 14 están en el mundo de los abrasivos a través de procesos como el *SB*.

#### D. Objetivos

Después de Definir, Medir y Analizar la oportunidad de este proyecto, se plantea el siguiente objetivo general, el cual se cumplirá gracias a la ejecución de los objetivos específicos.

Objetivo general: Diseñar un proceso para la fabricación de productos abrasivos mediante el uso de la alúmina-espinela recuperada de la escoria de aluminio, empleando herramientas de ingeniería industrial, con la finalidad de aprovechar el residuo generado de los procesos de fundición de aluminio en el Valle del Cauca.

Objetivos específicos:

1. Reconocer los procesos y materiales requeridos para la producción de productos abrasivos.
2. Establecer y prototipar el proceso propuesto para la producción de abrasivos.
3. Validar la viabilidad técnica del producto o proceso abrasivo mediante la evaluación de la rugosidad superficial generada por el producto o proceso.
4. Validar la viabilidad financiera de los abrasivos con mejor desempeño con respecto a la competencia.

#### E. Plan de trabajo (PdT)

En este apartado se evidencia el paso a seguir para el desarrollo de la alternativa seleccionada a través de una serie de actividades programadas en la Tabla VI.

TABLA VI.  
PLAN DE TRABAJO

Objetivo	Área IISE	Herramientas de Ingeniería Industrial	Actividad	Entregable (alcance)	Fecha entrega
1. Reconocer los procesos y materiales requeridos para la producción del producto	12. Ingeniería de diseño y fabricación	Ingeniería de diseño	1.1 Precisar los requerimientos de materiales para la producción de abrasivos.	<i>Bill of Materials</i> (Lista de requerimiento de materiales).	6 de febrero 2023
	4. Ingeniería de instalaciones y gestión energética.	Dimensionamiento de instalaciones	1.2 Definir los requerimientos de maquinaria, precisar horarios de trabajo basado en maquinaria disponible y materiales requeridos.	Informe de tipo de máquina y mano de obra requerida, cantidad de energía suministrada en el proceso. Calendario de actividades con base en cálculos de tiempos de trabajo.	7 de febrero 2023
2. Establecer y ejecutar el proceso propuesto para la producción de abrasivos.	12. Ingeniería de diseño y fabricación	Fundamentos de materiales	2.1 Llevar a cabo de manera correcta el tamizaje y la clasificación del porcentaje de tamaño de partícula por cada rango.	Informe de porcentaje de cada tamaño de partícula después de las moliendas.	13 de febrero 2023

	12. Ingeniería de diseño y fabricación.	Procesamiento de partículas	2.2 Llevar a cabo el proceso de calcinación de la escoria de aluminio de tamaño de partícula previamente establecido para obtener el compuesto alúmina-espínela	Informe de entradas y salidas del proceso de calcinación con porcentaje de pérdidas y tiempos detallados	15 de marzo 2023
	12. Ingeniería de diseño y fabricación.	Procesamiento de partículas	2.3 Prototipar el vidrio opalizado (abrasivo) con la adición del componente alúmina-espínela.	Diseño propuesto Tabla de mediciones de resultados.	25 de marzo 2023
3. Validar la viabilidad técnica del producto mediante la comparación de la mejor combinación de tamaño de partícula y porcentaje de alúmina-espínela, en función de su desempeño con respecto a la competencia.	5. Ingeniería de calidad y fiabilidad	Prueba de confiabilidad	3.1 Evaluar la funcionalidad del vidrio opalizado (abrasivo) basado en los tamaños de partícula aplicados.	Medición rugosidad y desgaste.  Informe de resultados obtenidos y sus principales conclusiones.	05 de abril 2023
	9. Gestión en ingeniería	Procesos de negocio	3.2 Determinar la viabilidad técnica del vidrio opalizado (abrasivo) a través de la comparación de atributos físico-mecánicos con material de vidrio opalizado comercial.	Lista de chequeo basado en los resultados obtenidos del abrasivo, e informe final con resultados de comparación basado en abrasivos de óxido de aluminio.	25 de abril 2023
4. Verificar la viabilidad financiera del producto con respecto a la competencia	3. Ingeniería de análisis económico.	Clasificación de costos.	4.1 Determinar los costos de producción de los vidrios opalizados (abrasivo)	Lista de costos, gastos e inversión efectuada	10 mayo 2023
	9. Gestión en ingeniería	Enfoque en el cliente	4.2 Estudio de mercado para la estimación del número existente de clientes interesados y la demanda.	Informe cuyo contenido: Las cuatro p's, estimación de interesados y demanda e investigación de mercado.	19 de mayo 2023
	3. Ingeniería de análisis económico.	Análisis de flujo de caja.	4.3 Efectuar la proyección de los flujos de caja relacionados a la producción de vidrios opalizados (abrasivo)	Flujo de caja del proyecto, valor presente neto, tasa interna de retorno y periodo de recuperación de inversión.	22 de mayo 2023
		Toma de decisiones financieras entre alternativas.	4.4 Ejecutar la evaluación de alternativas a través de la comparación de estimaciones de VPN y TIR.	Informe de selección de alternativa y viabilidad financiera. Documento final proyecto de diseño.	25 de mayo 2023

#### IV. DISEÑAR

##### A. Desarrollo del diseño de la solución.

Inicialmente, se siguió como guía el proceso que se planteó en el trabajo de Orozco y Vega (2022) para la obtención de alúmina-espínela a partir de la calcinación de la escoria de aluminio, en el cual se somete esta misma a un proceso de lavado, para liberar los nitruros mencionados anteriormente. Este proceso de lavado o apagado se debe regir bajo la norma y los parámetros expuestos en la Resolución 631 del 2015 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible, donde se especifican los valores microbiológicos y los parámetros fisicoquímicos máximos permisibles en vertimientos puntuales de aguas residuales (ARD y ARND) a cuerpos de aguas superficiales[40]. Esto debido a que, en esta parte del proceso de obtención de alúmina-espínela, se hace uso de agua para luego ser depositada en los vertimientos adecuadamente.

Luego se realiza el secado y molienda de la escoria para posteriormente hacer la calcinación, segunda molienda y almacenaje de la alúmina-espínela para hacer el prototipado. Sin embargo, en la figura 13 se puede evidenciar el diseño del proceso propuesto por el grupo de trabajo 2022 202, para emplear la alúmina-espínela como material abrasivo en la fabricación de vidrios opalizados.

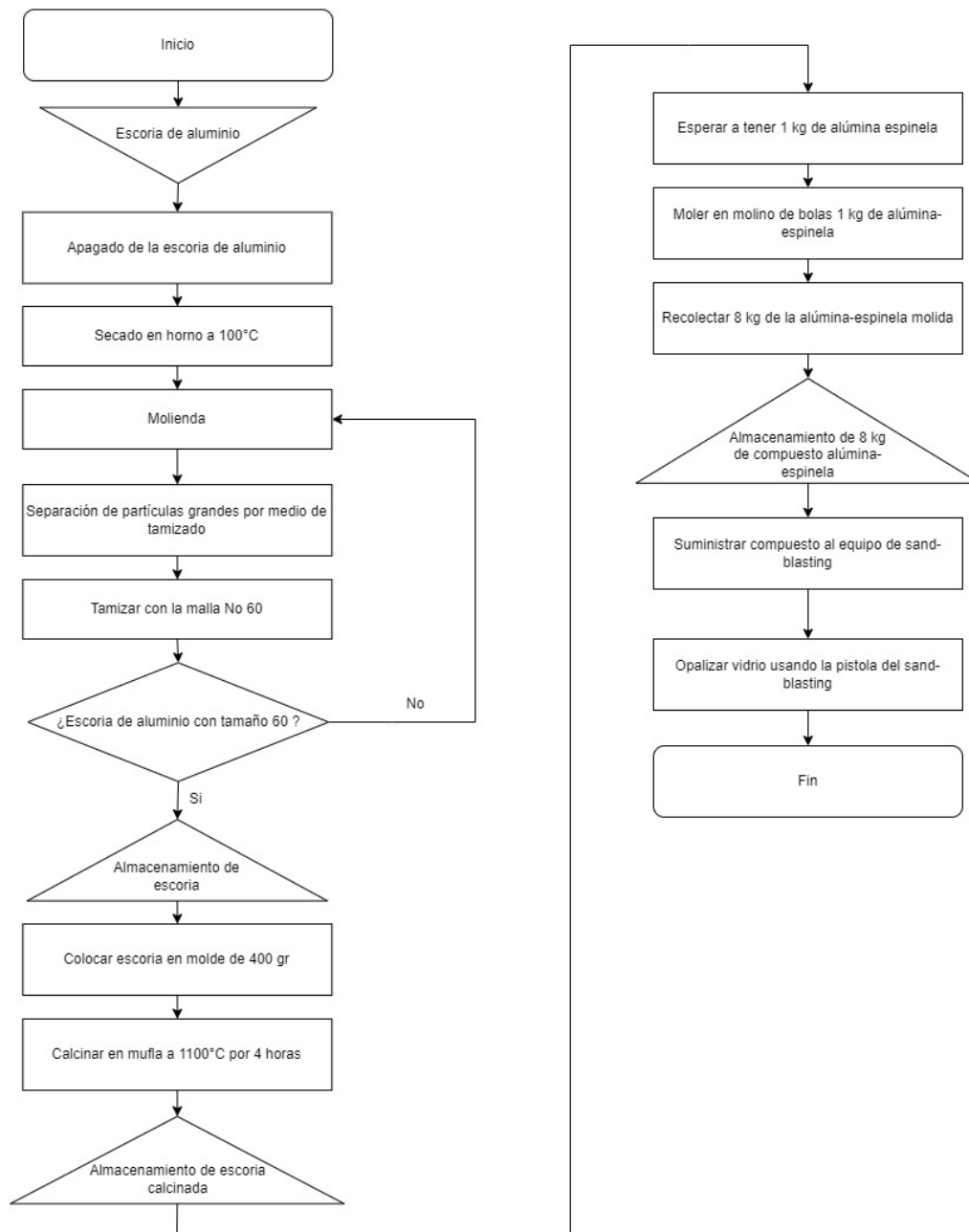


Fig. 13. Diagrama de flujo del proceso de obtención y aplicación de alúmina-espínela.

En los primeros pasos del proceso de obtención de alúmina-espínela, no se generaron cambios con respecto al proceso propuesto por Orozco y Vega (2022), por lo cual, hasta la primera molienda, el proceso es igual (Véase figura 14). Sin embargo, una vez molida la escoria de aluminio, es necesario que se obtenga un tamaño de partícula específico para poder ser usada como alúmina-espínela (material abrasivo) en el proceso de SB para el opalizado de vidrios. Es por esto que en el diagrama de flujo se puede observar que, con la finalidad de obtener un grano en particular, se usó inicialmente una zaranda, seguida del tamizador eléctrico con tamices de malla No. 60 para obtener la escoria con el tamaño de partícula deseado. Después, en el proceso de calcinación, se usaron ladrillos cerámicos para dispersar la escoria de aluminio, y con ello lograr que el calor del proceso se distribuya mejor en el material, lo cual fue una mejoría evidente al uso del crisol empleado anteriormente por Orozco y Vega

(2022). Pues, el crisol tiene más altura y profundidad que el ladrillo refractario y esto genera que la distribución del material sea vertical. Esto ocasiona que la calcinación no sea homogénea, ya que no facilita la entrada uniforme del calor, a comparación de una distribución horizontal del material, como lo permite el ladrillo (Véase figura 15). Este cambio, generó la necesidad de una estandarización en el proceso de calcinación, por lo que se usó un molde que permitió realizar el calcinado de cantidades de aproximadamente 400 g. La mufla inicialmente se programó para usar rampas de temperatura empezando en 23 °C hasta 1 100 °C durante dos horas, después manteniendo esa misma temperatura por cuatro horas y finalmente disminuir los 1 100 °C en otra rampa de dos horas hasta llegar a temperatura ambiente. Esto no era eficiente, por lo que se decidió calcinar durante cuatro horas sin ninguna rampa.

En relación con el análisis químico de las muestras resultantes del componente de alúmina-espínela tras su proceso de calcinación, este no se presenta dentro del alcance del proyecto, pues, el impacto de la calcinación de la escoria de aluminio fue estudiado previamente por Orozco y Vega (2022).

En consecuencia, aunque existe gran posibilidad de que la composición química de la escoria de aluminio calcinada no sea la misma entre cada muestra que puedan brindar diferentes compañías, se espera que el proceso descrito con anterioridad potencie y aumente la presencia del componente de alúmina-espínela en el material para su posterior uso, basado en sus características, en los vidrios opalizados.



Fig. 14. Imágenes del proceso de apagado, secado a 100 °C y zarandeado.



Fig. 15. Imágenes de comparación entre alúmina-espínela obtenida con el crisol vs alúmina-espínela obtenida con ladrillos refractarios.

Según Orozco y Vega (2022), posterior a la calcinación de la escoria de aluminio se demuestra que la mayor parte del material es compuesto de alúmina-espínela. Una vez obtenido alrededor de 1 kg de alúmina-espínela, se procedió a realizar la molienda de esta, mediante un molino de balines o bolas, este proceso fue posible realizarlo en paralelo con la calcinación de más escoria de aluminio. Esto se hizo, ya que, durante la calcinación, se sintetizó el material en bloques grandes como se puede observar en la figura 16.



Fig. 16. Imagen de la alúmina-espínela obtenida después del proceso de calcinación de escoria de aluminio.

Posterior a la explicación del diseño del proceso de obtención del componente alúmina-espínela proveniente de la escoria de aluminio, y una vez calcinado y molido todo el material, se almacena en un contenedor de plástico para continuar con el proceso de prototipado de la alternativa seleccionada: vidrios opalizados.

Para llevar a cabo el prototipado del vidrio opalizado empleando alúmina-espínela, se realiza el proceso de *SB*. Se hizo una búsqueda de empresas que realizaran el proceso de *SB* en la ciudad de Santiago de Cali, identificando a la empresa “Vidrios Opalizados Ramírez”; donde, posteriormente se realizaron las pruebas del material alúmina-espínela como insumo del proceso. La empresa suministró información técnica del proceso de *SB* lo que permitió ajustar parámetros del proceso de transformación de la alúmina-espínela como el tamaño de partícula y la cantidad mínima requerida para el proceso. Para evaluar la alúmina-espínela como material abrasivo, se empleó un vidrio de 24,5 cm de largo y 26,5 cm de ancho. Sobre este mismo, se realizó el proceso de opalizado con alúmina comercial de la marca Global Link SAS y la alúmina-espínela, cada uno de ellos en una mitad del vidrio muestra, con el propósito de comparar el opalizado hecho con ambos materiales (Véase figura 17). El proceso de *SB* se lleva a cabo pasando la pistola de presión tres veces por la zona a opalizar y mediante luces reflectoras que hay dentro de la instalación, se identifican espacios donde aún se refleja la luz y se procede a completar el opalizado (véase figura 18.a). Al finalizar el opalizado con la alúmina comercial, se procede a vaciar el material restante de la máquina y cargarla con la alúmina-espínela para iniciar el proceso de *SB* en el otro extremo del vidrio. El proceso de *SB* con la alúmina-espínela tuvo una duración aproximada de 7 minutos, en donde, se pudo observar que requirió mayor tiempo de exposición a la alúmina-espínela en comparación al producto normalmente utilizado por la empresa (Véase figura 18.b).

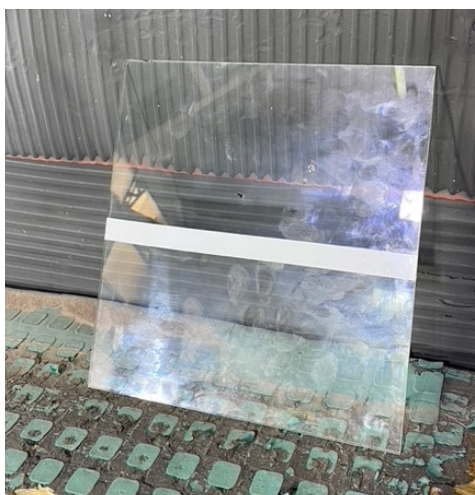


Fig. 17. Imagen del vidrio antes de iniciar el proceso de *SB* con ambos materiales abrasivos.

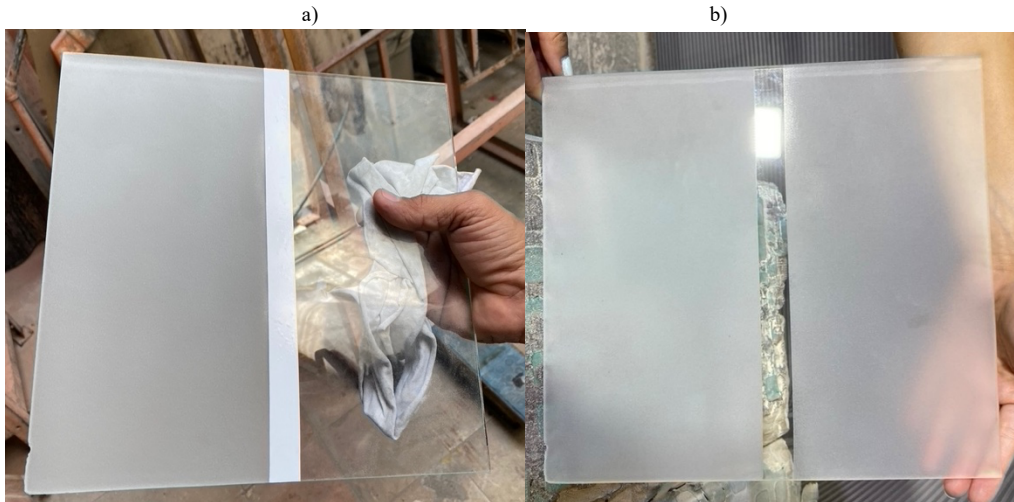


Fig. 18. a) Vidrio opalizado con *alúmina comercial*. b) Vidrio opalizado con *alúmina comercial* (izquierda) y *alúmina-espínela* (derecha)

La muestra de *alúmina-espínela* obtenida en la fase experimental, presenta características importantes como alta dispersión y pulverulencia en el proceso de opalizado mediante *SB*, pues al exponerlo a la presión del proceso, el material se esparce en el aire a diferencia de la *alúmina comercial*. Esto se debe a que la *alúmina-espínela* obtenida en el laboratorio cumplió parcialmente con el tamaño de partícula establecido por la empresa. Esto generó dificultad en el proceso de opalizado, sin embargo, se obtuvo una superficie opalizada visualmente similar a la del vidrio opalizado con *alúmina comercial*. Finalmente, la muestra obtenida del prototipo se expone a un estudio de rugosidad que permite identificar características implícitas y precisas para su posterior comparación de funcionamiento.

### B. Validación del diseño propuesto.

Con el fin de validar el diseño, se tuvieron en cuenta cinco variables de las cuales cada una tiene su respectivo método de validación, ensayo o cálculos, de manera que se evalúa la factibilidad del diseño propuesto.

#### 1) Cantidad de *alúmina-espínela* aprovechada de la escoria de aluminio

Inicialmente, se evaluó la cantidad de *alúmina-espínela* aprovechada de la escoria de aluminio, para llevar a cabo la validación del cumplimiento de la meta trazada. Posterior a la etapa de calcinación y molienda, se identificaron los indicadores estadísticos pertinentes para llevar a cabo la validación de la variable de aprovechamiento de la escoria de aluminio en el proceso anteriormente descrito. Para este caso, se utilizaron los indicadores estadísticos de promedio e intervalos de confianza (al 95%), que permiten identificar y establecer tendencias de porcentaje de aprovechamiento. Para definir lo anterior, se tomó una muestra de 12 calcinaciones de un total de 24. Asimismo, teniendo en cuenta el diseño, las moliendas se realizaron en pequeños lotes de 1 kg de *alúmina-espínela*, de manera que se toman en cuenta cuatro moliendas para la muestra. Inicialmente se determina el porcentaje de pérdida de cada calcinación a través de la siguiente ecuación:

$$\%Pérdida \text{ por calcinación} = \frac{Masa (g) \text{ de entrada} - Masa (g) \text{ de salida}}{Masa (g) \text{ de entrada}} \quad (1)$$

Posteriormente, se realiza un promedio de las pérdidas de cada una de las 12 calcinaciones para determinar cómo se comporta el porcentaje de pérdidas en la muestra, mediante la siguiente ecuación:

$$Promedio \% \text{ de pérdidas por calcinación} = \frac{\sum \%Pérdida \text{ calcinación}}{Número \text{ de calcinaciones}} \quad (2)$$

El resultado de esta fórmula arroja en promedio el 21,82% de pérdida de *alúmina-espínela* en el proceso de calcinación, con un intervalo de confianza de (19.51%, 24.13%). Posteriormente, se estimó el porcentaje de pérdida en el proceso de molienda (ecuaciones 3 y 4) de la misma manera que se hizo anteriormente con el proceso de calcinación.

$$\% \text{ Pérdida por molienda} = \frac{\text{Masa resultante calcinación (g)} - \text{Masa resultante molienda (g)}}{\text{Masa resultante calcinación (g)}} \quad (3)$$

$$\text{Promedio \% de pérdidas molienda} = \frac{\sum \% \text{ Pérdida molienda}}{\text{Número de moliendas}} \quad (4)$$

A partir de esta fórmula, el resultado promedio de pérdidas en la molienda es de 1,30%. De esta manera, con un 95% de confianza, el intervalo estaría delimitado por (0.86%, 1.74%). Por último, el promedio de pérdida de alúmina-espinela tanto de la calcinación como la molienda está dado por:

$$\text{Promedio de pérdida(\%)} = \text{Promedio de pérdida molienda} + \text{Promedio de pérdida calcinación} \quad (5)$$

Cuyo resultado es de 23,12% de promedio de pérdida para el proceso de calcinación y molienda obtenido del diseño propuesto.

2) Tamaño de partícula de alúmina-espinela después de la calcinación y molienda

Por otro lado, se evaluó el tamaño de partícula de la alúmina-espinela después de la calcinación y molienda, mediante una prueba de granulometría. Se realizó un cuarteo de la muestra (véase figura 19) con el fin de realizar la granulometría y evaluar el tamaño de partícula obtenido comparado al tamaño de partícula de la alúmina comercial de la marca Global Link SAS. Para cuartear la muestra, se mezclaron los 8 kg de alúmina-espinela con el fin de tener una mezcla homogénea. Consecuentemente, se dividió en cuatro partes del material hasta haber separado 200 g que fueron sometidos al tamizado eléctrico.

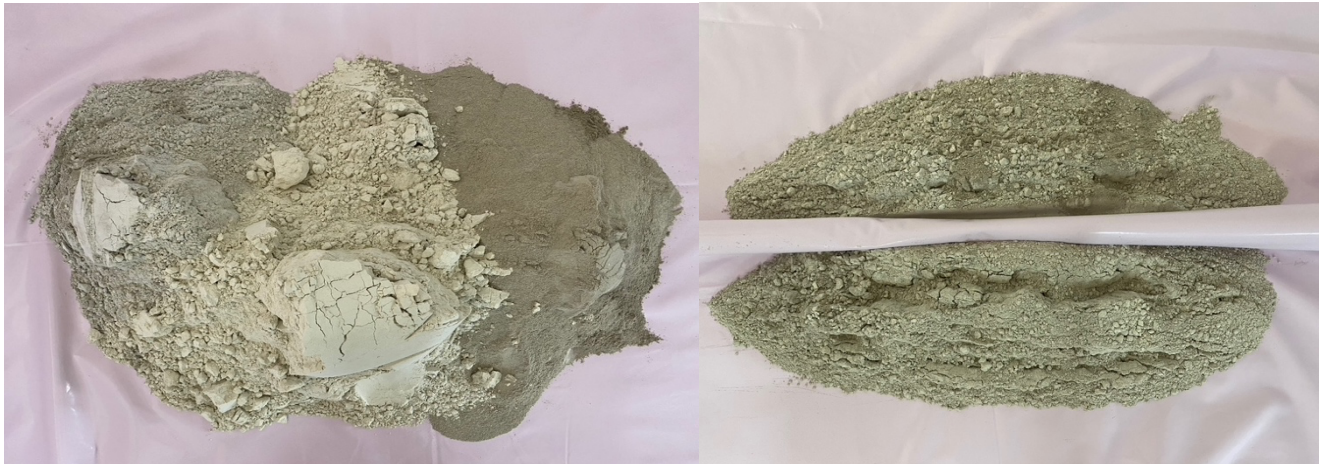


Fig. 19. Cuarteo de la muestra de alúmina-espinela.

La evaluación granulométrica, se realizó en una tamizadora eléctrica modelo ROTAP RX-29 de marca W.S. Tyler, haciendo uso de mallas No. 60, 80, 100 y 200 (véase figura 20). El tiempo de tamizado fue de 5 min; posteriormente, se pesaron las cantidades retenidas en cada uno de los tamices y los resultados se presentan en la Tabla VII.



Fig. 20. Equipo tamizadora eléctrica para granulometría.

TABLA VII.

RESULTADOS DE LA GRANULOMETRÍA

Mallas		Tamaño de partícula	Peso (gr)	Porcentaje
Pasa malla No. 200	-	75 $\mu\text{m}$ > TP	46,5	23,44%
Pasa malla No. 100	Retiene malla No. 200	150 $\mu\text{m}$ > TP > 75 $\mu\text{m}$	95	47,88%
Pasa malla No. 80	Retiene malla No. 100	180 $\mu\text{m}$ > TP > 150 $\mu\text{m}$	23	11,59%
Pasa malla No. 60	Retiene malla No. 80	250 $\mu\text{m}$ > TP > 180 $\mu\text{m}$	20,9	10,53%
-	Retiene malla No. 60	TP > 250 $\mu\text{m}$	13	6,55%
Total			198,4	

Durante la granulometría se observó que la relación entre el tamaño de partícula y cantidad de material fue menor al especificado por la empresa Vidrios Opalizados Ramírez, lo que afectó el proceso de *SB* cuando se hizo la evaluación de la alúmina-espínela como material insumo del proceso (prototipado del proceso). Solamente el 6,55% de la muestra cumplió con las especificaciones del tamaño de partícula que recomendó la empresa. Sin embargo, se realizan las recomendaciones de mejora para el tamaño de partícula de un posible ensayo a futuro.

### 3) Costo del proceso del proceso de recuperación de alúmina-espínela proveniente de la escoria de aluminio

Adicionalmente, se realizó el estudio del costo del proceso de recuperación de alúmina-espínela proveniente de la escoria de aluminio, donde inicialmente se tuvieron en cuenta aspectos como la localización de una posible planta donde se industrialice el proceso hecho en los laboratorios de la universidad, y se tengan en cuenta los costos operacionales, los salarios de operarios, flujo de caja de la empresa, entre otros.

#### a. Localización

El proyecto tiene el objetivo de aprovechar la escoria de aluminio generada en el departamento del Valle del Cauca, por lo que se delimitó el proyecto para esta región y se decidió ubicar la planta en el municipio de Yumbo, Valle del Cauca por las siguientes razones:

- Ubicación estratégica: Yumbo está ubicado en el centro del Valle del Cauca, posición ideal de entrada al ‘triángulo de oro’ de Colombia (territorio comprendido entre Cali, Bogotá y Medellín) al ser la región de entrada y salida del país por el Océano Pacífico con su principal puerto -Buenaventura- y su cercanía al Aeropuerto Internacional Alfonso Bonilla Aragón [41].

- Zona franca y clima favorable para los negocios: Yumbo cuenta con una Zona Franca permanente, que ofrece beneficios fiscales y aduaneros a las empresas que operan allí. Esto podría resultar en una reducción de los costos de producción y la posibilidad de acceder a nuevos mercados. El gobierno local y regional de Yumbo, ha implementado políticas y programas para fomentar el crecimiento económico y atraer inversiones, lo que podría resultar en una mayor facilidad para establecer y operar una planta industrial [42].
- Infraestructura industrial: Yumbo cuenta con una sólida infraestructura industrial, incluyendo zonas de producción, bodegas, parques industriales, laboratorios y centros de investigación [42]. Esto facilita la construcción y el funcionamiento de una planta industrial.
- Recursos humanos capacitados: El Valle del Cauca tiene tradición en la industria manufacturera y cuenta con una fuerza laboral capacitada y experimentada en el sector. Esto podría resultar en una mayor eficiencia y calidad en la producción [42].

*b. Costos Operacionales*

- Arrendamiento: Conforme a la región elegida para ejecutar el proyecto, se consultó en diferentes páginas web el costo de arrendamiento de una construcción para instalar la planta y se optó por una de ellas ubicada en Arroyohondo, Yumbo, con un costo mensual de \$10 582 000. Esta instalación cuenta con 782 metros cuadrados de superficie para bodega y oficinas [43].
- Materia prima: El costo de la escoria de aluminio tiene un precio que se negocia con cada fundidora de aluminio y para el análisis financiero se tomó de referencia el precio suministrado por una empresa fundidora ubicada en la región por un valor de \$100 000 COP por tonelada. Por otro lado, se definió que el empaque del producto sería en polipropileno de la empresa SoloStocks [44], empaque para una capacidad de 25 kg de alúmina-espínela. El costo de cada unidad es de \$450 COP, este valor se incluye en los costos de producción del Anexo 15. El llenado en el empaque se realiza de forma manual por un operario utilizando la balanza electrónica hasta alcanzar el peso declarado en el empaque.
- Servicios de energía y agua: Los costos operativos se calcularon para un plan de producción diario de ocho horas, 24 días laborales durante el mes y 12 meses al año. Los costos de energía se calculan con la tarifa de energía (\$/KWh) que fue suministrada por una empresa que tiene instalaciones en Yumbo, Valle del Cauca, que sirve de referencia para este proyecto, dado que no existe una tarifa estándar para la industria y por ello cada empresa tiene diferente tarifa con el proveedor de energía dependiendo diferentes factores como tensión, sector, distribución, etc. Finalmente, el costo de la energía se calculó multiplicando la tarifa de energía \$ 577 KWh por el consumo eléctrico de cada equipo que está definido en la ficha técnica suministrada por el proveedor. El costo del agua se calculó con la tarifa definida para el sector industrial por la empresa EMCALI (\$3636/m<sup>3</sup>) [45] multiplicada por la cantidad de agua requerida por tonelada que es de 500 litros por tonelada de escoria. El cálculo se realizó teniendo en cuenta que la escoria de aluminio debe sumergirse en agua por una semana para que la reacción elimine los nitratos de la escoria en forma de gas amoníaco. El agua resultante del proceso debe someterse a estudio para conocer si puede ser vertida directamente a la red de alcantarillado público o debe pasar por algún tratamiento especial para cumplir con las normas legales vigentes. El estudio de agua puede ser una continuación de la presente investigación.
- Salarios: Se definió que la cantidad de personal necesario para proceso está integrada por seis operarios, un supervisor y un gerente general. Los operarios devengarían un salario mínimo mensual legal vigente (SMMLV) que para el año 2023 se estableció en Colombia un valor de \$1 160 000 COP [46] y a ese valor se suman el costo de las prestaciones sociales y parafiscales, totalizando un costo de \$ 1 769 654 COP para el empleador. En cuanto al salario para el supervisor y el gerente, se encontró en las páginas web de empleo que un supervisor de producción recibe en el mercado laboral un salario promedio mensual de \$ 1 672 564 COP [46], y sumando las prestaciones sociales se totaliza un valor para el empleador de \$2 478 816 COP. De la misma manera, para el gerente se encontró un salario promedio mensual de \$4 609 954 [48], sumando las prestaciones sociales, el valor asciende hasta los \$6 378 117 para el empleador.
- Inversiones en maquinaria y equipo: Para evaluar la inversión necesaria para la instalación de la planta de producción se consultaron múltiples proveedores de equipos industriales que fabrican o comercializan la maquinaria requerida. El nombre del equipo, la cantidad, la capacidad de procesamiento y el precio se expresan en la Tabla VIII. Los precios fueron suministrados por las cotizaciones enviadas por los proveedores de cada máquina. La capacidad máxima se calculó con la ficha técnica del equipo y para los dos hornos se estimó la capacidad máxima por falta de conocimiento empírico con el equipo.

TABLA VIII.

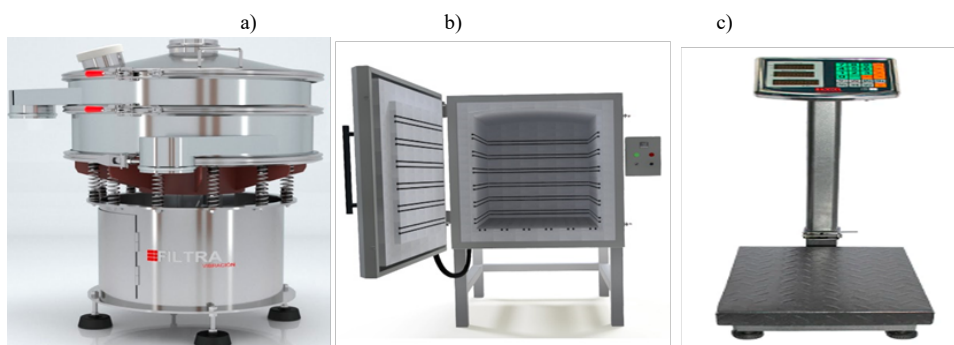
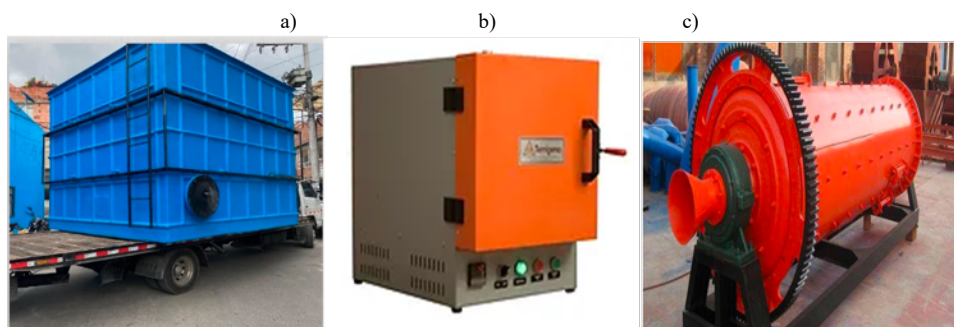
EQUIPOS REQUERIDOS PARA LA PRODUCCIÓN

Nombre del Equipo	Cantidad	Capacidad	Precio Unitario
-------------------	----------	-----------	-----------------

Horno HSL 1000 para secado	2	770 kg	\$ 49 993 067
Molino de Bolas	1	700 kg/hora	\$ 56 265 497
Horno CC-500E para calcinación	8	220 kg	\$ 32 797 820
Tamizadora	3	300 kg/h	\$ 20 100 000
Tanque	3	18 m <sup>3</sup>	\$ 23 710 000
Báscula	1	500 kg	\$ 243 950

La escoria de aluminio proveniente de las fundidoras se almacena en el interior de la planta en uno de los tanques de almacenamiento como la figura 21.a, que tiene capacidad de 71 toneladas para escoria seca. Posteriormente, se traslada la escoria a un segundo tanque de igual dimensión para ser sumergida en agua. El segundo tanque puede almacenar 24 toneladas de escoria y seis metros cúbicos de agua; este proceso debe durar una semana.

Posteriormente la escoria se debe secar en el horno HSL1000 (figura 21.b) durante dos horas a 220 °C, para eliminar la mayor cantidad de humedad. Después del secado, se ingresa la escoria en el molino de bolas (figura 21.c) el cual se programa por una hora hasta alcanzar el tamaño de partícula deseado. Cabe resaltar, que durante la molienda se realizan múltiples paradas del equipo para visualizar el estado de la escoria y determinar si se requiere someterla por más tiempo de molido y alcanzar el tamaño de partícula ideal. En seguida se traslada el material a la tamizadora, mostrada en la figura 22.a, para separar las partículas de mayor tamaño y reprocesarlas en el molino. Luego se lleva la escoria pulverizada al horno de calcinación (figura 22.b) para ser sometida a una temperatura de 1 200 °C por un periodo de cuatro horas. A continuación, se retira del horno la escoria convertida en alúmina-espínela, y debido a que se encuentra a una temperatura muy elevada para ser manipulada, se traslada el compuesto a una zona de la planta, donde se lo ubica sobre una placa-base de área 36 m<sup>2</sup> fabricada con ladrillos refractarios que permiten sobreponer, seguramente el compuesto, para reposarlo hasta alcanzar temperatura ambiente. Después, se traslada la alúmina-espínela nuevamente al molino para hacer la molienda por una hora debido a que la alta temperatura sinteriza el compuesto y se forman grandes bloques. Finalmente, la alúmina molida se tamiza para obtener el tamaño de partícula deseado y se transporta hasta el tercer tanque de producto terminado para ser empacada por los operarios en los sacos de polipropileno. El compuesto es empacado haciendo uso de la balanza (figura 22.c) hasta alcanzar el peso neto de 25 kg. La ubicación de los equipos para cada una de las etapas del proceso se determinó mediante una distribución de planta propuesta en el Anexo 15.



De acuerdo con los equipos elegidos para la producción de alúmina-espinela, se construyó el flujo de caja para evaluar un periodo de cinco años teniendo en cuenta los siguientes factores:

- Fuente de financiación: Se definió que el proyecto sería financiado en un 50% de la inversión a través de un crédito bancario con una de las tasas más bajas del mercado. La tasa más atractiva encontrada fue la del Banco de Occidente con una tasa efectiva anual de 22,42% para créditos de libre inversión [55]. El crédito se fijó para un valor de \$275 154 071 COP y se amortizó con cuota fija para cinco años sin periodo de gracia. La tasa de oportunidad del inversionista que se definió para el proyecto es equivalente a la tasa de crédito del banco más cinco puntos, es decir, 27,42%.
- Inflación: Los costos de producción se pretenden proyectar con un incremento anual equivalente a la inflación del IPC que según el Banco de la República a finales de 2023 tanto la inflación total como la básica (SAR) alcanzaría el 8,7 %, y a diciembre de 2024 se situarían en el 3,5 % y 3,8 %, respectivamente [56]. Pero estos pronósticos tienen una incertidumbre elevada como lo indica el mismo Banco de la República, por lo tanto, se definió un incremento porcentual del 5% para los cinco periodos de evaluación financiera del proyecto.

Con base en las condiciones de producción explicadas anteriormente, la cantidad de unidades de 25 kg producidas con la cantidad de materia prima disponible y el rendimiento en los equipos, se pueden producir diariamente 90 bultos, lo que equivale a 25,978 bultos anuales. Se realizó el cálculo de materia prima con una cantidad de 75 toneladas cada mes sin incremento anual. El impuesto de renta para el análisis financiero es del 32% y la depreciación de los equipos se calculó con el método de línea recta con una vida útil de 10 años para los equipos.

El flujo de caja del proyecto se estableció con un precio de venta mínimo para la alúmina-espinela usando la herramienta Solver de Excel fijando el VPN igual a cero, todo con la finalidad de que el proyecto sea viable financieramente y el producto sea competitivo en el mercado. En la Tabla IX se establecen los diferentes rubros del flujo de caja del proyecto con el precio mínimo. Es importante destacar que el flujo de caja se enfoca hacia la parte operativa de la implementación del proceso productivo.

TABLA IX.

FLUJO DE CAJA DEL PROYECTO

		0	1	2	3	4	5
<b>Ingreso Ventas</b>	\$		1,257,111,049	1,319,966,601	1,385,964,931	1,455,263,178	1,528,026,337
<b>UNIDADES PRODUCIDAS</b>	UND		25,978	25,978	25,978	25,978	25,978
<b>PRECIO POR UNIDAD</b>	\$		48,391	50,811	53,351	56,019	58,820
<b>Costos Operativos</b>	\$		898,672,655	943,606,288	990,786,602	1,040,325,933	1,092,342,229
<b>Utilidad Bruta</b>	\$		358,438,393	376,360,313	395,178,329	414,937,245	435,684,107
<b>Depreciaciones</b>	\$		55,030,812	55,030,812	55,030,812	55,030,812	55,030,812
<b>Amortizaciones</b>	\$		96,949,744	96,949,744	96,949,744	96,949,744	96,949,744
<b>Utilidad Antes de Impuestos</b>	\$		206,457,837	224,379,757	243,197,772	262,956,689	283,703,551
<b>Impuesto sobre la Renta</b>	\$		66,066,508	71,801,522	77,823,287	84,146,140	90,785,136

<b>Utilidad Neta o Pérdida</b>	\$		140,391,329	152,578,235	165,374,485	178,810,548	192,918,415
<b>Depreciaciones</b>	\$		55,030,812	55,030,812	55,030,812	55,030,812	55,030,812
<b>Inversión</b>	\$	(550,308,141)					
<b>Flujo de Caja Neto</b>	\$	(550,308,141)	195,422,141	207,609,047	220,405,297	233,841,360	247,949,227

A partir del flujo de caja del proyecto se obtuvieron los indicadores de evaluación de proyectos. Los indicadores analizados son el costo de capital promedio (WACC), el valor presente neto (VPN), la tasa interna de retorno (TIR), *Return on Capital Employed* (ROCE). Los resultados obtenidos están expuestos en la Tabla X.

TABLA X.  
INDICADORES DE EVALUACIÓN DE PROYECTOS

<b>Indicadores de Evaluación de Proyectos</b>	
<b>WACC</b>	21.33%
<b>VPN</b>	0
<b>Tasa de Oportunidad</b>	27%
<b>TIR</b>	21.33%
<b>ROC – ROKA -ROCE</b>	65.13%

4) Costo del proceso de producción del producto a base de alúmina-espínela

De acuerdo con el resultado entregado por Solver de Excel haciendo un VPN igual a cero, se obtiene un precio de venta del producto en planta de \$48 391 por bulto de 25 kg que es un valor muy inferior al precio comercial de la alúmina de \$320 000, por lo tanto, el resultado de la evaluación financiera habilita la posibilidad de rentabilidad del proyecto.

Ahora bien, se debe calcular el costo de opalizado de vidrios con alúmina-espínela mediante el proceso de *SB*. Este proceso utiliza aire comprimido para propulsar partículas abrasivas a altas velocidades sobre la superficie a marcar. Para ello se requiere un conjunto de herramientas y equipos para realizar la actividad con éxito, algunas de ellas corresponden a: tolva, casco, peto, tubo enfriador, manguera, acople, boquilla y acetato.

En la visita a Vidrios Opalizados Ramírez, se observaron los diferentes equipos que son utilizados en el proceso y se evidenció el uso de la alúmina comercial con el equipo aspersor en un cuarto cerrado que evita que la alúmina se desperdicie y pueda ser reutilizada. De acuerdo a lo observado, para comparar el costo de la alúmina comercial frente a la alúmina-espínela se estableció la variable \$/cm<sup>2</sup> para relacionar el costo del producto por gramo y la cantidad de material usado para opalizar determinada área de vidrio.

Mediante entrevista con el personal de la empresa, se validó la información en cuanto al precio de la alúmina comercial adquirida por la misma, el rendimiento del producto en los vidrios para la comparación de los costos y el costo del producto por centímetro cuadrado (Véase Tabla XI).

TABLA XI.  
COMPARACIÓN DE COSTOS DE LAS ALÚMINAS

	Costo por bulto (25 Kg)	Consumo (g/cm <sup>2</sup> )	Costo (\$/cm <sup>2</sup> )
Alúmina comercial	\$ 320 000	6.1	78.9
Alúmina-Espinela	\$48 391	19.4	37.6

Conforme a los resultados expresados en la Tabla XI, se determina que el costo de fabricar alúmina-espinela, con las condiciones productivas expuestas previamente, es inferior a la alúmina comercial en 84.9% de su costo. Sin embargo, el rendimiento de la alúmina-espinela es aproximadamente 3 veces inferior a la comercial, no obstante, la relación costo-rendimiento (\$/cm<sup>2</sup>) indica que la alúmina-espinela es más económica; aproximadamente un 47.6%.

5) Rugosidad del producto prototipo

Por otro lado, se realizó la evaluación de la rugosidad del vidrio opalizado (prototipo), con el fin de hacer una comparación cuantitativa de las propiedades físicas del material, entre el vidrio opalizado con alúmina-espinela y el opalizado con alúmina comercial. La prueba de rugosidad evalúa las pequeñas irregularidades, acabado o textura presentes en la superficie (R1). Dicha prueba de puede ser realizada de dos maneras: con contacto y sin contacto. Para este caso se utilizó el método sin contacto, haciendo uso de un microscopio con sistema de medición 3D de área amplia de la marca Keyence, modelo VR-3200 (ver figura 23), ubicado en la Universidad Autónoma de Occidente de Cali.

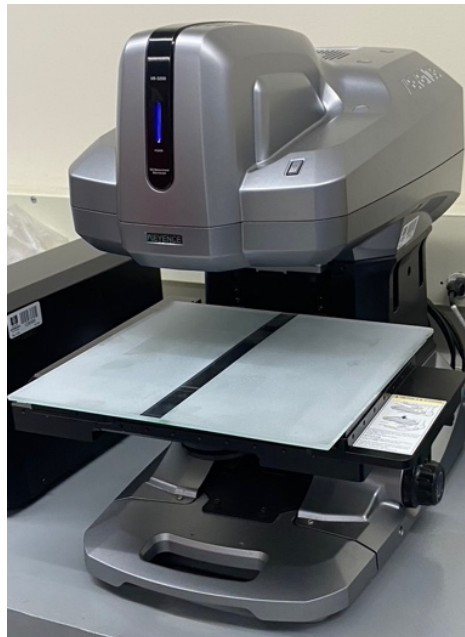


Fig. 23. Máquina Keyence durante la prueba de rugosidad.

Mediante el ensayo de rugosidad, se evaluaron dos aspectos principales, la rugosidad en línea y la rugosidad en área. En la primera, se evaluaron dos parámetros (Ra y Rz). El Ra es el promedio de las variaciones de altura entre los diferentes puntos de una línea, mientras que el Rz es el cálculo de la desviación entre los picos más altos y bajos de dicha línea. Para el análisis inicial se tomaron diferentes líneas cada una con diferentes longitudes, como se muestra en la figura 24. Aquí fue posible evidenciar que, en los análisis de línea adjuntos en la Tabla XII, el vidrio opalizado con alúmina comercial presentó un Ra promedio de 3,33  $\mu\text{m}$ , mientras que el vidrio opalizado con alúmina-espinela fue de 4  $\mu\text{m}$ . Por otra parte, el Rz promedio para la alúmina comercial fue de 24,66  $\mu\text{m}$ , mientras que el del compuesto alúmina-espinela fue de 30,36  $\mu\text{m}$ . Demostrando así, que el acabado fue más uniforme para la alúmina comercial ya que los picos fueron más cercanos.

a)

b)

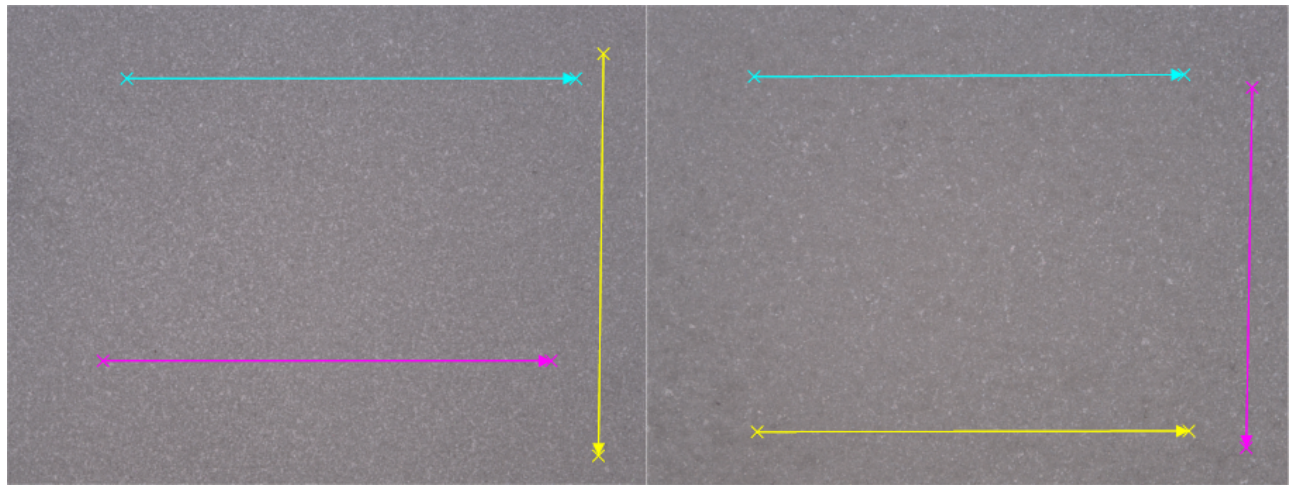


Fig. 24. Muestra para prueba de líneas del vidrio opalizado con a) Alúmina comercial. b) Alúmina-espinela

TABLA XII.

RUGOSIDAD: PRUEBA DE LÍNEAS

Rugosidad - Prueba de líneas			
Vidrio Opalizado - Alúmina Comercial		Vidrio Opalizado - Compuesto Alúmina-Espinela	
Ra	Rz	Ra	Rz
3 $\mu\text{m}$	24 $\mu\text{m}$	4 $\mu\text{m}$	28 $\mu\text{m}$
3 $\mu\text{m}$	26 $\mu\text{m}$	4 $\mu\text{m}$	27 $\mu\text{m}$
4 $\mu\text{m}$	24 $\mu\text{m}$	4 $\mu\text{m}$	36 $\mu\text{m}$

Por otro lado, para el análisis de las áreas se evaluaron dos parámetros ( $S_a$  y  $S_z$ ). Donde  $S_a$  es el promedio de las variaciones de altura entre los diferentes puntos del área evaluada y  $S_z$  es el cálculo de la desviación entre los picos más altos y bajos del área. En el caso de este método se realizó la toma de dos muestras de área por cada tipo de vidrio como se puede observar en la figura 25.

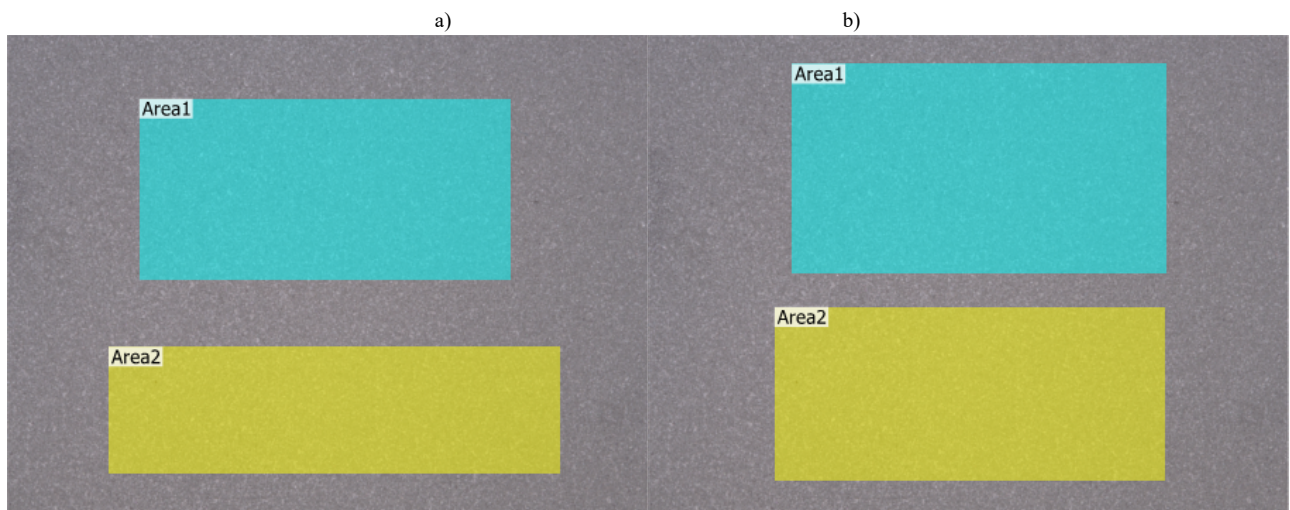


Fig. 25. Muestra para prueba de áreas del vidrio opalizado con a) Alúmina comercial. b) Alúmina-espinela

TABLA XIII  
RUGOSIDAD: PRUEBA DE ÁREAS

Rugosidad - Prueba de áreas			
Vidrio Opalizado - Alúmina Comercial		Vidrio Opalizado - Compuesto Alúmina-Espinela	
Sa	Sz	Sa	Sz
5 μm	46 μm	6 μm	50 μm
5 μm	44 μm	5 μm	45 μm

Aquí fue posible evidenciar que, en los análisis de las áreas adjuntos en la Tabla XIII, el vidrio opalizado con alúmina comercial presentó un Sa promedio de 5 μm, mientras que el vidrio opalizado con alúmina-espinela fue de 5,5 μm. Por otra parte, el Sz promedio para la alúmina comercial fue de 45 μm, mientras que el del compuesto alúmina-espinela fue de 47,5 μm. Demostrando una vez más, que el acabado fue más uniforme para la alúmina comercial ya que los picos fueron más cercanos, mientras que el compuesto está evidenciando una rugosidad mayor al de la alúmina comercial.

Ahora bien, para poder analizar la rugosidad como un indicador del diseño propuesto, se tiene en cuenta que se evalúa el porcentaje de diferencia entre la rugosidad del vidrio opalizado con óxido de aluminio y el opalizado con alúmina-espinela. Para poder realizar este porcentaje se tiene como valor de rugosidad (R) a los promedios de los valores de Ra y Sa de cada uno de los vidrios analizados, donde n es el número de pruebas tomadas. Esto quiere decir que la ecuación para encontrar el valor de R en el caso de la prueba de línea es:

$$R = \frac{Ra_{(1)} + Ra_{(2)} + \dots + Ra_{(n)}}{n} \quad (6)$$

También, para el cálculo de los porcentajes de diferencia se realizó la ecuación generalizada de la siguiente manera,

$$\% \text{ de diferencia} = \left| \frac{R(\text{vidrio opalizado con alúmina comercial}) - R(\text{vidrio opalizado con compuesto alúmina-espinela})}{R(\text{vidrio opalizado con alúmina comercial})} \right| * 100 \quad (7)$$

Por lo tanto, en la tabla XIV se resumen los resultados de la rugosidad obtenida durante la prueba.

TABLA XIV.  
PROMEDIO DE RUGOSIDAD DE ALÚMINA COMERCIAL VS. ALÚMINA-ESPINELA

Promedio de Rugosidad					
Vidrio Opalizado - Alúmina Comercial		Vidrio Opalizado - Compuesto Alúmina-Espinela		Porcentajes de diferencia entre Alúmina comercial y Compuesto Alúmina - Espinela	
R - Prueba de línea	R - Prueba de área	R - Prueba de línea	R - Prueba de área	% De diferencia Prueba de línea	% De diferencia Prueba de área
3,33 μm	5 μm	4 μm	5,5 μm	20 %	10 %

En conclusión, en la Tabla XIV se puede ver cómo en los dos métodos para medir la rugosidad, el prototipo cumple con la meta enunciada en la Tabla III, donde la diferencia entre el vidrio opalizado con óxido de aluminio y el de alúmina-espinela es menor o igual al 20%, por lo cual se está cumpliendo con el requisito de compatibilidad del material obtenido con el que comúnmente se encuentra en el mercado. Sin embargo, se puede evidenciar que hay dos características importantes en la prueba. Por un lado, cuando se realiza la medición por área el resultado en rugosidad es mucho más similar entre los vidrios. Y por el otro lado, aunque sí se está cumpliendo con el requisito, en ambas pruebas se evidenció que el vidrio con alúmina comercial presenta un acabado más homogéneo como se puede ver en la siguiente imagen comparativa, pues si se mira el acabado del vidrio opalizado con alúmina espinela, se pueden ver encerradas en círculos rojos las irregularidades. (Véase figura 26.a, 26.b y 27)

a)

b)

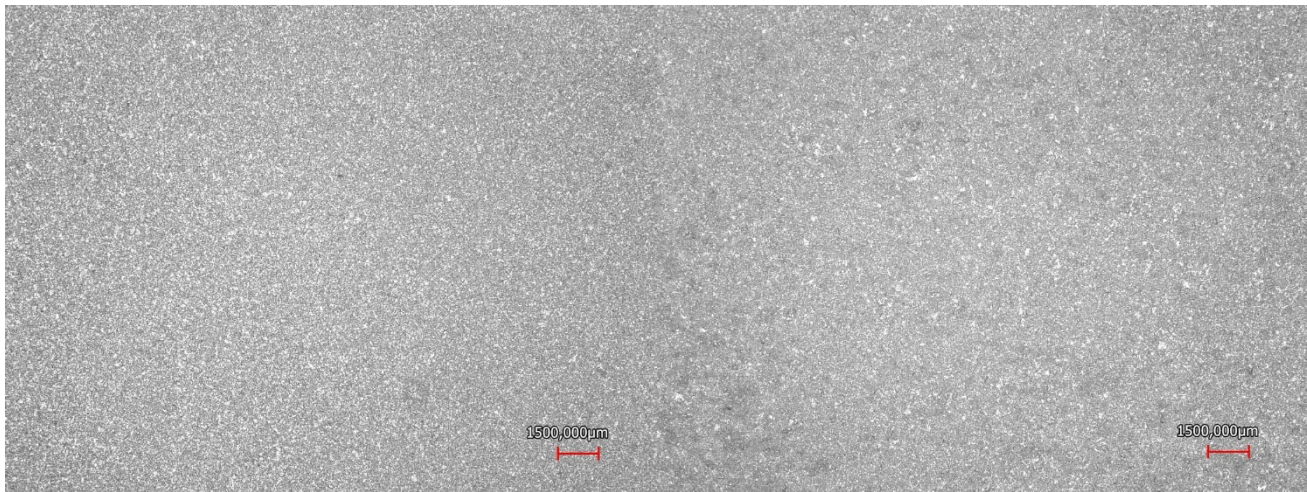


Fig. 26. Acabado del vidrio opalizado a) alúmina comercial. b) alúmina-espinela.

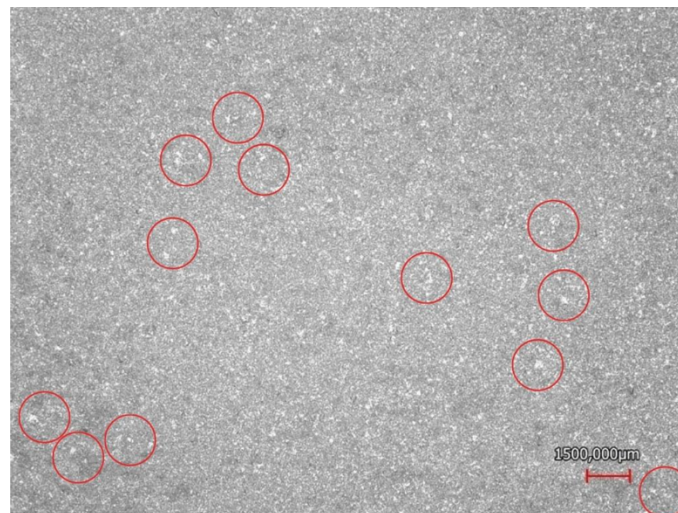


Fig. 27. Irregularidades del acabado del opalizado con alúmina-espinela.

## V. VERIFICAR.

### A. Medición de los impactos

Como etapa final, se realizó una medición de los impactos que este tuvo en los ámbitos social, financiero y ambiental. Por el lado ambiental, como se ha mencionado en varias ocasiones, el desarrollo de este diseño logró reutilizar un material que comúnmente es desechado en la industria lineal, como lo es la fundición de aluminio, para ser implementado dentro de un nuevo proceso productivo y así entrar en una economía circular.

El desarrollo de este diseño se realizó a nivel de laboratorio, sin embargo, al extrapolarlo y llevarlo a la industria vallecaucana, el impacto ambiental se evidencia de manera directa dentro de la industria metalmecánica, específicamente en la fundición de aluminio, donde aproximadamente el 4,3% de este aluminio fundido se convierte en escoria de aluminio, la cual estaría siendo utilizada en el mercado de los vidrios opalizados con un rendimiento de un 76,88% gracias a la implementación del diseño propuesto. Esto causaría una disminución de la contaminación de los rellenos sanitarios donde la escoria de aluminio produce gases tóxicos y lixiviados que contaminan los afluentes hídricos.

Teniendo en cuenta que Alúmina SA es la empresa más grande en fundición de aluminio en el Valle del Cauca, se puede calcular el impacto de este diseño si la compañía fuese a implementarlo, pues esta produce aproximadamente 1 000 toneladas de aluminio al mes de las cuales se podrían aprovechar 50 toneladas ya que son aquellas que se convierten en escoria de aluminio, en los procesos de fundición [57].

El impacto financiero de poner en funcionamiento una planta industrial que procese 75 toneladas de escoria de aluminio cada mes, requiere una inversión en equipos industriales de origen nacional e importado por un valor de \$ 550 308 141 COP. Para financiar la inversión, se contempla la posibilidad de obtener un 50% o más de los fondos a través de inversionistas, mientras que el restante se obtendría mediante un crédito bancario de libre inversión con una tasa de 22,42% EA sin periodo de gracia. La cantidad de producto terminado que se puede producir con la inversión en los equipos descritos en el Anexo 15 es de 90 bultos de 25 kg cada mes. Los costos de nómina mensuales suman \$19 474 857 y los costos de agua, energía, materia prima y arriendo ascienden a \$55 414 531; sumando estos dos se obtiene el costo operativo mensual de \$74 889 388.

Con base en las características del proceso descrito previamente con sus costos y gastos, el análisis financiero del proyecto con el flujo de caja y los indicadores de evaluación de proyectos, se determina que para un inversionista que exija una rentabilidad de su capital del 27,4% anual, el producto tendría un precio de venta en planta de \$48 391 COP que es un valor inferior al de la alúmina comercial suministrado por Opalizados Ramírez de \$320 000, demostrando ser un proyecto muy atractivo para un inversionista. Adicionalmente, con base en el indicador de evaluación ROC se determina que la rentabilidad del proyecto por cada unidad monetaria de capital aportado por el inversionista es del 65,1% antes de gastos, amortizaciones e impuestos para el primer año. Este indicador es de alta importancia debido a que es un ratio financiero que representa el porcentaje de retorno del dinero por unidad de inversión teniendo en cuenta solamente los costos de producción, que son el enfoque principal del análisis financiero para este proyecto.

El impacto financiero en la empresa que utilizó la alúmina-espínela para opalizar vidrios se ve reflejado en el menor costo de materia prima, dado que es altamente inferior al costo de la alúmina comercial, sin embargo, con el compuesto, se requiere mayor cantidad del mismo por cada centímetro cuadrado de vidrio y mayor cantidad de tiempo de trabajo, por este motivo, el personal de la empresa Opalizados Ramírez durante la entrevista (ver Anexo 14) manifiesta que el compuesto es poco atractivo al incrementar el tiempo de trabajo, por lo tanto, se recomienda incrementar el tamaño de partícula del compuesto con la finalidad de reducir la volatilidad y pérdida de este e incrementar la eficiencia de trabajo durante el proceso.

Por otro lado, la ejecución del proyecto conlleva un impacto social debido a que contribuye a la generación de empleo por la contratación directa e indirecta del personal que se requiere para poner en funcionamiento la planta de producción. En el análisis se consideró el personal integrado por un gerente, un supervisor y seis operarios, pero también puede involucrarse personal técnico en mantenimiento, auxiliar contable, guardas de seguridad etc., que es personal indirecto del proceso productivo.

### B. Estandarización de la solución

Con el objetivo de estandarizar el proceso de aprovechamiento del componente alúmina-espínela extraído de la escoria de aluminio, se ha tomado como punto de partida el proceso planteado en el trabajo previo realizado por Orozco y Vega (2022). El desarrollo incluye la etapa de molienda de la escoria de aluminio, seguida por una etapa de calcinación donde se implementa un proceso para la recuperación de alúmina-espínela. Bajo esta premisa, la estandarización de la solución se basa en la propuesta de procesamiento realizada por el grupo 202 (ver figura 13), sin estar específicamente enfocada en resolver un problema particular. Por lo tanto, se ha optado por utilizar un manual de usuario que permita una completa comprensión del proceso estandarizado, abordando cada etapa de manera procedimental y siguiendo especificaciones técnicas de diseño, así como pautas de seguridad y salud en el trabajo.

#### 1. Objetivo

Establecer las condiciones necesarias para estandarizar el proceso de aprovechamiento del componente alúmina-espínela obtenido de la escoria de aluminio.

#### 2. Alcance y campo de aplicación

El manual se enfoca en establecer las actividades, especificaciones técnicas y medidas de seguridad para los posibles operarios responsables de llevar a cabo el proceso de aprovechamiento del componente alúmina-espínela obtenido de la escoria de aluminio.

#### 3. Manual de procedimientos y especificaciones

##### 3.1. Apagado y secado de escoria de aluminio

TABLA XV

ESTANDARIZACIÓN DEL APAGADO Y SECADO DE LA ESCORIA DE ALUMINIO.

	Pasos a seguir:	Especificaciones
--	-----------------	------------------

<b>Equipos de seguridad:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Guantes de nitrilo</li> <li>• Mascarilla 3M 7000</li> <li>• Botas de seguridad</li> <li>• Gafas protectoras</li> <li>• Vestimenta de manga larga</li> <li>• Delantal resistente al calor.</li> </ul>	1. Colocar la escoria de aluminio en un recipiente de acuerdo con su capacidad y agregar agua.	- La proporción de agua con relación a la masa de escoria es de 0,8 litros por kilogramo. - Evitar derrames de agua.
	2. Cubrir el recipiente con plástico para evitar interferencias en el proceso.	- Realizar perforaciones alrededor del área cubierta por el plástico para permitir la liberación de gases.
<b>Eventos que se deben evitar:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ruptura de recipientes</li> <li>• Derrame de agua sobre el cuerpo</li> <li>• Obstrucción de los pequeños orificios de salida de gases</li> <li>• Interrupción del proceso con la presencia de agua de lluvia</li> <li>• Horno en mal estado y pérdidas de material</li> </ul>	3. Esperar durante cinco días.	- Mantener un control diario del nivel de agua. - Prevenir posibles obstáculos en el proceso protegiendo la muestra de contratiempos meteorológicos.
	4. Verter la escoria de aluminio húmeda en recipientes adecuados en función de la cantidad de escoria.	- Utilizar un recipiente de aluminio para llevarlo al horno de secado.
	5. Colocar el recipiente con la escoria de aluminio y agua en el horno de secado (referencia: HSL 1000).	- El horno de secado debe tener una temperatura mínima de 100 °C. - Asegurar una capacidad de funcionamiento de al menos 24 horas.

### 3.2. Molienda de escoria de aluminio

TABLA XVI

#### ESTANDARIZACIÓN DE LA MOLIENDA DE LA ESCORIA DE ALUMINIO.

	Pasos a seguir	Especificaciones
<b>Equipos de seguridad requeridos:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Botas de seguridad</li> <li>• Mascarilla 3M 7502</li> <li>• Gafas protectoras</li> <li>• Protectores auditivos.</li> </ul>	1. Añadir la escoria de aluminio previamente secada al molino de bolas según su capacidad.	- La proporción de kilogramos de bolas de hierro es de 1,5 por kilogramo de escoria de aluminio introducida - Mantener los estándares de seguridad recomendados para el manejo de la máquina - Cantidad de escoria de aluminio insertada de 20% de la capacidad del molino
	2. Programar el molino de manera adecuada para lograr una molienda eficiente.	- Programar la máquina para funcionar durante 30 minutos a una velocidad de 1000 RPM
<b>Eventos que se deben evitar:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Programación incorrecta de tiempo de trabajo del molino de bolas</li> <li>• Pérdidas excesivas de material</li> <li>• Falta de aseguramiento adecuado de las guardas de seguridad del molino de bolas</li> <li>• Número insuficiente de bolas.</li> </ul>	3. Agregar escoria de aluminio molida en recipientes plásticos	- Minimizar la pérdida de material, durante el proceso de molienda y en los tratamientos posteriores.

### 3.3. Tamizaje de escoria de aluminio

TABLA XVII

#### ESTANDARIZACIÓN DEL TAMIZAJE DE LA ESCORIA DE ALUMINIO.

	Pasos a seguir	Especificaciones
<b>Equipos de seguridad:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mascarilla 3M 7502</li> <li>• Protectores auditivos</li> <li>• Botas de seguridad.</li> </ul>	1. Añadir la escoria de aluminio previamente molida a una zaranda para eliminar partículas de gran tamaño.	- Realizar el zarandeado durante aproximadamente dos minutos y retirar partículas resultantes en la malla.
	2. Colocar la escoria de aluminio previamente zarandeada en el tamiz de malla No. 60.	- La proporción aproximada de escoria, basada en el área de la circunferencia del tamiz, es de 8 g/mm <sup>2</sup>
<b>Eventos que se deben evitar:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Programación incorrecta de tiempo de trabajo de la tamizadora eléctrica</li> <li>• Posicionamiento incorrecto de los tamices en la tamizadora</li> <li>• Manejo inadecuado de los elementos de seguridad de la máquina</li> <li>• Presencia de trozos grandes de material en los tamices</li> <li>• Presencia de impurezas en la escoria de aluminio molida.</li> </ul>	3. Programar el tamiz eléctrico y asegurarse de ubicar correctamente los tamices y los elementos de seguridad.	- Tiempo de programación de cinco minutos
	4. Separar la escoria de aluminio que pasa a través de las mallas del tamiz y la escoria de aluminio que queda retenida en la malla.	- Separar y etiquetar en bolsas la escoria de partículas iguales o inferiores a 250 µm, al igual que las partículas de mayor tamaño al mencionado. - Conservar la escoria de aluminio que no pasa por el tamiz de malla No. 60 para realizar un reproceso.

El material retenido en la malla No. 60 tiene un reproceso; este se reintegra al material que será molido, siguiendo los pasos de la Tabla XVI, con el objetivo de obtener partículas de menor tamaño. Posteriormente, se realiza un nuevo tamizado con el fin de incrementar el rendimiento de escoria de aluminio tamizada en términos de gramaje.

### 3.4. Calcinación de escoria de aluminio

TABLA XVIII

#### ESTANDARIZACIÓN DE LA CALCINACIÓN DE LA ESCORIA DE ALUMINIO.

	Pasos a seguir	Especificaciones
<b>Equipos de seguridad:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Botas de seguridad</li> <li>• Mascarilla 3M 7502</li> <li>• Gafas protectoras</li> <li>• Protectores auditivos</li> <li>• Traje aluminizado para altas temperaturas.</li> </ul>	1. Pesar la escoria de aluminio a calcinar y ubicarla en la superficie resistente al calor.	- Superficie de distribución y disposición de la escoria de aluminio: Resistente a altas temperaturas (1100 °C). - La proporción recomendada de escoria por unidad de superficie (en este caso ladrillo refractario) es de aproximadamente 2 g/cm <sup>2</sup> - La superficie debe ser plana para garantizar una calcinación homogénea del material. - Se recomienda utilizar un molde para prevenir derrames.
	2. Programar el horno (referencia: CC-500E) adecuadamente.	- La programación del horno se recomienda sin el uso de rampas de calentamiento, y el tiempo de calcinación sin rampa de enfriamiento es de cuatro horas.
<b>Eventos que se deben evitar:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pérdidas excesivas de material al ubicarlo en la superficie designada</li> <li>• Programación deficiente del horno</li> <li>• Pesos inferiores al estándar establecido</li> <li>• No realizar perforaciones adecuadas para la entrada de calor</li> <li>• Derramamiento excesivo de material dentro del horno.</li> </ul>	3. Esperar un tiempo apropiado y retirar el componente alúmina-espinela de la superficie y almacenarlo.	- Se sugiere esperar aproximadamente una hora antes de manipular el material para evitar quemaduras. En caso de ser necesario, se deben usar guantes resistentes al calor.

		- Para retirar la escoria, se deben utilizar instrumentos resistentes y adecuados para altas temperaturas.
--	--	--

En el proceso de calcinación, se registra una pérdida de material aproximada del 22%. Con el propósito de establecer una estandarización más eficiente en este procedimiento, resulta imperativo implementar métodos de carga y descarga de superficie que minimicen dicha pérdida y prevengan la contaminación del material, lo cual representa un obstáculo para el desarrollo fluido del proceso.

### 3.5. Molienda componente alúmina-espínela

TABLA XIX

ESTANDARIZACIÓN DE LA MOLIENDA DE LA ALÚMINA-ESPÍNELA.

Equipos de seguridad:	Pasos a seguir	Especificaciones
<ul style="list-style-type: none"> <li>Mascarilla 3M 7502</li> <li>Botas de seguridad</li> <li>Guantes de nitrilo</li> <li>Bata de laboratorio</li> <li>Protectores auditivos</li> <li>Gafas protectoras</li> </ul>	1. Introducir la cantidad de componente alúmina-espínela en el molino de bolas:	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Limpieza previa del molino.</li> <li>- La proporción de kilogramos de bolas de hierro es de 1,5 por kilogramo de escoria de aluminio introducida</li> <li>-Cantidad de alúmina-espínela insertado de 20% de la capacidad del molino</li> </ul>
<b>Eventos que se deben evitar:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Programación inadecuada del tiempo de operación del molino de bolas</li> <li>Pérdidas excesivas de material</li> <li>Aseguramiento deficiente de las guardas de seguridad del molino de bolas</li> <li>Número insuficiente de bolas en el molino</li> <li>Exceso de material vertido en el molino</li> </ul>	2. Programación de variables de molienda.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tiempo: 15 min</li> <li>-Velocidad: 1000 RPM.</li> <li>-Activar seguros del equipo.</li> </ul>
	3. Ubicar la alúmina-espínela del molino de bolas en una superficie plana para evitar pérdidas de material.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Minimizar la pérdida del material durante el proceso al verter cuidadosamente el resultado en los recipientes.</li> <li>- Recipiente de aluminio plano tipo bandeja.</li> </ul>

En este último proceso de molienda de la alúmina-espínela, en promedio, se presentan pérdidas del 1,30%. Por lo tanto, para reducir esta cantidad, es necesario utilizar herramientas como brochas para limpiar y aprovechar al máximo las partículas que permanezcan adheridas a las paredes del molino o a las bolas de hierro.

### 3.6. Control de calidad

TABLA XX

ESTANDARIZACIÓN DEL CONTROL DE CALIDAD.

Equipos de seguridad:	Pasos a seguir	Especificaciones
<ul style="list-style-type: none"> <li>Mascarilla 3M 7502</li> <li>Botas de seguridad</li> <li>Bata de laboratorio</li> <li>Guantes de nitrilo</li> </ul>	1. Tomar una muestra del componente alúmina-espínela y llevar a estudio de granulometría	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Granulometría a 250 gramos por cada 10 kilogramos de alúmina-espínela producidos.</li> <li>- Granulometría a través de un nuevo proceso de tamizaje</li> </ul>
<b>Eventos que se deben evitar:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Pérdidas de material en el análisis</li> <li>Control de calidad ineficiente</li> </ul>	2. Analizar los resultados de la muestra	<ul style="list-style-type: none"> <li>- El tamaño de partícula debe tener el porcentaje mayor en partículas que pasan por la malla No. 60 hasta las retenidas por la malla No. 100 (intervalo de cumplimiento). Tamaño igual o mayor al 70%</li> </ul>

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Incorrecta cantidad de alúmina-espínela analizada</li> </ul>		
---	--	--

### 3.7. Empaque y distribución

TABLA XXI

ESTANDARIZACIÓN DEL EMPAQUE Y DISTRIBUCIÓN DE LA ALÚMINA-ESPÍNELA.

Equipos de seguridad:	Pasos a seguir	Especificaciones
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mascarilla 3M 7502</li> <li>• Bata de laboratorio</li> <li>• Guantes de nitrilo</li> </ul>	1. Tomar la alúmina-espínela aprobada en control de calidad y empaquetar en bultos de poliéster.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Máquina automática de empaque especializada en polvos</li> <li>- Bultos de 25 kilogramos con un error del 2%, es decir, una tolerancia de <math>\pm 0,5</math> kg</li> </ul>
<b>Eventos que se deben evitar:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pérdidas excesivas de material al empaquetarlo</li> <li>• Bultos de empaque defectuosos</li> <li>• Contaminación del componente alúmina-espínela</li> <li>• Mala calibración de la báscula</li> <li>• Pesos mayores o inferiores a lo establecido</li> <li>• Envío de una carga que exceda la capacidad del camión.</li> </ul>	2. Sellado de empaque y almacenar.	- Sellado térmico.
	3. Distribución a empresas de vidrios opalizados.	- Ordenar la carga de acuerdo con la capacidad y tamaño del camión.

### C. Conclusiones

Una vez aplicado y validado el diseño, el equipo de trabajo llegó a las siguientes conclusiones.

1. La utilización del compuesto alúmina-espínela, usada como material abrasivo, y recuperada de la escoria de aluminio en la producción de vidrios opalizados mediante *sandblasting*, se muestra como una alternativa prometedora. Se demuestra que la alúmina-espínela es capaz de reemplazar eficientemente el óxido de aluminio convencionalmente utilizado en la industria. Pues, los resultados obtenidos revelaron que el compuesto alúmina-espínela permite obtener un opalizado en el vidrio, con un acabado de rugosidad con un rango de diferencia del 20% en comparación con el uso de alúmina comercial para la prueba de áreas y una rugosidad con un rango de diferencia del 10% para la comparación realizada en la prueba de líneas.
2. Las mejoras implementadas en el proceso llevado a cabo por el equipo de trabajo demostraron un incremento del 32,37% en el rendimiento del material en las pruebas realizadas a nivel laboratorio, en comparación con el proceso diseñado por Orozco y Vega (2022). Estos resultados destacan la efectividad y eficiencia de las modificaciones realizadas. La primera fue el uso de ladrillos refractarios frente al crisol en la calcinación de la escoria de aluminio. Estos ladrillos lograron una mejor distribución de la escoria de aluminio durante la calcinación, garantizando homogeneidad térmica en la transformación de la escoria de aluminio en alúmina-espínela. Además, este cambio en el proceso también permitió realizar la segunda mejora, pues con el uso de ladrillos refractarios se logró reducir el tiempo de calcinación en dos horas, ya que los ladrillos poseen mayor resistencia a altas temperaturas y son menos propensos a fisuras durante el proceso de calcinación en comparación al crisol.
3. Se validó la viabilidad financiera del proyecto mediante un análisis de flujo de caja proyectado a cinco años y la evaluación de indicadores clave como la TIR, VPN, WACC y ROC. Se determinó un precio de venta en planta del producto por \$48 391 COP para el bulto de 25 kg que se ajusta adecuadamente a los costos de operación y garantiza la rentabilidad deseada por parte de los inversionistas, la cual se sitúa en el 27,4%. Esto valida que el proyecto es financieramente sostenible y es una oportunidad de inversión atractiva siempre y cuando se desarrollen las condiciones de inversión, producción, costos y gastos establecidas en el análisis.

4. El análisis de la relación costo-rendimiento ( $\$/\text{cm}^2$ ) revela que el opalizado de vidrio utilizando alúmina-espínela es más económico en comparación del uso de la alúmina-comercial, con una diferencia del 47,6% que desde una perspectiva económica, la utilización del compuesto en el proceso de opalizado, ofrece una ventaja competitiva, además, desde una perspectiva ambiental, el uso de la alúmina-espínela proveniente de la escoria de aluminio, contribuye a los objetivos de sostenibilidad ambiental al aprovechar un residuo industrial y que es un factor que pueden considerar las empresas al adquirir la alúmina.

#### D. Recomendaciones

En cuanto a las recomendaciones, se proponen las siguientes mejorar y posibles puntos a estudiar en un futuro.

1. La fabricación de alúmina-espínela requiere el uso de agua en la etapa inicial del proceso. Sin embargo, actualmente existe desconocimiento acerca del estado químico del agua residual resultante. Por tanto, es de vital importancia llevar a cabo investigaciones para evaluar la calidad del agua residual y determinar si puede ser vertida directamente al servicio de alcantarillado o si requiere un tratamiento previo para cumplir con las normas legales y ambientales correspondientes. La determinación precisa del estado químico del agua residual reviste una importancia, ya que una descarga incontrolada podría representar un riesgo para el medio ambiente y la salud pública. Por consiguiente, se recomienda realizar un análisis que permita identificar los componentes presentes en el agua residual y evaluar su nivel de contaminación. En caso de detectar sustancias contaminantes que excedan los límites establecidos por la legislación vigente, será necesario implementar un tratamiento adecuado antes de verter el agua residual en el sistema de alcantarillado. Estas medidas contribuirán significativamente a garantizar la sostenibilidad y la responsabilidad ambiental en el proceso de fabricación de alúmina-espínela.
2. Se sugiere llevar a cabo una prueba de espectrofotometría, en particular utilizando la técnica de absorbancia. Esta prueba permitirá medir la cantidad de luz que es absorbida por el vidrio opalizado con alúmina comercial y con alúmina-espínela. Realizar la prueba de espectrofotometría ofrecerá resultados cuantitativos y comparativos sobre la capacidad de absorber la luz y con ello tener un parámetro directo de la eficiencia de la alúmina-espínela como materia prima en el opalizado del vidrio.
3. Para aplicaciones futuras, se sugiere iniciar el proceso de molienda utilizando una malla que permita el paso de partículas de tamaño superior, como la malla No. 40 o inferior. De esta manera, al finalizar el proceso de calcinado y segunda molienda, se obtendrá un tamaño de partícula que se encuentre entre la malla No. 60 y malla No. 50 con medidas entre 250 y 297  $\mu\text{m}$ . Esta recomendación se debe a que se observó que el tamaño de partícula resultante es considerablemente menor al tamaño de partícula requerido en el proceso de *sandblasting*. Esta diferencia afectó el proceso de opalizado, pues el material se dispersó en el entorno cuando se prendió la pistola, por lo que sería beneficioso incrementar el tamaño de partícula. Adicionalmente, sería oportuno emplear únicamente el material que durante el segundo tamizaje queda retenido en la malla No. 60, ya que es el tamaño requerido para el proceso.

## VI. GLOSARIO

*Escoria de aluminio:* Es el residuo procesado, obtenido después de la producción de aluminio metálico [5]. La escoria es un conglomerado complejo, que no solo incluye aluminio metálico, sino óxidos metálicos, nitruros, cloruros, sulfuros, carburos, suciedad e impurezas.

*Alúmina:* Es una materia prima industrial y es conocida también como óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) [5]. Es un material cerámico con propiedades fisicoquímicas como la alta resistencia a la compresión, alta rigidez dieléctrica, alta dureza, alta resistencia al choque térmico, alta resistencia a la abrasión, alta conductividad térmica, entre otras [6].

*Espínela:* Es el producto resultado de la reacción que se da entre el óxido de magnesio y el óxido de aluminio, creando  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$  [7].

*Calcinación:* Es un proceso donde a través del uso de calor, se busca descomponer un compuesto (carbonato, sulfato, hidróxido, etc.) en sus óxidos formadores [5].

*Escala de Mohs:* Es una escala donde se relacionan diez minerales ordenados de menor a mayor por su dureza [58].

*Material refractario:* los materiales refractarios se caracterizan por su elevada resistencia a las altas temperaturas sin deterioro de sus propiedades físicas y químicas.

*Abrasivo:* dicho de un producto que sirve para desgastar o pulir, por fricción, sustancias duras como metales, vidrios, etc. [59].

*Grata*: Escobilla de metal que sirve para limpiar, raspar o bruñir [60].

*Silicoaluminoso*: Los productos que consisten principalmente en agregados de alúmina, sílice y alúmino-silicatos.

## VII. REFERENCIAS

- [1] J. Osorio, “Caracterización y recuperación del aluminio presente en la escoria generada de los procesos de refusión en hornos tipo reverbero durante la producción de la aleación AA6063 con diferentes mezclas de aluminio reciclado,” Cali , 2015.
- [2] K. Llanos Ortega and J. Rodríguez Giraldo, “ESTUDIO DEL APROVECHAMIENTO DE LA ESCORIA DE ALUMINIO DE LA EMPRESA FUNDICIÓN AGRAM,” Cali , 2012.
- [3] D. Orozco Erazo and J. Vega Báez, “Estudio del efecto del tamaño de partícula de escoria de aluminio calcinada utilizada como remplazo parcial de cemento en las propiedades mecánicas de morteros,” Pontificia Universidad Javeriana Cali , Cali , 2022.
- [4] L. Trejo, M. del C. Zurita, F. Legorreta, Pérez. N.K, and D. Díaz, “Obtención de  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a partir de escoria de aluminio,” Pachuca, Hidalgo, Sep. 2021. Accessed: Sep. 08, 2022. [Online]. Available: <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/icbi/article/view/7998/8677>
- [5] L. He *et al.*, “Extraction of alumina from aluminum dross by a non-hazardous alkaline sintering process: Dissolution kinetics of alumina and silica from calcined materials,” *Science of the Total Environment*, pp. 3–12, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.146123.
- [6] H. N. Yoshimura, A. P. Abreu, A. L. Molisani, A. C. de Camargo, J. C. S. Portela, and N. E. Narita, “Evaluation of aluminum dross waste as raw material for refractories,” *Ceram Int*, vol. 34, no. 3, pp. 581–591, Apr. 2008, doi: 10.1016/J.CERAMINT.2006.12.007.
- [7] “Primary Aluminium Production - International Aluminium Institute.” <https://international-aluminium.org/statistics/primary-aluminium-production/> (accessed Oct. 05, 2022).
- [8] “Aluminio crudo en Colombia | OEC - The Observatory of Economic Complexity.” <https://oec.world/es/profile/bilateral-product/raw-aluminium/reporter/col> (accessed Apr. 23, 2023).
- [9] R. Número, “MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL”.
- [10] A. S. Dictan Otras Disposiciones, ““POR LA CUAL SE ESTABLECE EL PROCEDIMIENTO SANCIONATORIO,” *LF*.
- [11] “Plan Nacional de Negocios Verdes - Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.” <https://www.minambiente.gov.co/negocios-verdes/plan-nacional-de-negocios-verdes/#metas-y-avances-nv> (accessed Nov. 04, 2022).
- [12] H. H. Abo-almaged, W. H. Hegazy, M. S. Azmy, and R. M. Khattab, “Extraction of alumina from industrial waste pollutants for the preparation of blue spinel ceramic materials: Processing and characterization,” *Mater Chem Phys*, vol. 276, p. 125400, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.MATCHEMPHYS.2021.125400.
- [13] “CLASIFICACIÓN DE RESIDUOS: NOTAS EXPLICATIVAS,” *Lista Europea de Residuos*, pp. 23–24, Accessed: Sep. 06, 2022. [Online]. Available: [https://iria.ine.es/iriaEstaticos/encuestas/rsc/es/Codigos\\_CER.pdf](https://iria.ine.es/iriaEstaticos/encuestas/rsc/es/Codigos_CER.pdf)
- [14] “Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación,” *Protocolo sobre responsabilidad e indemnización por daños resultantes de los movimientos transfronterizos de desechos peligrosos y su eliminación*. Geneva, pp. 77–85, Aug. 2014. Accessed: Sep. 06, 2022. [Online]. Available: <http://www.basel.int/Portals/4/Basel%20Convention/docs/text/BaselConventionText-s.pdf>
- [15] P. Chávez Aparicio and G. Rodríguez Pineda, “PROPUESTA DE ALTERNATIVAS DE GESTIÓN DE LA ESCORIA SALINA DE LA INDUSTRIA DE ALUMINIO EN EL SALVADOR,” Universidad de el Salvador , San Salvador , 2012. Accessed: Sep. 06, 2022. [Online]. Available: [https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/1856/1/PROPUESTA\\_DE\\_ALTERNATIVAS\\_DE\\_GESTI%c3%93N\\_DE\\_LA\\_ESCORIA\\_SALINA\\_DE.pdf](https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/1856/1/PROPUESTA_DE_ALTERNATIVAS_DE_GESTI%c3%93N_DE_LA_ESCORIA_SALINA_DE.pdf)
- [16] A. Gil, “Management of the salt cake from secondary aluminum fusion processes,” *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 44, no. 23. pp. 8852–8857, Nov. 09, 2005. doi: 10.1021/ie050835o.
- [17] “Conozca los beneficios tributarios para empresas que ayuden a proteger el medio ambiente - Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible,” Jul. 05, 2022. <https://www.minambiente.gov.co/cambio-climatico/conozca-los-beneficios-tributarios-para-empresas-que-ayuden-a-protger-el-medio-ambiente/> (accessed Sep. 06, 2022).
- [18] “Ingeniería Sísmica y Materiales (SIGMA) | Pontificia Universidad Javeriana, Cali.” <https://www.javerianacali.edu.co/grupos-investigacion/ingenieria-sismica-y-materiales-sigma> (accessed Sep. 06, 2022).
- [19] “Patentes | Superintendencia de Industria y Comercio.” <https://www.sic.gov.co/patentes> (accessed Sep. 08, 2022).
- [20] J. Rubio Escobar, G. Marcenaro Jiménez, G. Jiménez Montiel, and S. Díaz Escandón, *Compendio de Normas Propiedad Industrial*. pp. 15–61.
- [21] J. E. Sánchez García, “Creación del Comité de Ética de la Seccional,” Cali, Feb. 2003, pp. 1–3. Accessed: Sep. 08, 2022. [Online]. Available: <https://www.javerianacali.edu.co/sites/default/files/2021-05/Comite-de-etica.pdf>
- [22] J. Daniel *et al.*, “DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA (DANE)”.
- [23] P. Martínez and B. Directora, “INSTITUTO COLOMBIANO PARA EL FOMENTO DE LA EDUCACIÓN SUPERIOR, ICFES Subdirección General Técnica y de Fomento”.
- [24] “Material de Consumo General : OXIDO DE ALUMINIO.” <https://www.coldental.com/medellin/productos/oxido-de-aluminio-detail> (accessed Nov. 13, 2022).
- [25] “Alumina Market Size and Share | Industry Statistics – 2027.” <https://www.gminsights.com/industry-analysis/alumina-market> (accessed Nov. 11, 2022).
- [26] “Aluminum Market Size and Share | Industry Analysis by 2031.” <https://www.alliedmarketresearch.com/aluminium-market> (accessed Nov. 11, 2022).

- [27] “High-Purity Alumina Market Share, Trends |Global Industry Statistics, 2030.” <https://www.psmarketresearch.com/market-analysis/high-purity-alumina-market> (accessed Nov. 11, 2022).
- [28] D. A. Barona, “FORMULACIÓN DE UNA PASTA CERÁMICA A PARTIR DE LA UTILIZADA EN AISLADORES ELÉCTRICOS PARA EMPLEARSE EN LA FABRICACIÓN DEL SUSTRATO DE BUJÍAS DE ENCENDIDO AUTOMOTRIZ UTILIZANDO MATERIA PRIMA NACIONAL Y MATERIAL DE DESECHO DE EDESA,” Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2008.
- [29] J. R. White, B. de Poumeyrol, J. M. Hale, and R. Stephenson, “Piezoelectric paint: Ceramic-polymer composites for vibration sensors”.
- [30] J. Sánchez Molina, J. Orozco Cacique, and L. Peñaloza Isidro, “EVALUACIÓN DE MEZCLAS DE ARCILLAS PARA LA FABRICACIÓN DE LADRILLOS REFRACTARIOS QUE SIRVAN PARA LA RECONVERSIÓN TECNOLÓGICA DE LOS HORNOS UTILIZADOS,” 2014.
- [31] P. Horodek, K. Siemek, J. Dryzek, and M. Wróbel, “Positron Annihilation and Complementary Studies of Copper Sandblasted with Alumina Particles at Different Pressures,” *MDPI*, vol. 10, pp. 1–13, Nov. 2017, Accessed: Nov. 13, 2022. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1944/10/12/1343/htm>
- [32] M. Kern and V. P. Thompson, “Sandblasting and silica coating of a glass-infiltrated alumina ceramic: Volume loss, morphology, and changes in the surface composition,” *J Prosthet Dent*, vol. 71, no. 5, pp. 453–461, May 1994, doi: 10.1016/0022-3913(94)90182-1.
- [33] Z. Malou *et al.*, “Thermal shock resistance of sodalime glass eroded by sandblasting,” *Glass Structures & Engineering*, vol. 5, pp. 147–153, 2020, doi: 10.1007/s40940-019-00113-6.
- [34] P. A. SÁNCHEZ MURILLO, “ANÁLISIS PARA LA OBTENCIÓN DE MATERIALES VÍTREO CERÁMICOS A PARTIR DE VIDRIO RECICLADO,” UNIVERSIDAD DE LOS ANDES, Bogotá, 2004. Accessed: Nov. 13, 2022. [Online]. Available: <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/21836/u258575.pdf?sequence=1>
- [35] M. D. Caza Proaño, “PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR-MATRIZ FACULTAD DE CIENCIAS ADMINISTRATIVA Y CONTABLES,” Quito , 2016.
- [36] T. Stadler, M. Buteler, and D. K. Weaver, “Nanoinsecticidas: Nuevas perspectivas para el control de plagas,” *Rev Soc Entomol Argent*, vol. 69, no. 3–4, pp. 149–156, 2010, [Online]. Available: [http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S0373-56802010000200001&lng=en&nrm=iso&tlng=en](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0373-56802010000200001&lng=en&nrm=iso&tlng=en)
- [37] L. Heng, Y. J. Kim, and S. D. Mun, “Review of Superfinishing by the Magnetic Abrasive Finishing Process,” *High Speed Machining*, vol. 3, no. 1, Jul. 2017, doi: 10.1515/hsm-2017-0004.
- [38] F. Faccin, A. F. Prado, A. G. Tomba Martínez, and L. Ramajo, “Evaluación de la resistencia al choque término de hormigones refractarios silicoaluminosos. Efecto del tratamiento térmico,” *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, vol. 58, no. 6, pp. 246–254, Nov. 2019, doi: 10.1016/J.BSECV.2019.05.002.
- [39] “¿Qué es un abrasivo y cómo elegir a los mejores del mercado? | Saint Gobain.” <https://www.saint-gobain.com.mx/que-es-un-abrasivo-y-como-elegir-los-mejores-del-mercado> (accessed Nov. 13, 2022).
- [40] MINAMBIENTE, “Resolución No. 631,” Bogotá, Mar. 2015.
- [41] “Centros de distribución en el Valle del Cauca - Invest Pacific.” <https://investpacific.org/centros-de-distribucion/> (accessed Apr. 25, 2023).
- [42] “Economía.” <https://www.yumbo.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Economia.aspx> (accessed Apr. 25, 2023).
- [43] “Bodega en Arriendo - Zona industrial, Cencar- Yumbo -.” <https://www.fincaraiz.com.co/inmueble/bodega-en-arriendo/zona-industrial/yumbo/7916455> (accessed Apr. 30, 2023).
- [44] “Sacos (costales) de polipropileno 55x95 nuevos color verde.” <https://www.solostocks.com.co/venta-productos/productos-plasticos/productos-plasticos-agricultura/sacos-costales-de-polipropileno-55x95-nuevos-color-verde-9654273> (accessed Apr. 25, 2023).
- [45] “Tarifas - Acueducto - EMCALI.” <https://www.emcali.com.co/web/acueducto/tarifas> (accessed Apr. 25, 2023).
- [46] “\$ 1.160.000 será el salario mínimo para 2023 y auxilio de transporte por \$ 140.606 - Ministerio del trabajo.” <https://www.mintrabajo.gov.co/prensa/comunicados/2022/diciembre/-1.160.000-ser%C3%A1-el-salario-minimo-para-2023-y-auxilio-de-transporte-por-140.606> (accessed Apr. 25, 2023).
- [47] “Salario de Supervisor/a de producción en Colombia | Computrabajo 2023.” <https://co.computrabajo.com/salarios/supervisora-de-produccion> (accessed Apr. 25, 2023).
- [48] “Salario de Gerente de producción en Colombia 2023.” <https://co.computrabajo.com/salarios/gerente-de-produccion> (accessed Apr. 30, 2023).
- [49] “Cerfibras S.A.S. - Tanques.” <https://www.cerfibras.com/tanques> (accessed Apr. 25, 2023).
- [50] “HTT | terrigeno.” <https://www.terrigeno.com/htt> (accessed Apr. 25, 2023).
- [51] “Detalles De Producto.” <https://es.zgmtech.com/index.php/Show/index/cid/16/id/17.html> (accessed Apr. 25, 2023).
- [52] “TAMIZADORA INDUSTRIAL CIRCULAR .” <https://www.inladsac.com/tienda/industrias/maquinas-industriales/tamizadora-industrial-circular-filtra-vibracion/> (accessed Apr. 25, 2023).
- [53] “EQUIPOS | terrigeno.” <https://www.terrigeno.com/equipos> (accessed Apr. 25, 2023).
- [54] “Báscula de piso Industrial — Badecol - Balanzas de Colombia.” <https://www.badecol.com/collections/linea-industrial/products/bascula-de-piso-industrial-capac-300kg> (accessed Apr. 25, 2023).
- [55] “Banca Personas Tasas 2023 Productos y Servicios”.
- [56] “Informe de Política Monetaria - Enero 2023 | Banco de la República.” <https://www.banrep.gov.co/es/publicaciones-investigaciones/informe-politica-monetaria/enero-2023> (accessed Apr. 25, 2023).
- [57] “Alumina Estado de Resultados | Proyección 2020-2030,” 2020.
- [58] H. Moreno Ramón and S. Ibáñez Asensio, “La Escala de Mohs Dureza de los Minerales ,” Valencia. Accessed: Oct. 03, 2022. [Online]. Available: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/105177/Moreno?sequence=1>

[59] “abrasivo, abrasiva | Definición | Diccionario de la lengua española | RAE - ASALE.” <https://dle.rae.es/abrasivo?m=form> (accessed Nov. 13, 2022).

[60] “grata | Definición | Diccionario de la lengua española | RAE - ASALE.” <https://dle.rae.es/grata> (accessed Nov. 13, 2022).

## VIII. ANEXOS

### TABLA XXII

#### TABLA DE ANEXOS

No. Anexo	Nombre	Desarrollo (propio o terceros)	Tipo de Archivo (PDF, HTML, Excel, Word...)
1	2022-202 Anexo1-Hoja de Trabajo Contexto y Justificación	Propio	Word
2	2022-202 Anexo2-Hoja de Trabajo Grupos de Interés	Propio	Word
3	2022-202 Anexo3-Hoja de Trabajo Identificación de Requisitos	Propio	Word
4	2022-202 Anexo4-Entrevista Grupo SIGMA	Propio	Word
5	2022-202 Anexo5-Entrevista Empresa Aluminio	Propio	Word
6	2022-202 Anexo6-Entrevista Comelec	Propio	Word
7	2022-202 Anexo7-Plan de Recolección de Datos	Propio	Excel
8	2022-202 Anexo8-Hoja de Trabajo Exploración del Mercado	Propio	Word
9	2022-202 Anexo9-Entrevista en Mundo Abrasivos	Propio	Word
10	2022-202 Anexo10-Matriz AHP	Propio	Excel
11	2022-202 Anexo11-Matriz de preferencia para selección	Propio	Excel
12	2022-202 Anexo12-Plan de trabajo en Project	Propio	Microsoft Office Project
13	2022-202 Anexo13-Lista de chequeo revisión documental	Propio	Word
14	2022-202 Anexo14-Entrevista a Empresa Vidrios Opalizados Ramírez.	Propio	Word
15	2022-202 Anexo15-Análisis Financiero	Propio	Excel