


Nota de Aceptación:

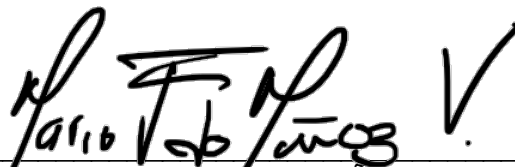
Proyecto de Diseño Aprobado, en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Pontificia Universidad Javeriana Cali para optar el título de Ingeniero Industrial.



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



JORGE ENRIQUE ÁLVAREZ PATIÑO
Director Carrera Ingeniería Industrial



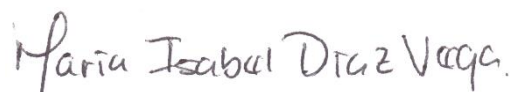
MARIO FERNANDO MUÑOZ VELEZ
Director(a) Proyecto de Diseño



KATHLEEN GEORJAHNA SALAZAR
Codirector(a) Proyecto de Diseño



LUIS ALONSO VELASCO ROLDAN
Jurado 1



MARIA ISABEL DIAZ VEGA
Jurado 2



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Cali

Santiago de Cali, noviembre 22 de 2021

Álvaro Figueroa Cabrera

Profesor asignatura Proyecto de Diseño II
Facultad de Ingeniería y Ciencias
Pontificia Universidad Javeriana Cali

Reciba usted un cordial saludo,

Después de haber dirigido y hecho seguimiento al proyecto de diseño identificado con código 2021103 titulado “*Diseño de un proceso productivo que permita la recuperación de escoria de aluminio para su uso como materia prima en morteros*” y desarrollado por los estudiantes de Ingeniería Industrial Laura Sofia Meneses Núñez (C.C 1006049968), Daniela Escobar Torres (C.C 1006015280), Santiago José Ibarra Enriquez (C.C 1061796582), y Juan Camilo Núñez Navia (C.C 1063816874) consideramos que este cumple en su totalidad con los objetivos propuestos. De igual manera, hemos leído el documento final a cabalidad el cual avalamos para que sea entregado y evaluado para Proyecto de Diseño II.

Cordialmente,

Mario Fernando Muñoz Velez

Director del proyecto

C.C. 87.067.502

Kathleen Georjahna Salazar Serna

Co-director del proyecto

C.C. 39.455.590



Diseño de un proceso productivo que permita la recuperación de escoria de aluminio para su uso como materia prima en morteros

Laura Sofía Meneses Núñez ^{1 a,c}, Daniela Escobar Torres ^{2 a,c}, Santiago José Ibarra Enriquez ^{3 a,c},
Juan Camilo Núñez Navia ^{4 a,c}

Mario Muñoz ^{b,c}, Kathleen Salazar ^{b,c}

^aEstudiante de Ingeniería Industrial

^bProfesor, Director del Proyecto de Grado, Departamento de Ingeniería Civil e Industrial

^cPontificia Universidad Javeriana, Cali, Colombia

Resumen en español

La globalización y el desgaste progresivo del planeta han llevado a la sociedad a pensar en nuevas opciones de producción y desarrollo que impacten en menor medida al medio ambiente; actualmente, el diseño de alternativas de aprovechamiento de residuos con enfoque de economía circular está en auge. Pese a que las técnicas de reutilización de materiales han sido poco exploradas, en Colombia se han empezado a desarrollar cambios que promueven la sostenibilidad. En el presente proyecto se diseñó un proceso que permite la recuperación de escoria de aluminio, la cual es un residuo que genera una problemática ambiental cuando no se dispone apropiadamente. La caracterización fisicoquímica mostró la importancia del proceso de apagado (lavado) del material, lo que mejoró sus características principalmente en términos de la reducción de nitruros, ya que éstos son nocivos para la salud y el ambiente. Con relación a la molienda, se encontró que la mejor alternativa es utilizar un molino de impacto para garantizar el tamaño de partícula establecido en la norma NTC3493 sobre agregados del cemento. Mediante la aplicación de herramientas de la Ingeniería Industrial, se propone una infraestructura para el diseño de una planta que permita realizar el proceso productivo de recuperación de la escoria de aluminio para su potencial uso como materia prima en la producción de morteros al ser usados en el sector de la construcción. Finalmente, se realizó un análisis de factibilidad financiero, el cual dio como resultado que con un precio de venta de la escoria de aluminio igual a 579.09 \$/kg el proyecto es factible y cumple con sus gastos financieros y de operación.

Palabras claves: Aluminio, aprovechamiento, economía circular, escoria de aluminio, morteros.

Abstract

Globalization and the progressive deterioration of the planet have led society to think about new production and development options that have lesser impacts on the environment. Currently, the design of alternatives for the use of waste with a circular economy approach is booming. Although materials reuse techniques have been little explored, changes that promote sustainability have begun in Colombia. In this project, a process that allows the recovery of aluminum slag, which is a waste that generates an environmental problem when it is not properly disposed, was designed. The physicochemical characterization showed the importance of the washing process of the material, which improved its characteristics mainly in terms of the reduction of nitrides, since they are harmful to health, the environment, and the properties of mortars, as they can generate voids within these. Regarding grinding, it was found that the best alternative is to use an impact mill to guarantee the particle size established in the NTC3493 standard on cement aggregates. Through the application of Industrial Engineering tools, an infrastructure is proposed for the design of a plant that allows to carry out the productive process of recovery of aluminum slag for its potential use as a raw material in the production of mortars when used in the construction sector. Finally, a financial feasibility analysis was carried out, showing that the project is feasible and meets its financial and operating expenses with a sale price of the aluminum slag equal to 579.09 COP/kg.

Key Words: Aluminum, waste recovery, circular economy, aluminum slag, mortars.

Tabla de contenido

I.	PROJECT CHARTER	4
II.	DEFINIR	6
A.	Contexto y Justificación (¿por qué?)	6

B.	Grupos de Interés (¿Quiénes son los actores interesados?)	8
C.	Requerimientos.....	11
III.	MEDIR.....	12
A.	Plan de recolección de datos.....	12
B.	Exploración del mercado.....	15
IV.	ANALIZAR	22
A.	Análisis de Oportunidad.....	22
B.	Revisión de literatura.....	24
C.	Exploración de ideas y selección de alternativa	27
D.	Objetivos	31
E.	Plan de trabajo (PdT).....	31
V.	DISEÑAR	33
A.	Desarrollo del diseño de la solución	33
B.	Validación del diseño propuesto.....	48
VI.	VERIFICAR.....	49
A.	Medición de los impactos.....	49
B.	Estandarización de la solución – POE’S (plan de control)	51
C.	Conclusiones	56
D.	Recomendaciones.....	56
VII.	GLOSARIO.....	58
VIII.	ANEXOS.....	61
IX.	REFERENCIAS	62

Índice de Tablas

TABLA I.	EXPLICACIÓN ESCALA PUNTAJE DE LOS ATRIBUTOS DE LA HERRAMIENTA MATRIZ INTERÉS VS PODER	9
TABLA II.	CLASIFICACIÓN GRUPOS DE INTERÉS CON BASE EN LAS VARIABLES CATEGÓRICAS INTERÉS Y PODER	10
TABLA III.	TABLA DE REQUERIMIENTOS DE LOS GRUPOS DE INTERÉS	11
TABLA IV.	INDICADORES DE DESEMPEÑO A MEDIR.....	14
TABLA V.	COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA ESCORIA DE ALUMINIO [33] [34] [32]	18
TABLA VI.	RESULTADOS DE INDICADORES DE DESEMPEÑO	19
TABLA VII.	ANÁLISIS PESTEL DE LA ESCORIA DE ALUMINIO	20
TABLA VIII.	MÉTODO DISNEY.....	27
TABLA IX.	ESCALA DE PUNTAJE PARA CRITERIO COSTO	28
TABLA X.	ESCALA DE PUNTAJE PARA CRITERIO FACILIDAD DE IMPLEMENTACIÓN.....	28
TABLA XI.	ESCALA DE PUNTAJE PARA CRITERIO DISPONIBILIDAD DE INFORMACIÓN	29
TABLA XII.	ESCALA DE PUNTAJE PARA CRITERIO CUMPLIMIENTO ESPECIFICACIONES	29
TABLA XIII.	ESCALA DE PUNTAJE PARA CRITERIO IMPACTO AMBIENTAL.....	29
TABLA XIV.	CRITERIOS AHP PARA CADA ALTERNATIVA CON SUS RESPECTIVOS PUNTAJES	30
TABLA XV.	VECTOR PRIORIDAD DE LOS CRITERIOS Y CONSISTENCIA METODOLOGÍA AHP	30
TABLA XVI.	RESULTADOS METODOLOGÍA AHP	30
TABLA XVII.	PLAN DE TRABAJO	31
TABLA XVIII.	RESULTADOS DE LA DIFRACCIÓN DE RAYOS X	35
TABLA XIX.	REQUISITOS DEL PROCESO DE RECUPERACIÓN.....	44
TABLA XX.	RESULTADOS DE KPI’s	49

TABLA XXI. MAQUINARIA Y EQUIPOS CON SUS RESPECTIVOS PRECIOS DE ADQUISICIÓN.....	50
TABLA XXII. INDICADORES DE EVALUACIÓN DE PROYECTOS	51
TABLA XXIII. FORMATO POE DEL PROCESO DE RECUPERACIÓN DE ESCORIA DE ALUMINIO	51
TABLA XXIV. FORMATO DE CARACTERIZACIÓN DE LA ESCORIA DE ALUMINIO ANTES DEL LAVADO Y SECADO	53
TABLA XXV. FORMATO DE CARACTERIZACIÓN DE LA ESCORIA DE ALUMINIO DESPUÉS DEL LAVADO Y SECADO	53
TABLA XXVI. FORMATO CONTROL DEL PROCESO DE MOLIENDA	54
TABLA XXVII. REGISTRO PRODUCTO TERMINADO	55
TABLA XXVIII. TABLA DE ANEXOS	61

Índice de Figuras

Fig. 1. Temperaturas años 2000-2020 en comparación con la media del período preindustrial (1850-1900) [1]	6
Fig. 2. Aumento de la producción de aluminio entre 2000 y 2020 [9]	7
Fig. 3. Usos de las escorias de aluminio [11].....	8
Fig. 4. Matriz interés vs poder [18].....	11
Fig. 5. Ficha entrevista con expertos.....	13
Fig. 6. Ficha entrevista con clientes potenciales	14
Fig. 7. Diagrama de flujo del proceso de fundición de aluminio del cual resulta la escoria de aluminio [16][34][35]	18
Fig. 8. Distribución del tamaño de la escoria Tipo 1 [33].....	19
Fig. 9. Matriz DOFA.....	21
Fig. 10. Variación anual de la producción y despachos nacionales de cemento Ene 2018-Feb 2021 [39].....	22
Fig. 11. Variación del precio del aluminio 2021 [141]	23
Fig. 12. Escoria de aluminio	34
Fig. 13. a) Proceso de lavado de escoria de aluminio y b) secado de la escoria lavada	34
Fig. 14. SEM escoria sin lavar.....	35
Fig. 15. SEM escoria lavada	35
Fig. 16. a) Equipo ensayo de Hardgrove b) Detalle del compartimiento	36
Fig. 17. Molino de bolas	36
Fig. 18. Comportamiento de la escoria de aluminio molida en molino de bolas	37
Fig. 19. Molino de impacto (anillos).....	37
Fig. 20. Comportamiento de la escoria de aluminio molida en molino de impacto (anillos)	38
Fig. 21. Cinética de molienda	38
Fig. 22. Diagrama de flujo del proceso de recuperación de la escoria de aluminio.....	42
Fig. 23. Camión para transporte de escoria [148]	42
Fig. 24. a) Silo para almacenamiento [149], b) Noria para lavado de escoria [150] y c) Horno rotativo basculante [151].....	43
Fig. 25. a) Molino vibratorio ALPA [152] y b) Línea de producción de molienda [153]	43
Fig. 26. Mapa de Colombia y Valle del Cauca	44
Fig. 27. Coordenadas de ubicación óptima de planta	45
Fig. 28. Mapa de ubicación óptima de planta.....	45
Fig. 29. Matriz de relaciones.....	46
Fig. 30. Diagrama de relaciones.....	46
Fig. 31. Distribución general de planta	47
Fig. 32. Distribución de planta teórica	47
Fig. 33. Modelo en SIMIO del proceso de recuperación de la escoria de aluminio	48
Fig. 34. Flujo de caja del proyecto.....	51

I. PROJECT CHARTER

Descripción (<i>Business case</i>)		Planteamiento del problema (<i>Problem statement</i>)		
<p>El crecimiento acelerado de la población mundial ha provocado un mayor consumo de recursos, en este escenario, toma importancia la industria de la construcción, debido a la necesidad de proveer vivienda e infraestructura asociada al bienestar de la sociedad, sin embargo, la producción de cemento es responsable de la generación de gases de efecto invernadero liberados al ambiente. De igual manera, el aluminio es uno de los materiales utilizados en la manufactura, la construcción, el transporte y el embalaje, entre otros, teniendo una participación importante en la economía del Valle del Cauca. Sin embargo, en su proceso de producción se generan residuos, como la escoria blanca de aluminio, que se ha convertido en una problemática ambiental [15] ya que no se han desarrollado tecnologías económicamente viables para su aprovechamiento o para su adecuada disposición final. En este contexto, toma relevancia esta investigación, la cual tiene como fin evaluar el efecto de la disminución del tamaño de partícula de la escoria de aluminio, como reemplazo del cemento. Para lograr esto, se plantea primero una caracterización de este residuo usando técnicas microestructurales, así como su posterior apagado y calcinación. Por medio de variables como la velocidad y el tiempo de molienda, se espera producir escoria con diferentes tamaños de partícula. Finalmente, se procederá a elaborar morteros, variando las cantidades de reemplazo y el tamaño de partícula, para la evaluación de sus propiedades en estado fresco y endurecido. Como resultado se espera que la incorporación de la escoria no afecte significativamente las propiedades mecánicas de los morteros y que de esta manera se dé viabilidad a su posible uso como adición mineral para el reemplazo de cemento, lo que conlleva un doble beneficio ambiental, pues se estaría convirtiendo este residuo en un subproducto con valor agregado y se disminuiría el impacto ambiental generado por la industria cementera.</p>		<p>La escoria de aluminio es un residuo inevitable generado durante el proceso de fundición de aluminio debido a la reacción de la superficie del aluminio líquido con la atmósfera. En el mundo se desechan aproximadamente 2,5 millones de toneladas de escoria al año, las cuales generan 40 millones de metros cúbicos de gases tóxicos, inflamables y de mal olor, como amoníaco, fosfina, sulfuro de hidrógeno y metano [15], todos estos desechos altamente contaminantes, actualmente son dispuestos en vertederos, generando una problemática ambiental bastante considerable, dado que no se han desarrollado tecnologías económicamente viables para su aprovechamiento o para su adecuada disposición final.</p>		
Impacto de los actores (<i>Stakeholder's business needs</i>)		Restricciones	Especificaciones	Marco legal
<p>El equipo del proyecto de la convocatoria interna, el equipo del proyecto, los futuros inversionistas, las empresas productoras de aluminio en el país, los socios o dueños de las empresas productoras de aluminio en el país y las empresas productoras de concreto o polímeros se identifican como jugadores clave debido a su alto interés y poder sobre el proyecto, esto debido a que el desarrollo del proyecto afectaría a estos involucrados de manera directa. Generar un proceso que permita la recuperación de escoria de aluminio y que sea económicamente viable, traería beneficios para todos.</p> <p>Las entidades gubernamentales y reguladoras deben mantenerse satisfechas al desarrollar el proyecto, se debe cumplir la normatividad y eliminar las características que hacen de la escoria un material corrosivo.</p> <p>Por último, la ANDI – Cámara Fedemetal es un involucrado que debe mantenerse informado debido a que es el gremio de la cadena metalmeccánica y puede apoyar el proyecto ya que incentiva la innovación y el desarrollo.</p>		<ul style="list-style-type: none"> - Información disponible limitada. -Dificultades en el proceso de experimentación. -Garantizar el cumplimiento del cronograma y las actividades. -Tiempo disponible para el desarrollo del proyecto alineado con el calendario académico de la Universidad. 	<ul style="list-style-type: none"> -Mejor aprovechamiento del residuo escoria de aluminio. -El proceso de aprovechamiento no debe generar peor impacto ambiental. -La implementación del sistema productivo para la recuperación de la escoria de aluminio debe tener un nivel de dificultad manejable. 	<ul style="list-style-type: none"> -Se debe adaptar al 100% la norma NTC3493.
Indicadores de Desempeño (<i>KPI's</i>)				
Variable	Actualidad	Meta		
Composición química de la escoria de aluminio.	5% - 7% aluminio, 15% - 30% óxido de aluminio, 30% - 55% cloruro de sodio, 15% - 30% cloruro de potasio, 7%-8% nitruro de aluminio	Tener menos de 0,05% de nitruro Obtener más de 90% de óxido de aluminio. Obtener menos del 0,2% de cloruros de sodio y potasio.		
Tipo y parámetros de molienda.	N/A	Determinar el 100% de los parámetros de molienda adecuados.		
Tamaño de partícula.	N/A	Retención menor al 30% en un tamiz 325.		
Cumplimiento de la norma NTC3493.	N/A	Cumplir con el 100% de la normativa exigida.		
Objetivo general (<i>Goal statement</i>)				
<p><i>Diseñar un proceso productivo para el aprovechamiento del residuo escoria de aluminio como materia prima en la fabricación de morteros.</i></p>				

Objetivos específicos (Project scope)					
<ul style="list-style-type: none"> • Determinar las características fisicoquímicas de la escoria de aluminio antes y después de lavado, mediante difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido (SEM). • Definir parámetros de molienda de la escoria de aluminio, que permitan obtener un tamaño de partícula adecuado según la norma NTC3493. • Establecer los requerimientos de operación del proceso de recuperación, mediante la aplicación de herramientas de ingeniería industrial. • Evaluar la viabilidad financiera del proceso de recuperación para la escoria de aluminio, mediante proyecciones de flujo de caja y análisis de riesgo. 					
Plan de Trabajo (Project Plan)				Equipo de trabajo (Team members)	
Actividad	Fecha Inicio	Fecha Fin	Área IISE	Nombre	Rol
Tomar muestras.	Mar 6/07/21	Lun 12/07/21	12. Ingeniería de diseño y fabricación.	Laura Meneses	Initiator
Aplicar técnica DRX y SEM.	Mar 13/07/21	Mar 27/07/21	12. Ingeniería de diseño y fabricación.	Daniela Escobar	Evaluator
Lavar la escoria de aluminio con abundante agua y secar.	Mar 13/07/21	Mar 3/08/21	5. Ingeniería de calidad y confiabilidad.	Juan Camilo Núñez	Coordinator
Aplicar técnica DRX y SEM a la escoria lavada.	Mié 4/08/21	Mar 10/08/21		Santiago Ibarra	Evaluator
Determinar la distribución granulométrica de las partículas por tamizado, según la norma NTC3493.	Mié 11/08/21	Mié 18/08/21	14. Diseño e ingeniería de sistemas. 12. Ingeniería de diseño y fabricación.		
Hacer ensayo hardgrove.	Jue 19/08/21	Mié 25/08/21			
Evaluar el efecto de la velocidad de molienda, tiempo y tipo de molino en el tamaño de partícula.	Jue 26/08/21	Mié 15/09/21			
Determinar la distribución granulométrica de las partículas por tamizado y granulometría laser, según la norma NTC3493.	Jue 16/09/21	Mié 29/09/21			
Definir el proceso de aprovechamiento real de la escoria de aluminio.	Jue 30/09/21	Mié 6/10/21	4. Ingeniería de instalaciones y gestión energética.		
Definir los requisitos del sistema final.	Jue 7/10/21	Mié 13/10/21	7. Ingeniería y gestión de operaciones.		
Determinar la distribución de planta óptima para el proceso.	Jue 7/10/21	Vie 12/11/21	4. Ingeniería de instalaciones y gestión energética.		
Realizar un modelo de simulación para predecir el comportamiento del proceso.	Mar 16/11/21	Lun 29/11/21	2. Investigación y análisis de operaciones.		
Hacer el análisis financiero del proyecto.	Mar 16/11/21	Lun 29/11/21	3. Análisis económico de ingeniería.		

II. DEFINIR

A. Contexto y Justificación (¿por qué?)

El crecimiento acelerado de los gases de efecto invernadero en la atmósfera, ha sido el mayor causante del desgaste del planeta, alcanzando en algunos años temperaturas que superan el pronóstico con mejor estimación (Fig. 1.) e incluso desastres naturales nunca vistos, lo que ha generado desde sequías incontrolables hasta lluvias históricas. Sin embargo, la sociedad moderna se hace más consciente de los daños al planeta y el impacto negativo de la generación de residuos, además de la escasez de recursos como el agua, ocasionada por el exceso de aprovechamiento de éstos [2].

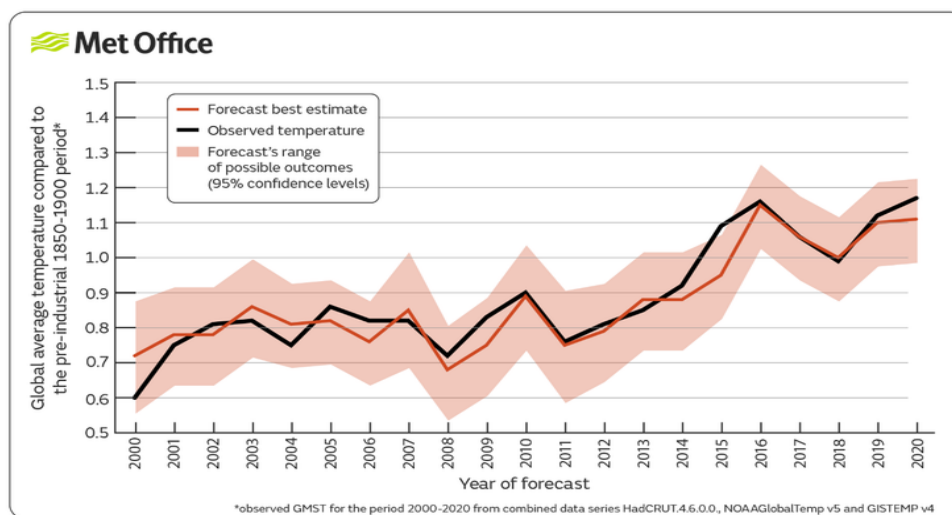


Fig. 1. Temperaturas años 2000-2020 en comparación con la media del período preindustrial (1850-1900) [1]

Debido a lo anterior, la sociedad moderna en su intento por defender el planeta ha empezado a incluir el modelo de economía circular, en el cual se busca que las empresas establezcan un equilibrio entre el crecimiento económico, el bienestar social y el aprovechamiento de los recursos, generando estrategias rentables y sostenibles a largo plazo como la reutilización de residuos de producción; lo cual podría aumentar la generación de utilidades y puestos de trabajo, disminuyendo el deterioro ambiental y los daños irreversibles al planeta [3].

Países como Dinamarca y Suecia son líderes en materia de economía circular. Algunas prácticas que realizan para disminuir el impacto ambiental son: la disminución de la huella de carbono, el uso de energías renovables y la reutilización y búsqueda del valor agregado de residuos sólidos industriales. A su vez, Colombia busca posicionarse en este aspecto, ya que posee un gran potencial para desarrollar [4][5]. En 2018, el país ocupó el tercer lugar de Latinoamérica en el *Dow Jones Sustainability Index* (DJSI), índice que evalúa el desempeño de la sostenibilidad empresarial en términos sociales, económicos y ambientales.

Para seguir innovando, generando valor responsable y consolidarse como líderes latinoamericanos de economía circular, el Gobierno Nacional en su Plan Nacional de Desarrollo, estableció una estrategia que busca transformar las cadenas de producción y consumo, bajo la premisa de las “nueve erres”: repensar, reparar, restaurar, reutilizar, reducir, re-manufacturar, recuperar, re-proponer y reciclar [4].

En la novena edición del evento “Colombia Genera”, realizado en octubre del 2020, el presidente de la Asociación Nacional de Empresarios de Colombia (ANDI) y el ministro de Minas y Energía, plantearon la oportunidad que tienen estos sectores para aportar a la reactivación económica del país, después de la gran crisis que trajo la pandemia del Covid-19. El sector minero-energético es un actor fundamental para la economía colombiana debido a su importancia en términos de inversión, exportaciones y PIB. Además, hay oportunidades en las nuevas plataformas de inversión y generación de cadenas de valor, debido al aumento de la demanda de materias primas como el aluminio (Al), níquel y fósforo hacia el 2030 [6].

El Al es el elemento que más abunda en la corteza terrestre, es el metal más sostenible y uno de los más utilizados en el mundo debido a sus propiedades de ligereza, resistencia y capacidad de reciclaje indefinido [7][8]. Su producción se ha incrementado en los últimos años (Fig. 2.) debido a su utilización en la industria manufacturera, especialmente en la industria

aeroespacial y automotriz [10]. Este material tiene dos tipos de producción. La primaria consiste en la extracción de óxido de aluminio o alúmina (Al_2O_3) del mineral Bauxita, para transformarlo posteriormente en aluminio con 99% de pureza y se caracteriza por la intensidad de energía y grandes emisiones de dióxido de carbono (CO_2); la secundaria consiste en el reciclaje de lingotes, chatarra o escoria de aluminio primario y tiene beneficios económicos y ambientales, ya que la producción de Al secundario representa del 3 al 5 % de la producción primaria (F) [11].

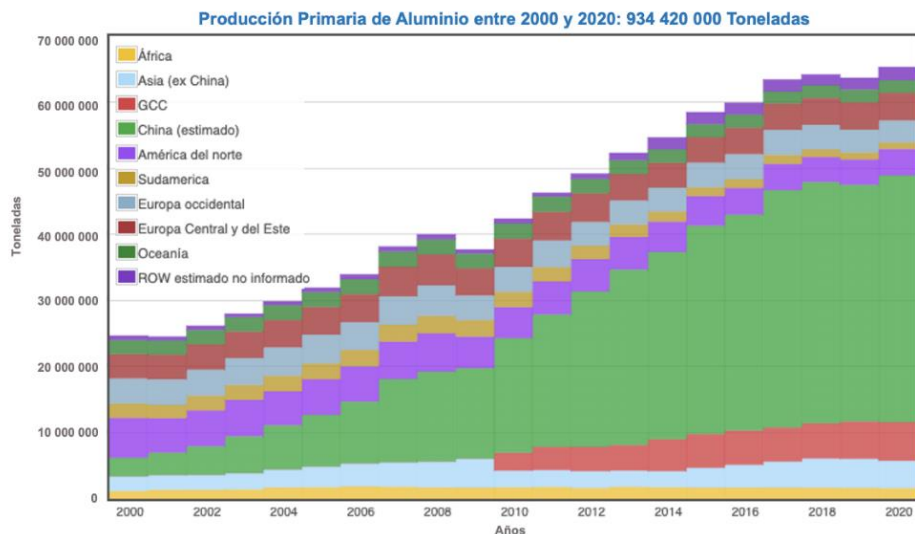


Fig. 2. Aumento de la producción de aluminio entre 2000 y 2020 [9]

En Colombia se consumen 3900 toneladas mensuales y aproximadamente 45 000 anuales de perfiles de aluminio y 600 toneladas mensuales de láminas de aluminio. Hay tres empresas líderes en el mercado: Tecnoglass (Barranquilla), Alucol (Pereira) y Alúmina (Yumbo, Itagüí y Bogotá). Esta última vende alrededor de 30 000 toneladas de productos de aluminio al año, cubriendo el 40% de la demanda colombiana y exportando el 12% de su producción al Caribe y a Estados Unidos [12].

Durante el proceso de fundición del aluminio, a medida que el metal reacciona con la atmósfera, se crea una capa de escoria en la superficie [13], que es un subproducto inevitable [14] y complejo que contiene [15]:

- 80-20% de alúmina (Al_2O_3) y restos de metal de aluminio.
- Óxidos metálicos: óxido de aluminio (Al_2O_3), óxido de magnesio (MgO), óxido de hierro (FeO) y óxido de calcio (CaO).
- Nitruro de aluminio (AlN).
- Cloruros de aluminio ($AlCl_3$), sodio ($NaCl$) y potasio (KCl).
- Fluoruros de calcio (CaF_2), sodio (NaF), aluminio (AlF_3) y hexafluoroaluminato de sodio (Na_3AlF_6).
- Carburo de aluminio (Al_4C_3).
- Sulfuro de aluminio (Al_2S_3).
- Fosfuro de aluminio (AlP).
- Suciedad e impurezas.

La escoria se clasifica en tres tipos: blanca, negra y salina (Fig. 3.). La blanca representa entre el 1 y el 10% del total de la producción, se produce en las fundiciones de aluminio primario y secundario, tiene una forma compacta y grumosa y su nombre se debe a su color claro. La negra y la salina se producen en los procesos de reciclaje y son de color oscuro, la primera generalmente tiene forma granular y contiene más sales y gases que la escoria blanca; por su parte, la salina tiene menos residuos metálicos y más impurezas que las otras escorias. La estructura y composición de las escorias no se puede predecir ya que diversos factores como la temperatura, composición de la aleación y de la atmósfera, influyen en la oxidación del proceso; sin embargo, las composiciones en peso más comunes para cada escoria son las siguientes: 60-75 % de aluminio, 20-30 % de óxido y 5-10 % de sal en la escoria blanca, 5-20 % de aluminio en la escoria negra y 5-7 % de aluminio metálico residual, 15-30 % de óxido de aluminio, 30-55 % de cloruro de sodio y 15-30 % de cloruro de potasio en la escoria salina [11] [13].

Reciclar este residuo resulta ser muy atractivo para los productores de aluminio tanto económica como ecológicamente [14]. Económicamente es importante ya que se puede recuperar una parte de aluminio metálico y el óxido de aluminio restante sirve para reemplazar cemento, obtener materiales compuestos, fabricar refractarios, sinterizar diferentes materiales compuestos, entre

otros [11]. Ecológicamente es importante teniendo en cuenta que cuando este residuo es desechado sin tratamiento a los rellenos sanitarios y tiene contacto con el agua de lluvia, se vuelve nocivo para el medio ambiente y el ser humano [15].

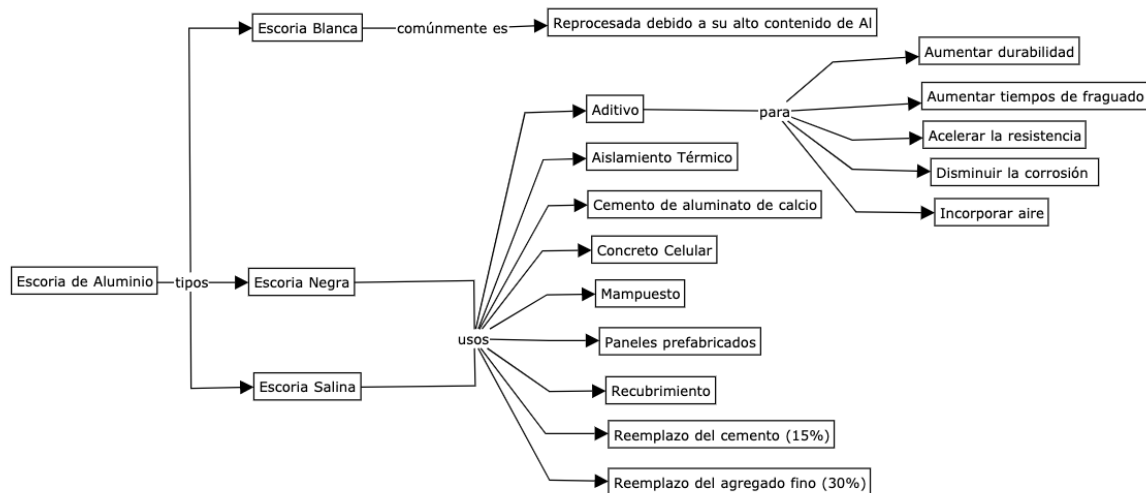


Fig. 3. Usos de las escorias de aluminio [11]

En el mundo se desechan aproximadamente 2,5 millones de toneladas de escoria al año, las cuales generan un calor indeseable, lixiviados líquidos con metales pesados y 40 millones de metros cúbicos de gases tóxicos, inflamables y de mal olor, como amoníaco, fosfina, sulfuro de hidrógeno y metano. En los últimos años, la comunidad científica en búsqueda de mejorar la calidad del ambiente y la calidad de vida del ser humano ha dirigido su atención hacia el mal olor y la contaminación por gases tóxicos generados en actividades industriales, vertederos, etc. [15].

Particularmente en la empresa Alúmina S.A del Valle del Cauca, como residuo de los procesos de fundición, se generan en promedio 100 Ton/mes de escoria blanca, dependiendo del tipo de mezcla, de la materia prima utilizada y de las condiciones específicas del proceso. Esta escoria se tritura en un molino de bolas y luego se pasa por un tamiz para separar el aluminio aglomerado (recuperando el 25%) y el 75% restante es un subproducto denominado polvillo, que consiste en escoria más fina (inferior a 1 mm) y con poca cantidad de aluminio metálico. Éste es el material que se utilizará en este proyecto de diseño y se denominará escoria de aluminio [16].

Este material, al contener alúmina en un alto porcentaje, podría ser utilizado como adición mineral en la producción de materiales como los morteros, cementos, polímeros, entre otros. Sin embargo, también contiene nitruro de aluminio que al reaccionar con el agua se convierte en gas amoníaco (NH₃), el cual es considerado peligroso, dado su carácter irritante y corrosivo [16]. Por lo anterior, la escoria es considerada un material peligroso que no puede ser dispuesto sin tratamiento en rellenos sanitarios, por lo que es fundamental viabilizar su reutilización y de ser posible, darle valor agregado.

En el presente proyecto, se requiere evaluar las propiedades de la escoria de aluminio para a partir de ellas diseñar un proceso productivo que permita su aprovechamiento. Con esto, se logra aportar en dinámicas de economía circular en el país y en la región. Los beneficios de este proyecto son principalmente ambientales, seguido por los beneficios industriales al poder utilizar el desecho de un proceso productivo como materia prima en otro. En el desarrollo del proyecto se hará uso de diferentes áreas IISE como lo son la 4. Facilities Engineering & Energy Management, 5. Quality & Reliability Engineering, entre otras.

B. Grupos de Interés (¿Quiénes son los actores interesados?)

Con el objetivo de identificar los actores de interés y su grado de poder e interés sobre el proyecto, se hace uso de la herramienta para el análisis de *stakeholders* (matriz Interés vs Poder). En el proyecto se realiza un análisis general sobre quiénes podrían ser los grupos, personas, organizaciones o entidades involucradas en considerar el potencial de aprovechamiento del residuo escoria de aluminio y evaluar la factibilidad de aplicar economía circular con dicho residuo.

En la Tabla I se presenta la escala de puntaje definida por el equipo para el uso de la metodología, la cual va de 0 a 3, siendo 0 el nivel más bajo y 3 el nivel más alto.

TABLA I.
EXPLICACIÓN ESCALA PUNTAJE DE LOS ATRIBUTOS DE LA HERRAMIENTA MATRIZ INTERÉS VS PODER

Escala Puntaje	Categorías	
	Interés	Poder
0	No está interesado.	No tiene poder.
1	Tiene interés indirecto.	Tiene poder indirecto.
2	Nivel de interés moderado.	Nivel de poder moderado.
3	Tiene interés directo sobre el proyecto.	Tiene poder directo sobre el proyecto.

A continuación, se explica el significado de la escala de puntaje para las categorías de interés y poder, las cuales son el insumo para realizar la matriz correspondiente y clasificar el involucrado y el tipo de relación que se debe tener con éste.

Interés:

- Puntaje 0: El involucrado no está interesado en las decisiones, actividades o resultados del proyecto ya que no lo afectan positiva o negativamente.
- Puntaje 1: El involucrado tiene interés indirecto en el proyecto, se podría ver afectado o influenciado por los resultados del proyecto de manera indirecta en algún momento o por causa de alguna serie de sucesos.
- Puntaje 2: El involucrado tiene interés moderado en el proyecto, le interesa conocer las decisiones y resultados del proyecto porque le afectan.
- Puntaje 3: El involucrado tiene interés directo sobre el proyecto, quisiera influir en actividades o resultados ya que tienen relación directa con él.

Poder:

- Puntaje 0: El involucrado no tiene ningún poder para influir en la toma de decisiones del proyecto.
- Puntaje 1: El interesado tiene poder indirecto, puede estar relacionado con las actividades o algunos sucesos relacionados con el proyecto.
- Puntaje 2: El involucrado tiene poder moderado, las decisiones de éste pueden llegar a afectar al proyecto.
- Puntaje 3: El involucrado tiene poder directo sobre el proyecto, sus actividades y decisiones afectarán el proyecto directamente, este involucrado puede tener el poder de modificar el alcance o metas del proyecto e incluso cancelarlo.

Con ayuda del Anexo 2 se plantearon los posibles grupos de interés y sus respectivos requisitos, finalmente en la Tabla II se muestra específicamente cuáles son considerados los involucrados del proyecto, se hace una descripción de cada uno de ellos y el interés que pueden tener en el resultado del proyecto, además se les asigna el respectivo puntaje en interés y poder teniendo en cuenta la escala explicada. Por último, en la Fig. 4. se encuentra la aplicación de la metodología en la matriz Interés vs Poder para definir el tipo de comunicación y relación con los involucrados.

TABLA II.
CLASIFICACIÓN GRUPOS DE INTERÉS CON BASE EN LAS VARIABLES CATEGÓRICAS INTERÉS Y PODER

Código	Persona, entidad, grupo u organización interesada	Descripción	Interés en los resultados del proyecto	Interés	Poder
A	Equipo del proyecto de la convocatoria interna (Anexo 1).	Personas u organizaciones a cargo de la realización del proyecto en la Universidad Javeriana Cali.	Ser reconocido en el campo de investigación, implementar la economía circular en residuos sólidos peligrosos.	3	3
B	Equipo del proyecto.	Equipo de trabajo de Proyecto de diseño.	Diseñar un proceso productivo que permita viabilizar el uso de la escoria de aluminio como un subproducto.	3	2
C	Futuros inversionistas.	Futuros involucrados que pueden aportar financieramente para la realización del proyecto.	Recibir ganancias con la realización del proyecto.	2	3
D	Empresas productoras de aluminio en el País.	Las empresas de este sector deben pagar más por la eliminación de residuos corrosivos como la escoria de aluminio blanca, lo que les genera costos más altos.	La viabilidad del proyecto podría disminuir sus costos de eliminación de residuos, además de lograr el reconocimiento por fomentar la economía circular en el país.	3	2
E	Socios o dueños de las empresas productoras de aluminio en el País.	Grupo de personas que definen la estrategia empresarial de una compañía.	Aumentar sus utilidades.	3	2
F	Empresas productoras de concreto o polímeros.	Empresas del sector de fabricación de concretos o polímeros en el país, en las que podría ser probada la reutilización de la escoria de aluminio.	Incluir el uso de un residuo como sustituto parcial del concreto y/o refuerzo en materiales poliméricos.	2	2
G	Entidades gubernamentales y reguladoras.	Aquellas entidades como el Ministerio de Industria y Comercio encargadas de dirigir y coordinar las políticas generales en materia de desarrollo económico y social del país. [17] y aquellas entidades como la CVC encargadas de la administración y protección de los recursos naturales del país.	Mejoras ambientales gracias a la disminución de residuos tóxicos.	1	2
H	ANDI - Cámara Fedemetal.	La cámara Fedemetal se creó hace 20 años, y como parte de la ANDI (Asociación Nacional de Empresarios de Colombia), principal gremio del país cumple los objetivos de dicha Asociación. Adicionalmente, busca ser el vocero de la cadena que representa (metalmecánica, astillera y aeronáutica), analizar la información estadística subsectorial, participar en las negociaciones internacionales, entre otros. [143]	Innovación al darle un valor agregado a un residuo de la industria metalmecánica debido a sus objetivos acerca de buscar el desarrollo e innovación en el sector que representa.	3	1

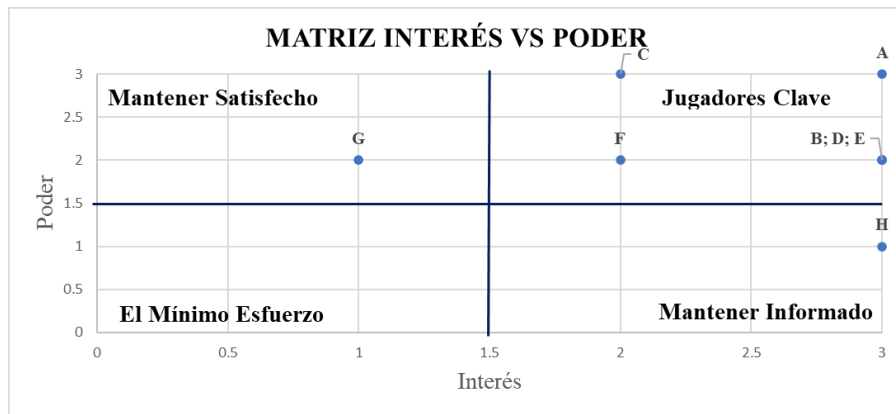


Fig. 4. Matriz interés vs poder [18]

Los involucrados más importantes para el proyecto son aquellos que poseen alto nivel de interés y tienen el poder de afectar las decisiones y actividades del proyecto, y por ende los resultados de éste. Los involucrados con un nivel de interés bajo y con poco poder requieren atención y esfuerzo mínimo por parte de los miembros y directores del proyecto, ya que tienen menor potencial de afectar el desarrollo o cumplimiento de las actividades o decisiones de este [18][19].

C. Requerimientos

Teniendo como base entrevistas, las cuales se incluyen como anexos (Anexo 4, 5, 6 y 7), y búsquedas en la literatura, se realizó la identificación de requisitos de los grupos de interés. En la Tabla III se presenta el grupo de interés, su respectivo requisito, las restricciones de diseño, las especificaciones de diseño y las leyes, normas y estándares obtenidos.

TABLA III.
TABLA DE 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
Equipo de proyecto de la convocatoria interna.	Definir el proceso de modificación del residuo escoria de aluminio para poder ser usado en matrices cementicias.	Material clasificado como residuo peligroso.	El material debe tener cierto tamaño (granulometría) para cumplir con las normas del uso de agregados en cementos.	Norma Técnica Colombiana 3493.	Control en el interior del proceso para poder llegar a los parámetros de tamaño de la norma.
Equipo del proyecto.	Establecer los posibles procesos que se le deben realizar al proceso de modificación de la escoria de aluminio para poder ser utilizado en matrices cementicias.	Material clasificado como residuo peligroso.	El material debe tener cierto tamaño (granulometría) para cumplir con las normas del uso de agregados en cementos.	Sección I de disposiciones generales, en la sección VI de faltas graves y en la sección V de grados.	Establece el comportamiento por parte de los estudiantes que conforman el grupo del proyecto el cual debe direccionarse al comportamiento ideal de los estudiantes que representan a la universidad.
Empresas productoras de aluminio en el país.	Se le pueda dar un valor agregado al residuo generado en el proceso de fundición, pues la escoria obtenida de aluminio muestra mejores propiedades mecánicas [20].	El manejo de un residuo sólido categorizado como peligroso.	Reutilizar la mayor cantidad de residuo del proceso de fundición del aluminio.	Ley 1252 de 2008.	Prohibitivas sobre los residuos y desechos peligrosos, establece que las empresas deben ejercer una política de producción más limpia como estrategia empresarial.
Socios o dueños de las empresas productoras de	Generar utilidades con un residuo que está generando costos.	El manejo de un residuo sólido categorizado como peligroso.	Definir la viabilidad financiera del proyecto.	Norma Técnica Colombiana NTC 3493.	Permite las adiciones activas al cemento y especifica el

aluminio en el país.					desempeño que deben tener estos.
Futuros inversionistas.	El uso de escoria de aluminio como sustituto parcial del cemento [20].	La inversión para el desarrollo del diseño este dentro de los márgenes de lo apoyado por la entidad financiera.	El material debe cumplir con ciertas características de composición química que permitan ser usado como reemplazo parcial del cemento.	Norma Técnica Colombiana NTC 3493.	Permite las adiciones activas al cemento y especifica el desempeño que deben tener estos.
Clientes potenciales.	Un material que cumpla con las especificaciones para mejorar el rendimiento del material base (cemento o polímero) [20].	El material no brinde las propiedades requeridas por los productos.	El cliente debe conocer las características físicas y químicas del producto y su posible efecto en el uso como sustituto parcial del cemento y/o como refuerzo de materiales poliméricos.	Norma Técnica Colombiana 4435.	Establece la creación de fichas técnicas para sustancias químicas y materiales usados en condiciones ocupacionales industriales.
Entidades gubernamentales y reguladoras.	Cumplir las normativas con respecto a la disposición de residuos sólidos peligrosos.	Uso de elementos de protección para el manejo del residuo determinadas por salud ocupacional.	Minimizar los componentes generadores de gases de amoníaco que pueden estar presentes en el residuo.	Ley 1252 de 2008.	Establece la creación del ministerio del medio ambiente y las obligaciones que este tiene para proteger la biodiversidad del país.
ANDI - Cámara Fedemetal.	Cumplir con los requisitos del gremio para la publicación de los resultados del proyecto.	El material no obtenga el suficiente impacto en la industria.	El gremio debe conocer las características físicas y químicas del producto y su posible efecto en el uso como sustituto parcial del cemento.	Norma Técnica Colombiana NTC 3493.	Permite las adiciones activas al cemento y especifica el desempeño que deben tener estos.

III. MEDIR

A. Plan de recolección de datos

Siendo este un proyecto en el que se busca diseñar un proceso productivo que permita el aprovechamiento del residuo escoria de aluminio, se realiza un plan detallado de recolección de datos (PRD) con el propósito de recolectar, organizar y analizar información que permita identificar y cuantificar la oportunidad planteada en el proyecto (Anexo 3). El plan permite saber qué información es necesaria, cómo y dónde va a ser recolectada y las herramientas necesarias para dicha recolección [26].

Los procesos investigativos contemplan 4 niveles (epistemológico, teórico, metodológico y técnico). En este proyecto, los primeros dos niveles se abordaron en la etapa definir y el nivel metodológico se aborda en esta etapa, **Medir**. Para esto, es necesario definir el tipo de estudio (exploratorio, descriptivo, explicativo), el método de investigación (observación, inducción, deducción, análisis), las técnicas y procedimientos para recolectar la información (encuestas, entrevistas) y el tratamiento que se le va a dar a la información [26].

El proyecto es de tipo exploratorio ya que indaga desde una perspectiva innovadora el aprovechamiento de un residuo generado en la industria de la fundición del aluminio y que ha sido estudiado a nivel mundial, pero a nivel nacional son pocas las investigaciones relacionadas con su aprovechamiento. Además, se pretende que el proyecto sirva como guía en estudios que indaguen los posibles beneficios de la escoria de aluminio u otro tipo de residuos con el fin de ser implementados en otros procesos productivos, de manera que haya simbiosis industrial y se promuevan estrategias de economía circular [27].

El método de investigación de este proyecto se define como deductivo, parte de lo general a lo particular, pues a partir de estudios o técnicas de recuperación de escoria de aluminio realizados por expertos a nivel internacional, se pretende experimentar y estudiar su aplicación en un ámbito regional para sacar conclusiones válidas particulares [27].

Las técnicas y procedimientos para recolectar información fueron entrevistas y pruebas de laboratorio (fuentes primarias), y datos publicados en revistas, conferencias o libros (fuentes secundarias), que deben ser confiables y verificables. Se seleccionó el tipo de entrevista semiestructurada de modo que el entrevistador se base en una guía de asuntos o preguntas, y tenga libertad de

manejar la entrevista eliminando e introduciendo preguntas que considere necesarias [27]. Las pruebas experimentales de la escoria de aluminio proporcionada por Alúmina S.A., se realizaron en laboratorios de la Universidad Javeriana (laboratorio de ingeniería civil y laboratorio de materiales) y en el Servicio Geológico Colombiano.

A continuación, se define una estructura detallada de la manera en que se realiza la extracción de los datos e información de fuentes secundarias:

- Selección de la información necesaria para el proyecto.
- Identificación de palabras clave.
- Búsqueda en bases de datos.
- Identificación de alternativas de aprovechamiento de la escoria de aluminio que se han estudiado.
- Identificación de tipo de expertos que se necesitan para las entrevistas.
- Evaluación de temas a profundizar.
- Planteamiento de preguntas específicas a los expertos.
- Recolección de datos mediante entrevistas.

Para el proceso de recolección de datos mediante entrevistas, fue necesario seleccionar expertos que puedan brindar información acerca de la escoria de aluminio y sus posibles alternativas de aprovechamiento. Adicionalmente, se entrevistaron a clientes potenciales para estudiar el mercado identificando necesidades, evaluando si hay interés de inversión en este producto y determinando niveles de calidad. Estos clientes se buscaron en el sector de la construcción, específicamente en empresas o personas especializadas en el manejo de materiales como los cementos, concretos y/o morteros, teniendo en cuenta que ellos son el mercado objetivo y pueden invertir tanto en el producto final, como en el desarrollo en si del proyecto. La información solicitada se obtuvo por medio de dos tipos de plantillas propuestas por el equipo, según los diferentes tipos de entrevistados. En las Fig. 5. y 6. se muestran las plantillas establecidas para los expertos y clientes potenciales, respectivamente.

Ficha Entrevista con Expertos	
Fecha y Lugar de la Entrevista	
Objetivo de la Entrevista	
Nombre del Entrevistado	
Cargo del Entrevistado	
Formación Académica	
Temas por Tratar	
1	Datos generales del entrevistado.
2	Contextualización del proyecto.
3	Comentarios del experto.
4	Conocimiento sobre la escoria de aluminio.
5	Experiencia con el aprovechamiento de residuos.
6	Posibles alternativas y sus beneficios.
7	Clientes potenciales.
8	Tratamientos necesarios.
9	Estándares de calidad.
10	Normativas o reglamentación.
11	Limitaciones.
12	Viabilidad respecto a restricciones.
13	Temas a profundizar.

Fig. 5. Ficha entrevista con expertos

Ficha Entrevista con Clientes Potenciales	
Fecha y Lugar de la Entrevista	
Objetivo de la Entrevista	
Nombre del Entrevistado	
Cargo del Entrevistado	
Formación Académica	
Temas por Tratar	
1	Datos generales del entrevistado.
2	Contextualización del proyecto.
3	Comentarios del entrevistado.
4	Cantidad y costos de producción.
5	Composición química del material que producen.
6	Conocimiento sobre la escoria de aluminio.
7	Experiencia con el aprovechamiento de residuos.
8	Interés de inversión.
9	Estándares de calidad deseados.
10	Normativas o reglamentación.
11	Limitaciones.
12	Viabilidad respecto a restricciones.
13	Temas a profundizar.

Fig. 6. Ficha entrevista con clientes potenciales

A continuación, se define una estructura detallada de la manera en que se debe realizar la extracción de los datos e información de fuentes primarias:

- Selección del entrevistado experto en escorias de aluminio.
- Síntesis de diferentes ideas o alternativas expuestas por los expertos.
- Identificación de clientes potenciales de acuerdo con las alternativas establecidas.
- Selección de clientes potenciales a entrevistar.
- Entrevista a los clientes seleccionados.
- Identificación de los niveles de calidad esperados por los clientes potenciales y validación de características necesarias.

Teniendo en cuenta los requerimientos de los grupos de interés (Tabla III), la identificación de requisitos y la información recolectada, se definen las variables medidas mediante pruebas de laboratorio en el Plan de Recolección de Datos (Anexo 3). Estas variables sirven para poder ejecutar y controlar el proceso de aprovechamiento de la escoria de aluminio diseñado en este proyecto y cuantificar los resultados con el objetivo de establecer metas. Lo mencionado anteriormente se encuentra en la Tabla IV, en la que se definen los indicadores de desempeño o KPI's que servirán para cuantificar los resultados del proyecto.

TABLA IV.
INDICADORES DE DESEMPEÑO A MEDIR.

Variable	Objetivo	Descripción	Indicador
Composición química de la escoria de aluminio.	Lograr un efecto puzolánico y verificar que tenga alto contenido de óxido de alúmina (Anexo 6).	Caracterización por difracción de rayos X [28] o fluorescencia de rayos X [29].	% Aluminio, % óxido de aluminio, % cloruro de sodio, % cloruro de potasio y, según el tipo de chatarra, puede contener impurezas como carburos, nitruros, sulfuros y fosfuros [11].
Tipo y parámetros de molienda.	Definir el mejor tipo y parámetros de molienda que permita obtener los resultados esperados al menor costo.	La definición mediante pruebas de laboratorio realizadas en el Servicio Geológico Colombiano [30].	Tiempo: horas. Velocidad de molienda: rpm. Tipo de molino: bolas cerámicas, metálicas, martillos. Gasto energético: kWh/t.
Tamaño de partícula.	Verificar si después de realizar el proceso diseñado, se cumple con la meta para ser implementada en cementos.	Después de realizar el proceso de molienda, se mide con un tamiz 325 [31].	Porcentaje o cantidad de material retenido en el tamiz.
Cumplimiento de la norma NTC3493.	Cumplir las normas reglamentarias para el uso de residuos (Anexo 4).	Es una variable cualitativa, se debe mirar si se cumple o no.	% de cumplimiento de la NTC3493.

B. Exploración del mercado

Elaborando un análisis del entorno, junto a datos e información necesaria para dar respuesta a los indicadores de las variables previamente establecidas, se realiza el plan de recolección de datos con la finalidad de explorar el mercado que esta investigación pueda llegar a abarcar.

La escoria de aluminio se forma en la superficie del metal fundido expuesto al aire durante su fusión. La escoria es una mezcla de aluminio metal y productos no metálicos como óxidos, nitruros y carburos de aluminio, sales y otros óxidos metálicos en función del tipo de combustible, la carga o la marcha del horno. La mayor parte del interés se ha centrado en la recuperación del contenido de aluminio de la escoria, ya que la escoria blanca puede llegar hasta el 80% en peso. Para recuperar el aluminio metálico, la escoria se calienta en un horno rotatorio con la introducción de un fundente de sal, que puede ayudar a separar el aluminio fundido de los óxidos sólidos y proteger el aluminio contra la oxidación. Pero cuando se quita el aluminio, el resto de la escoria junto con las sales agregadas (llamadas tortas de sal) se envían a los vertederos. Aunque están sellados contra la lixiviación, existe el potencial de lixiviación y las sales solubles representan una fuente seria de contaminación tanto para el suelo como para el suministro de agua superficial / subterránea. Por ende, es necesario buscar una alternativa de recuperación para estos residuos [33].

El objetivo de utilizar escoria como producto de ingeniería o como componente en un sistema de producto de ingeniería, resulta primordial, dado que primero, los óxidos de aluminio del reciclaje de escoria constituyen una fuente alternativa a muchos materiales primarios; en segundo lugar, si la escoria se puede canalizar hacia un producto útil, las empresas fundidoras de aluminio pueden beneficiarse cobrando una tarifa de entrada por la manipulación y el procesamiento de la escoria residual. Una solución es utilizarlos para la producción de nuevos productos o en productos ya existentes, mejorando alguna de sus características físicas, mecánicas o químicas [32].

Inicialmente se realizó una entrevista a la CVC, con el objetivo de conocer el uso y reglamentación que se le da a este residuo en la actualidad en el país y con el propósito de identificar el contexto real de este residuo. La entrevista permitió identificar que en la actualidad esta escoria específicamente no cuenta con una normativa clara para su uso o aplicación en el país, sin embargo, la entrevista permitió aclarar que, si bien no existe normativa específica para la escoria de aluminio, si existen herramientas por parte de la CVC para el uso correcto de residuos similares a este y su aplicabilidad. De la entrevista se resalta el interés por parte de la CVC, en cuanto al aprovechamiento e impacto ambiental que este residuo puede llegar a generar, dado que las empresas deben de trabajar de manera articulada con las autoridades ambientales para mitigar la contaminación generada. (Anexo 4).

Se llevó a cabo una entrevista con el ingeniero con el cargo de gerente técnico de la empresa del sector de la construcción Arango Ingenieros S.A.S. La entrevista permitió conocer a mayor profundidad el mercado y actualmente son varias las escorias que se utilizan, principalmente la escoria de acero, la cual es implementada en la industria cementera debido a que permite generar mayor resistencia (10, 15, 20%) al concreto, manteniendo las mismas proporciones de cemento, grava, arena y agua; sin embargo, la implementación de estos aditivos resulta costosa para la industria, lo que hace que su aplicación como refuerzo en el concreto sea para usos muy especializados (Anexo 5).

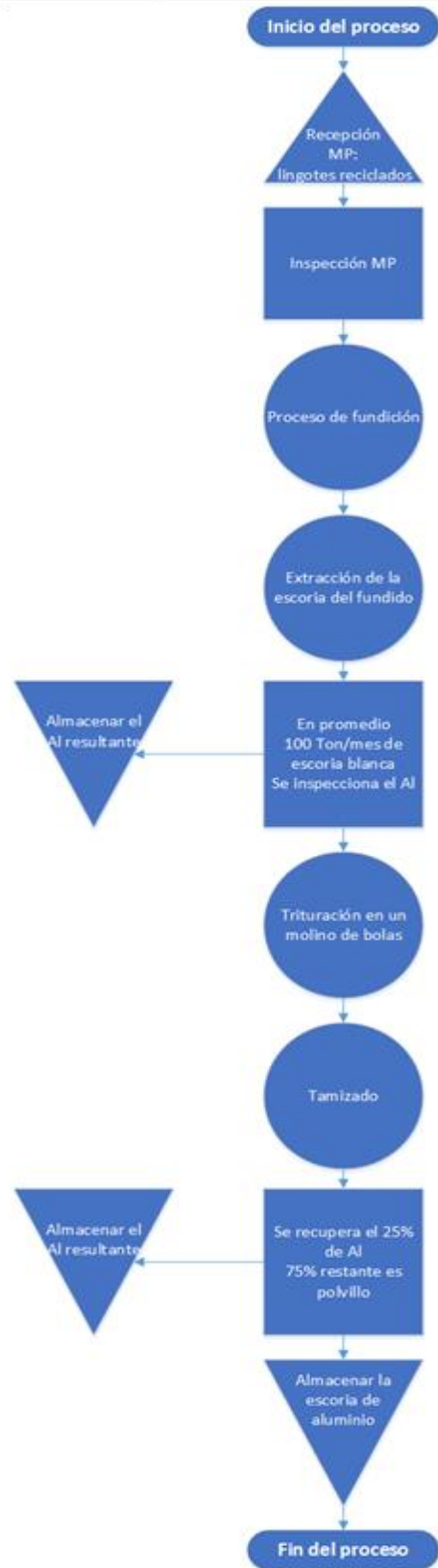
En entrevista con el director de la maestría en ingeniería civil de la universidad Javeriana Cali, aclaró que el mercado de la escoria además de poderse aplicar en la industria cementera también tiene un mercado potencial, el cual abarca muchos usos, desde fabricar concreto celular hasta paneles prefabricados (Anexo 6). El beneficio de la implementación de la escoria por parte de las industrias cementeras tiene grandes beneficios, principalmente por el impacto que esta industria genera en la extracción y procesamiento de recursos no renovables, lo que conllevaría a tener un doble beneficio, pues se estaría dando uso a un residuo industrial y se estaría disminuyendo la cantidad de cemento que se elabora por medio de la extracción. Uno de los objetivos de la industria cementera, es reducir las emisiones de CO₂, lo cual podría lograrse al tener un material que reemplace el cemento y que tenga consecuencias menos negativas. Adicionalmente, la escoria de aluminio se debe someter a un proceso de lavado o apagado, el cual consiste en mojar el material buscando eliminar la cantidad de nitruros que este contenga, si no se realiza este proceso de manera adecuada el producto podría generar gases al tener contacto con el agua y reducir las propiedades mecánicas del cemento, teniendo en cuenta que uno de los ingredientes principales del concreto es el agua [32]. El objetivo es garantizar que el producto puede ser utilizado y no contiene nitruros, promoviendo así los beneficios de utilización de este residuo.

Se entrevistó también una profesora de química de la Universidad del Valle y directora del grupo de investigación de materiales compuestos. Ella resaltó que este tipo de escoria tiene muchos usos potenciales como en materiales de construcción, existiendo estudios relacionados con la aplicación de esta escoria en concretos, morteros, asfaltos y agregados. La doctora también hizo énfasis en que los clientes potenciales dependerán en gran medida de la aplicación en los diferentes usos de la escoria, por

lo que sería fundamental realizar una caracterización química y microestructural, además de una evaluación ambiental con el fin de verificar que estos residuos no sean considerados como peligrosos. Así mismo, recalcó que no existe una norma para saber si el residuo sirve o no sirve, sin embargo, para materiales como el cemento sí existe norma. Finalmente, menciona que el residuo solo se puede utilizar si se cuenta con la calidad y cantidad requeridas (Anexo 7).

En la Fig. 7. se puede observar el diagrama de flujo, éste presenta el proceso de fundición del aluminio del cual resulta un subproducto denominado polvillo, el cual contiene poca cantidad de aluminio metálico y que será el material utilizado en el proyecto bajo el nombre de escoria de aluminio [16].

DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE FUNDICIÓN DEL ALUMINIO DEL CUAL RESULTA LA ESCORIA DE ALUMINIO
Realizado por: Laura Sofia Meneses Núñez
Fecha: junio 2021
Método: Actual



RESUMEN DE EVENTOS	COMENTARIOS
Operaciones	4
Inspecciones	3
Arribos	1
Almacenamientos	3
TOTAL	11

Fig. 7. Diagrama de flujo del proceso de fundición de aluminio del cual resulta la escoria de aluminio [16][34][35]

Generalmente, la escoria está compuesta de óxidos de aluminio, aluminio metálico restante, nitruro, carburo, sulfuro de aluminio y sales y algunos elementos de aleación [33]. La escoria de aluminio, según la variedad de elementos de aleación presentes en el proceso de fundición, presenta una composición química diferente y como material oxidado, consiste en Al_2O_3 , SiO_2 , Na_2O , Fe_2O_3 , metal de aluminio, espinela ($MgAl_2O_4$), diaoyudaoita ($NaAl_{11}O_{17}$), nitruro de óxido de aluminio (Al_5O_6N), hibonita ($CaAl_{12}O_{19}$), fluorita (CaF_2), calcita ($CaCO_3$) y otros compuestos. También se han informado otros componentes incluidos AlN , $NaCl$ y trazas de KCl , Si , criolita, carburo de aluminio (Al_4C_3) y MgF_2 , $NaAlCl_4$, $KAlCl_4$, MgO , $KMgF_3$ y K_2NaAlF_6 ; otros como Na_3AlF_6 , KCl y $NaCl$, han sido identificados por análisis XRD como menores en fase cristalina [34].

TABLA V.
COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA ESCORIA DE ALUMINIO [33] [34] [32]

Compuesto/Elemento	Wt. %
Al_2O_3	42-88
$MgAl_2O_4$	48
AlN	7-8
Al_2O_3	15-30
$NaCl$	30-55
KCl	15-30
MgO	9,26
MnO	0,153
CaO	3,63
Fe_2O_3	1,07
K_2O	0,134
TiO_2	2,47

La escoria es una gran fuente de óxidos de aluminio, por lo tanto, es una alternativa a los materiales primarios, la cantidad de óxido de aluminio depende del tratamiento que se le realice y del tipo de material, por lo cual tiende a tener una composición de óxido de aluminio que varía entre 15% a 30% y se espera tener una composición de óxido de aluminio mayor al 90% después de realizar el lavado [11][33][34]. Por otro lado, la escoria también está constituida aproximadamente por un rango que va de 7% a 8% de nitruro de aluminio (AlN) que al tener contacto con el agua genera gases de amoníaco. “Si se tiene en cuenta que las mezclas basadas en cemento requieren agua para ser procesadas y conformar el material, la generación de amoníaco en el proceso, además de ser peligroso para la salud del trabajador, inducirá vacíos por la presencia de gas al interior de la matriz cementicias” [16], por lo cual se espera que después de realizar el proceso de lavado, la composición de nitruro de aluminio sea menor a 0,05% [33].

Sobre el tamaño de partícula de la escoria de aluminio se encontró un experimento en el cual se utilizaron dos tipos de muestra de escoria, el tipo 1 con una muestra poco compacta y el tipo 2 con mayor compactación, alta rigidez y dureza. Después de cribar, moler y tamizar, los autores concluyeron que la muestra tipo 1 presenta una mayor facilidad en la procesabilidad, dado que presenta un tamaño de partícula más pequeño, en comparación con la muestra tipo 2. A continuación, se muestra la distribución del tamaño de la escoria tipo I (Fig. 8).

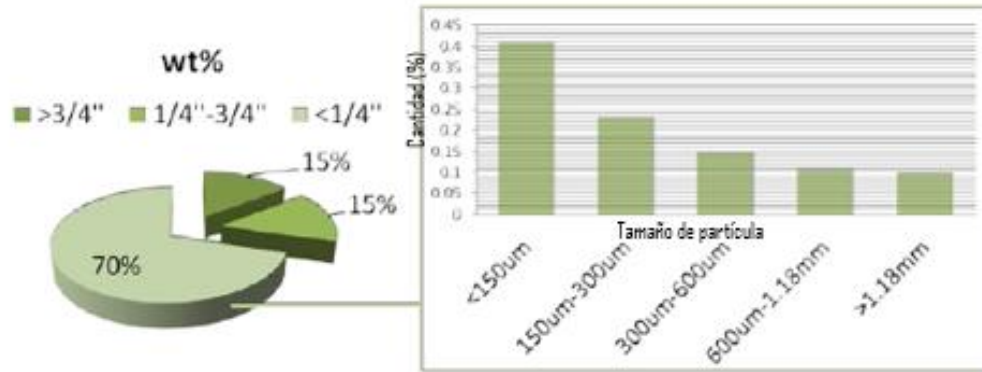


Fig. 8. Distribución del tamaño de la escoria Tipo 1 [33]

La partícula más fina (<150µm) constituye aproximadamente el 30% (calculado por 70% * 42%) entre todos los grados [33]. Con base en las entrevistas realizadas e información recolectada, se espera que, al realizar las correspondientes pruebas de laboratorio, se tenga un porcentaje menor al 30% de material particulado retenido en un tamiz 325.

De acuerdo con la información recolectada en la literatura, las entrevistas realizadas a los distintos expertos y clientes potenciales, se establece la situación actual de las variables y su posible meta (Tabla VI), esto con el fin de cumplir los requerimientos establecidos por los grupos de interés. No es posible establecer valores exactos en la situación actual ni meta, debido a la variación que existe en este material en consecuencia de las diferencias entre los procesos de fundición y la diversidad de materiales de los cuales se obtiene la escoria de aluminio. Los valores exactos se podrán obtener cuando se realicen pruebas de laboratorio con la muestra de escoria de aluminio proporcionada por Alúmina S.A.

TABLA VI.
RESULTADOS DE INDICADORES DE DESEMPEÑO

Variable	Indicadores	Actualidad	Meta
Composición química de la escoria de aluminio.	% Aluminio, % óxido de aluminio, % cloruro de sodio, % cloruro de potasio y, según el tipo de chatarra, puede contener impurezas como carburos, nitruros, sulfuros y fosfuros [11].	5% - 7% aluminio, 15% - 30% óxido de aluminio, 30% - 55% cloruro de sodio, 15% - 30% cloruro de potasio, 7%-8% nitruro de aluminio [11].	Tener menos de 0,05% de nitruros. Obtener más de 90% de óxido de aluminio. Obtener menos del 0,2% de cloruros de sodio y potasio.
Tipo y parámetros de molienda.	Tiempo: horas. Velocidad de molienda: rpm. Tipo de molino: bolas cerámicas, metálicas, martillos. Gasto energético: kWh/t.	N/A.	Determinar el 100% de los parámetros de molienda adecuados.
Tamaño de partícula.	Porcentaje o cantidad de material retenido en el tamiz.	N/A.	Retención menor al 30% en un tamiz 325.
Cumplimiento de la norma NTC3493.	% de cumplimiento de la NTC3493.	N/A.	Cumplir con el 100% de la normativa exigida.

Con el fin de identificar las fuerzas y situaciones externas que pueden influir en el comportamiento y evolución del proyecto se implementó el análisis PESTEL (Tabla VII). En el Anexo 8 puede observarse de manera resumida lo que el equipo del trabajo consideró inicialmente y los aspectos internos y externos tenidos en cuenta.

TABLA VII.
ANÁLISIS PESTEL DE LA ESCORIA DE ALUMINIO

P	E	S	T	E	L
POLITICO	ECONOMICO	SOCIOCULTURAL	TECNOLOGICO	ECOLOGICO	LEGAL
Favorable					
Plan nacional de negocios verdes [36].	Cambio de modelo lineal a economía circular.	Toma de conciencia a la implementación de productos obtenidos a partir de residuos.	Crecimiento en el desarrollo de nuevas tecnologías que son aplicables y asequibles en nuestro país.	Aumento de empresas con pensamiento de aprovechamiento de residuos y economía circular.	Mayor rigidez en el manejo de residuos peligrosos en las empresas.
Política para la gestión integral de residuos [37].	La Estrategia nacional de economía circular se armoniza con los Objetivos de Desarrollo Sostenible.	Crecimiento en la preocupación por la contaminación en los vertederos a causa de los residuos de las empresas.	Incentivos en programas de emprendimiento, innovación y escalamiento de soluciones tecnológicas en economía circular.		Regulación en la generación de residuos en las empresas por parte de las entidades de control ambiental como el ministerio de ambiente y desarrollo sostenible.
Desfavorable					
Alta variabilidad en las normas tributarias.	Devaluación de la moneda colombiana en comparación con el dólar.	El nivel de educación de las personas con respecto a la economía circular es muy bajo.	Alto costos en la importación de tecnologías no implementadas en el país.	Aumento en la utilización de energías convencionales para la transformación y el aprovechamiento de las materias primas.	Endurecimiento en las normativas para los aditivos en el concreto.
Tasas de contaminación elevadas en comparación con otros países de igual grado de desarrollo.	Disminución en la confianza industrial a causa del Covid-19 [38].		Baja inversión en la implementación de nuevas tecnologías en el país.		

Con base en la información obtenida en el análisis PESTEL, se logra identificar los factores que son de mayor importancia para el proyecto, con el fin de describir el contexto en el que se desenvolverá, con esto se da una incursión en el entorno externo que lo pueda afectar positiva o negativamente, para una posible toma de decisión en el futuro del proyecto.

Después de realizar el PESTEL, se utiliza la metodología DOFA (Fig. 9.) donde se identifican las características de dicho entorno con el fin de generar estrategias que aporten al proyecto.

<p style="text-align: center;">MATRIZ DOFA</p>	<p>FORTALEZAS (F)</p> <p>F1 La estrategia nacional de economía circular se armoniza con los objetivos de desarrollo sostenible.</p> <p>F2 Política para la gestión integral de residuos.</p> <p>F3 Plan nacional de negocios verdes.</p> <p>F4 Regulación en la generación de residuos en las empresas por parte de las entidades de control ambiental como el ministerio de ambiente y desarrollo sostenible.</p> <p>F5 Incentivos en programas de emprendimiento, innovación y escalamiento de soluciones tecnológicas en economía circular.</p>	<p>DEBILIDADES (D)</p> <p>D1 Alto costos de implementación de nuevas tecnologías en el país.</p> <p>D2 Tasas de contaminación elevadas en comparación con otros países de igual grado de desarrollo.</p> <p>D3 El nivel de educación de las personas respecto a la economía circular es muy bajo.</p> <p>D4 Inexistencia de normativa para la aplicación de aditivos en el concreto.</p> <p>D5 Baja inversión en la implementación de nuevas tecnologías en el país.</p>
<p>OPORTUNIDADES (O)</p> <p>O1 Cambio de modelo lineal a economía circular.</p> <p>O2 Crecimiento en el desarrollo de nuevas tecnologías, que son aplicables y asequibles en nuestro país.</p> <p>O3 Aumento de empresas con pensamiento de aprovechamiento de residuos y economía circular.</p> <p>O5 Toma de conciencia a la implementación de productos obtenidos a partir de residuos.</p> <p>O6 Mayor rigidez en el manejo de residuos peligrosos en las empresas.</p> <p>O7 Disminución de la contaminación en los vertederos a causa de los residuos de las empresas.</p>	<p>ESTRATEGIA FO</p> <p>-O2F5 Crear incentivos o beneficios para las empresas con el objetivo de implementar nuevos desarrollos direccionados a la economía circular.</p> <p>-O1F1 Cambiar parcialmente el modelo económico lineal hacia un modelo de economía circular, mediante la estrategia nacional de economía circular.</p> <p>-O3F2 Mediante la política para la gestión de residuos se buscará el aumento del aprovechamiento los residuos generados por cada organización.</p> <p>-O7F4 Mediante la regulación en la generación de residuos por parte de las empresas se buscará disminuir la contaminación en los vertederos.</p>	<p>ESTRATEGIA DO</p> <p>-O5D2 Crear conciencia de la contaminación generada por estos desechos con el objetivo de buscar la reducción de estas tasas de contaminación por parte de las empresas, teniendo los beneficios ambientales y económicos de estas implementaciones.</p> <p>-O2D4 Implementar estos nuevos desarrollos e incentivar la creación de una normativa específica y acorde a estos nuevos desarrollos.</p> <p>-O3D3 Aplicar e implementar gradualmente la economía circular con el objetivo de crear conciencia acerca de lo que es la economía circular y sus beneficios para la organización.</p>
<p>AMENAZAS (A)</p> <p>A1 Alta variabilidad en las normas tributarias.</p> <p>A2 Disminución en la confianza industrial a causa del COVID-19.</p> <p>A3 Aumento en la utilización de energías convencionales.</p>	<p>ESTRATEGIA FA</p> <p>-A3F2 Implementar la política para la gestión de residuos para disminuir la utilización de energías convencionales.</p> <p>-A2F5 Aumentar la confianza industrial mediante incentivos en programas afines a la economía circular.</p>	<p>ESTRATEGIA DA</p> <p>-A1D4 Crear de normas para la aplicación de aditivos que no tengan en cuenta la variabilidad de las normas tributarias.</p> <p>-A3D5 Disminuir de las energías convencionales mediante la implementación nuevas tecnologías en el país.</p>

Fig. 9. Matriz DOFA

El análisis DOFA nos permitió identificar que existen más oportunidades en la implementación de este residuo en la industria que amenazas o debilidades, también se observan igual número de fortalezas y debilidades y muy pocas amenazas. Las estrategias de oportunidades y fortalezas se basan en incentivos económicos, reducción de costos, implementación de un modelo más amigable con el ambiente y reducción de la contaminación generada actualmente en el uso de este residuo en la industria por parte de las empresas, con el objetivo de generar un valor agregado y un beneficio para las organizaciones, el cual según el análisis tiene un futuro bastante promisorio. Las estrategias de debilidades y fortalezas se basan en generar conciencia del daño ambiental causado por este residuo y en la creación de normas que regulen la implementación y uso de la escoria en la industria cementera. Las estrategias de fortalezas y amenazas se basan principalmente en la creación de políticas para la gestión de residuos y en el aumento de la confianza en la implementación de este residuo, lo que a su vez se vuelve un desafío y una oportunidad. Las estrategias de amenazas y fortalezas se enfocan en la implementación de nuevas tecnologías, las cuales permitan sustituir parcialmente las usadas con energías convencionales, de modo que estas nuevas tecnologías con el tiempo se hagan más asequibles, como lo es la implementación de la escoria que busca no solo una reducción en la contaminación ambiental sino también una reducción de costos para las empresas.

IV. ANALIZAR

A. Análisis de Oportunidad

Después de realizar la etapa medir, donde se efectuó un acercamiento al mercado de la escoria de aluminio y a su uso como aditivo en la industria del cemento, es necesario establecer las oportunidades y dificultades que puedan presentarse en la instauración de un nuevo producto que contenga escoria de aluminio.

Acerca de las oportunidades para el desarrollo de la escoria de aluminio como aditivo del cemento, se presenta información sobre el crecimiento que ha tenido la producción de cemento en Colombia y el crecimiento en los costos del aluminio, con el fin de identificar la oportunidad que tiene el proyecto en estas industrias.

La Fig. 10. representa la variación anual en la producción de cemento vs la cantidad de producto que es despachado a nivel nacional. En este caso se puede observar el gran crecimiento que ha tenido la industria cementera, a pesar del gran declive que se ve reflejado en el año del 2020 por la crisis mundial del Covid-19. Se logra observar la tendencia creciente que tiene la producción de cemento en el país, al ser uno de los principales productos en el sector de la construcción.

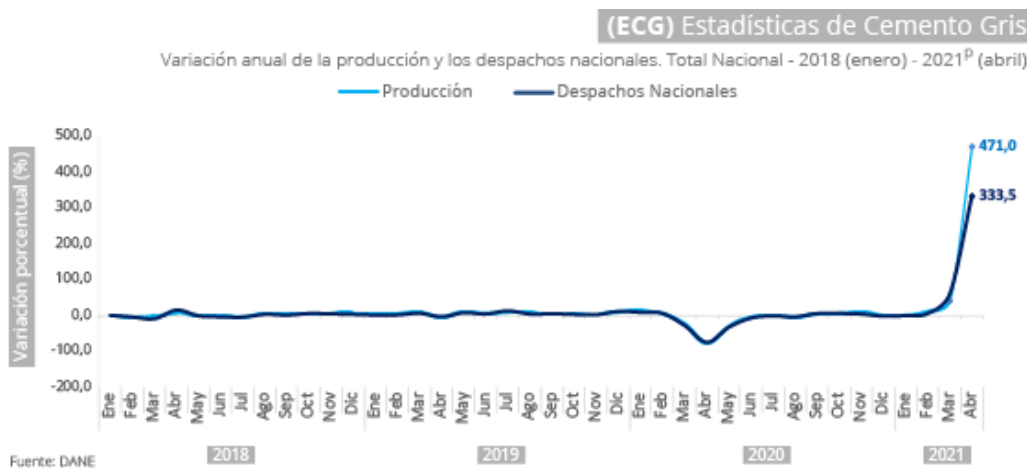


Fig. 10. Variación anual de la producción y despachos nacionales de cemento Ene 2018-Feb 2021 [39]

Adicionalmente, se presenta la variación del precio del aluminio (Fig. 11.), el cual presenta una tendencia creciente, con lo cual se estima que las empresas productoras de aluminio establezcan un modelo de desarrollo económico de reutilización y aprovechamiento de los residuos producidos, con el fin de aprovechar al máximo el producto, reduciendo así el costo de material y manejo de los residuos, manteniendo la materia prima el mayor tiempo posible dentro del ciclo productivo.

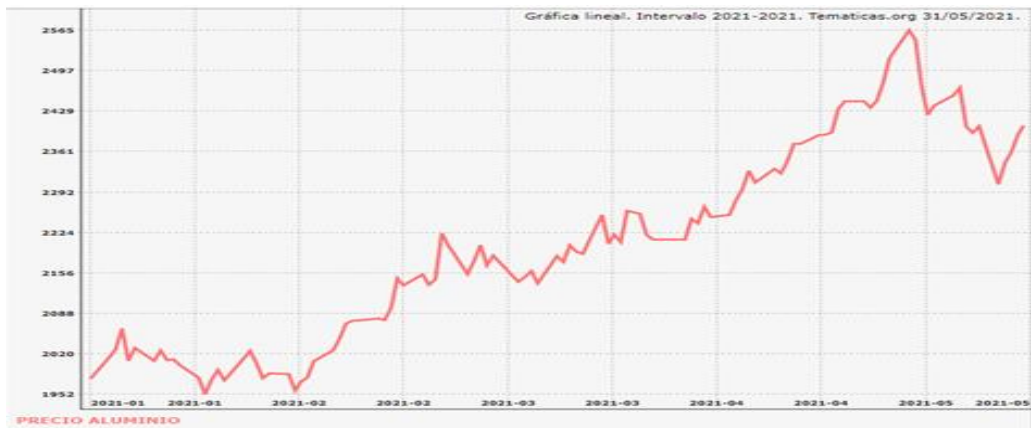


Fig. 11. Variación del precio del aluminio 2021 [141]

Con el fin de definir los requerimientos críticos de los grupos de interés, se establecieron controladores de requerimientos críticos six sigma (CTx), lo cuales serán de gran ayuda en el diseño final de la propuesta planteada en el proyecto. Estos controladores se establecieron por medio de la información recolectada en los requerimientos de los grupos de interés determinados en la etapa **Definir**, con lo cual los requerimientos se acoplarán con los indicadores de desempeño definidos en la etapa Medir, considerando las estrategias que permitirán afrontar las situaciones internas y externas basadas en las debilidades, oportunidades, fortalezas y amenazas del desarrollo del proyecto.

Para el proyecto, se establecieron controladores críticos referentes a los costos, la calidad y la satisfacción. Con respecto al control crítico de calidad CTQ (*Critical To Quality*) del proceso, se obtuvo:

- Cumplimiento de la normativa exigida: mediante el diseño de un proceso productivo para la recuperación de escoria de aluminio se busca obtener un subproducto que cumpla con la normativa exigida, para la cual se debe considerar aspectos relevantes tales como las propiedades del material, tanto físicas como químicas, como ejemplo de estas propiedades que debe tener el material están el tamaño de partícula, el contenido de nitruros y óxidos de aluminio, entre otras propiedades químicas que garantizan la calidad del subproducto [32].
- Mejoramiento del material base: un aspecto clave en el aprovechamiento de la escoria de aluminio en matrices cementicias son las propiedades mecánicas que este material debe tener, las cuales deben garantizar una mejora en el rendimiento del cemento. Algunas de estas propiedades son, la resistencia a tensión, la resistencia a compresión y los tiempos de fraguado [40], las cuales son obtenidas mediante ensayos y evaluación de resultados.

Una vez obtenidos los CTQ (*Critical To Quality*), se procede a evaluar los controladores críticos de costo CTC (*Critical To Cost*), los cuales serán implementados con el fin de obtener beneficios económicos por el aprovechamiento de la escoria, haciéndolo de interés para las industrias actuales, viendo una oportunidad de mercado y un aprovechamiento de residuos. El controlador se definió de la siguiente manera:

- Viabilidad financiera en la implementación del proceso de modificación del residuo: una vez obtenida la escoria de aluminio, es necesario realizarle una serie de procesos, los cuales permitirán implementarla en matrices cementicias; estos procesos deben ser considerados tanto desde el punto de vista económico como práctico, dado que se debe evitar generar sobrecostos en los procesos. Una vez cuantificados los diferentes costos relacionados con los procesos de modificación del residuo desde el apagado hasta el proceso de molienda, se deberá establecer un precio para el producto generado, teniendo en cuenta los costos de materia prima, ensayos de laboratorio y procesos de modificación. Otra forma posible de representar ganancia, no solamente económica, es la consideración de la disminución en el impacto ambiental que generan las empresas productoras de aluminio, con respecto a los residuos y el ahorro en el tratamiento de estos residuos, que son considerados peligrosos [21].

Por último, se tienen los controladores críticos de satisfacción CTS (*Critical To Satisfaction*), los cuales están asociados a los requerimientos establecidos por los posibles clientes del producto.

- Funcionalidad del producto: Es importante tanto para el proyecto como para los posibles clientes, que el subproducto obtenido de la escoria de aluminio cuente con las especificaciones necesarias para su uso; para ello se creará una ficha técnica, la cual establecerá las características físicas y químicas del producto y su posible efecto en el uso como sustituto parcial del cemento.

Con el objetivo de determinar o esclarecer lo que los clientes potenciales estarían buscando, captarlo y traducirlo en soluciones técnicas de diseño, se hizo uso de la herramienta Despliegue de la Función Calidad (QDF), dado que la etapa del diseño es una de las más críticas en todo el proceso productivo.

Inicialmente mediante la herramienta QDF (*Quality Function Deployment*), se identificó lo que los *stakeholders* esperan o desean en la implementación de la escoria, también el cómo la implementación de este residuo satisfará los deseos del cliente, y permitirá relacionarlo con los cómo/qué del producto, teniendo en cuenta los requerimientos de las partes interesadas previamente definidos en la etapa definir. Se establecieron 7 esenciales preferencias o deseos del cliente (Anexo 12). Por otro lado, se definieron los requerimientos técnicos o métricas de cada una de las preferencias de los clientes en la implementación de este residuo teniendo en cuenta los deseos de estos mismos, en donde se definieron 6 requerimientos técnicos.

El análisis realizado mediante la herramienta QDF, nos permitió identificar el orden de prioridad de los requerimientos técnicos en cuanto a los intereses de los clientes en la implementación de la escoria, además de reconocer mediante una evaluación de importancia el porcentaje en orden de prioridad de cada requerimiento. Para este caso se evidencio, que el orden de prioridad es el siguiente: contaminación generada, caracterización de la escoria, cumplimiento de estrategias de la economía circular, composición química de la escoria, costos e ingresos generados.

La contaminación generada actualmente es el principal interés de las partes interesadas, lo que conlleva al segundo interés, el cual es, la caracterización de la escoria, dada la importancia y relevancia para las partes interesadas en sus posibles aplicaciones en la industria, seguida del cumplimiento de las estrategias de la economía circular. Esto nos permite definir estrategias centradas en el impacto ambiental, pues nos permite entender que el principal preocupante de las partes interesadas es la contaminación, tanto en la industria cementera como en la industria del aluminio, es decir el principal interés es la reducción de sus impactos ambientales, en cuanto a sus altos volúmenes de CO₂ producidos y a la contaminación de vertederos, lo cual se pretende reducir al darle un valor agregado a la escoria.

La herramienta QDF permite realizar una comparación con las posibles competencias de la escoria de aluminio en el mercado actual, en donde se utilizan otras adiciones activas (adiciones puzolánicas o adiciones hidráulicas) gracias a sus propiedades, las cuales son usadas al igual que la escoria de aluminio como remplazo parcial del cemento. Mediante de la herramienta QDF se definieron como posibles competencias en el mercado la escoria de acero, cenizas volantes, humo de sílice, metacolin y cenizas volcánicas. Estas posibles competencias de la escoria de aluminio se sometieron a una comparación, teniendo en cuenta los deseos o preferencias del cliente definidos previamente. Según la evaluación de importancia establecida en la QDF, la escoria de aluminio resulta ser la adición que cumple a mayor cabalidad los deseos o preferencias de los clientes, seguida de la escoria de acero.

B. Revisión de literatura

En la actualidad, existe una necesidad emergente de minimizar el impacto ambiental con prácticas de aprovechamiento de residuos como la escoria de aluminio para la generación de productos de valor agregado, que es una importante área de investigación que beneficiaría económicamente a las empresas relacionadas con este material [41], [42].

La práctica industrial más común de procesamiento es la extracción del aluminio metálico de la escoria, que es triturada mecánicamente y tamizada para separar las partículas gruesas (alto contenido de aluminio metálico) de las finas; las primeras se vuelven a fundir para recuperar el aluminio residual y se moldean en lingotes para la venta y las segundas (residuo no metálico-RNM), contienen aluminio metálico <10% y por lo general son desechadas. Éstas se clasifican como residuo peligroso ya que producen gases tóxicos y explosivos al entrar en contacto con el agua, por ende, sus costos de disposición en vertederos son muy altos y muchos países han prohibido esta práctica [43].

En la literatura se han propuesto diferentes métodos de tratamiento del RNM (pirometalurgia e hidrometalurgia) para convertirlo en producto de mayor valor agregado [34]. En el primero, el nitrato de aluminio (AlN) se oxida y las sales se evaporan a altas temperaturas y luego se mezcla, moldea y calcina para fabricar productos de construcción. En el segundo, el AlN se hidroliza, las sales se disuelven en agua y después se filtra, precipita, lava y calcina, obteniéndose gamma alúmina (γ -Al₂O₃) [44].

Bajare *et al.* [45] usaron RNM para producir agregados de arcilla expandida. La mayoría de las impurezas como amoníaco (NH₃) y AlN, se removieron mediante tratamiento térmico. Después del calcinado (1100°C), se prepararon diferentes muestras de pasta de arcilla y RNM, se secaron a 105°C y finalmente se sinterizaron a 1170-1210°C. Ramaswamy *et al.* [46] fabricaron

refractarios de solo RNM; primero lo lavaron a 200°C (eliminación de sales y AlN), calcinaron a 1000°C (eliminación gradual de las fases no deseadas), compactaron y finalmente lo calcinaron a 1500°C.

Beheshti *et al.* [47] propusieron que para mejorar la eficiencia de eliminación de impurezas, es necesario aumentar la temperatura de calcinado; sin embargo, Shen *et al.* [44] encontraron que aunque la eliminación de AlN se puede lograr con el calcinado a más de 1000°C, no es aconsejable eliminar las sales mediante procesos pirometalúrgicos, ya que las sales evaporadas pueden depositarse en la pared del horno, acortando su vida útil; además, consumen mucha electricidad y liberan vapores tóxicos al aire.

Otros autores como Yang *et al.* [48] prepararon polvo de alúmina de alta pureza a partir de RNM con plasma de radiofrecuencia; el RNM se alimentó a la llama de plasma mediante un dispositivo de alimentación de polvo. Con tamaño de partícula de 8 µm y potencia de radiofrecuencia de 3,5 kW, se logró una pureza del polvo de alúmina de 99,95%. Saravanakumar *et al.* [49] prepararon γ -Al₂O₃ mediante fusión por arco de plasma (máxima potencia 15 kW), alcanzando rendimiento máximo de 21%.

Shen *et al.* [44] establecieron que el uso de RNM por proceso pirometalúrgico se aplica a la fabricación de materiales de construcción con otras materias primas y la utilización como fuente de aluminio para preparar alúmina de alta pureza, en que los retornos económicos son mayores; sin embargo, el gran desperdicio energético en ésta, hace más razonable usarlo para fabricar materiales de construcción.

En la eliminación de nitruros por hidrometalurgia, Li *et al.* [50] encontraron que a medida que la temperatura aumenta, se promueve la hidrólisis de AlN. Después de 720 min a temperatura máxima de 373,15 K, lograron hidrolizar más del 60% de AlN. Guo *et al.* [51] trataron de utilizar dióxido de carbono (CO₂) con amoníaco liberado durante la hidrólisis del AlN, para generar bicarbonato de amonio utilizable como precipitante en la preparación de bauxita; no obstante, según Shen *et al.* [44], el CO₂ y el cloruro ferroso (FeCl₂) inhiben la hidrólisis de AlN y las sales del RNM la aceleran. Por ende, no es aconsejable remover AlN por procesos hidrometalúrgicos. El método de disolver sales en agua es ampliamente aceptado, las sales disueltas se pueden reciclar después de la evaporación mediante calentamiento artificial o luz solar.

Aziz *et al.* [52] lavaron la escoria con una proporción sólido-líquido 1:4. Las sales se eliminaron después de 8 días a temperatura ambiente; aumentando la temperatura a 100°C, Hashishin *et al.* [53] redujeron el período de lavado a 3 días. Das *et al.* [54], alcanzaron eliminación de casi 100% de sal, enjuagando la escoria en dos etapas (60min-80°C). Hu *et al.* [55] encontraron que, aunque el lavado elimina aproximadamente 80% de sales, la reacción entre agua y AlN produce amoníaco; para eliminarlo, utilizaron glicerol sin agua y etanol anhidro.

Los procesos hidrometalúrgicos, en que se obtiene γ -Al₂O₃, constan de tres pasos: disolución alcalina o ácida de RNM, precipitación del líquido del filtro y calcinación del precipitado [44]. Mahinroosta *et al.* [34] identificaron los siguientes parámetros para una extracción de alúmina eficiente (83%): tamaño de partícula (38-75 µm), tiempo y temperatura de lixiviación (120min-85°C), concentración de ácido o base (5 mol/l) y relación líquido-sólido (20 ml/g). Según Wöhlk *et al.* [56], la lixiviación permite disolver completamente el contenido de sal, eliminar gases tóxicos llevando la temperatura cerca al punto de ebullición y después de separar el residuo (óxidos principalmente) de la solución salina, es lavado para mantener un contenido de cloruro <0,5%.

Shen *et al.* [44] compararon los productos obtenidos del procesamiento de RNM por ambos procesos (pirometalúrgico-cerámica a base de titanato de magnesio y aluminio) e (hidrometalúrgico- γ -Al₂O₃). Evaluando el consumo de recursos y emisiones, encontraron que los obtenidos por pirometalurgia, tienen menor consumo de materias primas y son más respetuosos con el ambiente que por hidrometalurgia; sin embargo, la eliminación de AlN y sales se debe hacer con un proceso de lavado.

Debido al rápido crecimiento de la infraestructura global, la reutilización de residuos industriales es muy importante en la industria cementera y concretera [57]. Así, el uso de residuos como cenizas volantes, escoria granulada de alto horno, humo de sílice, etc., en la producción de concreto y otros materiales de construcción está ganando importancia debido a consideraciones ecológicas [57], [58], [59]. Éstos actúan como elementos cementantes suplementarios cuando se mezclan con el cemento Portland ordinario y cumplen la función puzolánica [58]. Además, son empleados cuando se necesita un rendimiento específico como el aumento de la resistencia y/o durabilidad y para ahorrar costos y energía [59].

En el caso del cemento Portland, el requerimiento de óxido de aluminio es de aproximadamente 5%; un enfoque alternativo es usar el RNM directamente como materia prima para la generación de productos de valor agregado que demandan aluminio u óxido de aluminio (Al₂O₃) esencialmente [41], [43]. Por la dureza y alto contenido de óxido de aluminio en la escoria, se está

utilizando en la producción de cemento, concreto o morteros, lo que representa un procedimiento atractivo desde el punto de vista económico para la recuperación de escoria de aluminio [42], [60].

En el cemento de aluminato de calcio, utilizado en la producción de morteros y concretos resistentes a productos químicos, sistemas de alcantarillado y materiales ignífugos hasta 2000°C [34], Dubé [61] y Ewais *et al.* [62] han informado del uso efectivo de la escoria de aluminio en su producción, debido al contenido de alúmina presente en el residuo, recomendando agregar 37,50 a 41,25% de escoria de aluminio.

Algunas propiedades del concreto permanecen igual o mejoran cuando hay reemplazos del cemento en niveles <20% de escoria. Elinwa y Mbadike [63] evaluaron este efecto sin tener en cuenta el tamaño de partícula de la escoria, encontrando resistencias de compresión y flexión comparables con el concreto control con niveles de reemplazo entre 10 y 15%. Además, la escoria retardó los tiempos de fraguado del concreto, condición deseable para climas cálidos. Con tamaño de partícula 20 µm, Ozerkan *et al.* [64] encontraron que la cantidad de reemplazo de la escoria debe ser <15% para no afectar la resistencia a la compresión del concreto.

Reddy *et al.* [57] antes de utilizar la escoria, la molieron, tamizaron (tamiz de 90 µm) y apagaron (tratamiento con agua), encontrando que hasta con 15% de reemplazo, las propiedades mecánicas y de durabilidad no disminuyen significativamente, la escoria retrasa los tiempos de fraguado del concreto y cuando se utiliza con otros aditivos como humo de sílice y cenizas volantes, se observan propiedades mecánicas y de durabilidad mejoradas. Mailar *et al.* [59] pulverizaron la escoria hasta un tamaño de partícula inferior a 150 µm y encontraron que el concreto producido con 20% de escoria proporciona una resistencia óptima para climas cálidos y retrasa el tiempo de fraguado inicial.

Javali *et al.* [58] vertieron en agua desionizada (relación sólido-líquido 1:6) escoria con tamaño de partícula <90 µm. La mezcla se agitó a temperatura ambiente por 30 min para disolver las sales, los residuos no disueltos se separaron por filtración y se secaron al sol. La dosis óptima de reemplazo para no afectar las propiedades del concreto fue 5% de escoria de aluminio y 20% escoria de acero.

Liu *et al.* [65] utilizaron RNM de 45µm como agente espumante para reemplazar el costoso polvo de aluminio (representa aproximadamente 10% del costo total de materia prima) para síntesis de concreto celular ligero (utilizado principalmente para aislamiento térmico), encontrando que 15.6g de RNM permiten reemplazar 1g de polvo de aluminio.

Pereira *et al.* [66] analizaron el efecto de escoria fina de aluminio en las propiedades mecánicas del mortero de cemento Portland, alcanzando un reemplazo de hasta 10% de cemento. Dai y Apelian [42] lavaron la escoria en agua destilada para limpiar contaminantes sueltos, la secaron en una placa calefactora durante 6h, la agregaron a la mezcla de mortero y encontraron que la escoria aumentó la resistencia a la flexión (40%) y compresión (15%) y que factores como tamaño de partícula, fracción de peso y origen de la escoria, tienen efectos importantes sobre la uniformidad de la microestructura de las probetas de mortero.

Ewais y Besisa [67] produjeron cerámicas a base de titanato de magnesio y aluminio mediante sinterización de escoria de aluminio (fuente de Al₂O₃ and MgO) y rutilo (fuente de TiO₂). El tamaño de partícula de la escoria (<90µm) se aplicó sin calcinación previa, los polvos se mezclaron usando un molino de bolas durante 1h en un medio acuoso y posteriormente se trataron en agua hirviendo con agitación para eliminar las impurezas solubles en agua y se lavaron con agua fría. Finalmente, los materiales sinterizados se obtuvieron mediante cocción a 1300°C.

Li *et al.* [68] elaboraron exitosamente un refractario con alto contenido de alúmina, sinterizando escoria de aluminio (sin calcinación previa) a 1530°C. Adeosun *et al.* [69] elaboraron ladrillos refractarios preparados para hornos, sinterizando escoria de aluminio y caolín; el ladrillo tuvo la mejor resistencia a altas temperaturas con adición de escoria de 40-70% en peso y tamaño de partícula de 150-212 µm.

Adeosun *et al.* [70] evaluaron las propiedades mecánicas de un compuesto de polipropileno (PP) y escoria de aluminio. Los grumos de escoria se trituraron y tamizaron entre 53-150 µm, concluyendo que para obtener una propiedad óptima de impacto, resistencia a la tracción y tenacidad, se debe adicionar 15% de escoria con tamaño de partícula 150 µm y/o adición de 20% de escoria para tamaño de 53 µm. Samat *et al.* [71] obtuvieron compuestos de PP y escoria después de mezclarlos con una extrusora; los productos finales tuvieron valores más altos de módulo de Young, resistencia a la tracción, estabilidad térmica y resistencia al desgaste que el PP convencional.

Yoshimura y Galindo, citados por Mahinroosta *et al.* [34], produjeron vidrio a base de silicato después de lavar las sales solubles del RNM y fundir el residuo o vidrio mineral de bajo contenido de silicio, en un sistema CaO-Al₂O₃.

Todos estos estudios muestran el vasto potencial del aprovechamiento de las escorias de aluminio y sus diferentes métodos de tratamiento, siendo la mejor opción después de la recuperación de aluminio metálico a través de la molienda y el tamizado, realizar un lavado para la eliminación de cloruros y nitruros y posteriormente decidir, si se quiere, hacer un proceso de extracción de alúmina o si se va a aplicar el RNM directamente en la producción de materiales de construcción. Los artículos de mayor relevancia, que facilitaran el proceso de selección de alternativa se encuentran resumidos en el (Anexo 9), en donde se explica el aporte que cada uno tiene al proyecto.

C. Exploración de ideas y selección de alternativa

Después de realizar el análisis de la oportunidad, teniendo en cuenta la información que se logró obtener y la debida revisión de literatura, se realiza una exploración de ideas por medio de la técnica de ideación conocida como el método Disney ilustrado en la Tabla VIII. A partir de este método se tuvo un proceso creativo en el cual se establecieron todas las alternativas para continuar con la selección de las más apropiadas y así, escoger la mejor opción a través de un modelo de decisión que será explicado posteriormente.

Como se puede observar, el método Disney tiene como objetivo proponer alternativas de aprovechamiento para la escoria de aluminio. La primera fase del método es adoptar el rol de soñador, donde lo que cuenta es dar paso libre a la creatividad; en la segunda fase las ideas se ponen en cuestión, ahora se adopta el rol realista, se debe filtrar las ideas iniciales y pensar en su viabilidad; por último, aparece el crítico, se toma una idea y se evalúan sus riesgos y posibles errores [72]. Al finalizar este método se obtuvieron cinco alternativas que lograron validar cada etapa. Las alternativas que permanecieron en estudio fueron aquellas de las que se tiene más información y mayor experiencia, se encuentran marcadas con color gris, a éstas se les realizará posteriormente una evaluación por medio de la metodología AHP.

TABLA VIII.
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
Agregados de arcilla expandida	Eliminación de impurezas mediante tratamiento térmico, preparación de muestras de pasta de arcilla y RNM, secado, y finalmente sintetización en un horno a 1170 - 1210 °C.	- Riesgo de no contar con los implementos necesarios para el proceso. - Riesgo de no lograr la eliminación de impurezas. - Riesgo de aumento en los costos.
Refractarios de RNM sin adiciones	Lavar el RNM a 200 °C para eliminar sales, calcinación a 100 °C, compactación del RNM y calcinación a 1500 °C. Pruebas de choque térmico a 660 °C.	- Riesgo de no contar con los implementos necesarios para el proceso. - Riesgo de no lograr la eliminación de sales. - Riesgo de aumento en los costos.
Preparación de gamma alúmina (γ-Al ₂ O ₃) por proceso pirometalúrgico	El RNM se alimenta a la llama de plasma y se utiliza argón como gas portador. El tamaño de partícula que debe obtenerse es de 8 μm.	- Proceso sofisticado y costoso. - Riesgo por la dificultad de implementación.
Preparación de gamma alúmina (γ-Al ₂ O ₃) por proceso hidrometalúrgico	Estos procesos constan de tres pasos: disolución alcalina o ácida de RNM, precipitación del líquido del filtro y calcinación del precipitado.	- Riesgo de no contar con los implementos necesarios para el proceso. - Riesgo de no lograr la eliminación de impurezas. - Riesgo de aumento en los costos.
Reemplazo de polvo de aluminio como agente espumante para sintetizar concreto celular ligero	Molienda y tamizado para lograr un tamaño de partícula de 45 μm.	- Riesgo de no contar con los implementos necesarios para el proceso. - Riesgo de aumento en los costos.

Reemplazo parcial del cemento Portland para la producción de concreto	La escoria debe molerse, tamizarse utilizando un tamiz de 90 μm y debe realizarse un proceso de apagado.	- Riesgo de no contar con los implementos necesarios para el proceso. - Riesgo de no lograr contacto con empresas cementeras.
Reemplazo del cemento Portland en la producción de morteros	Debe lavarse la escoria en agua destilada, secarse en una placa calefactora y posteriormente, agregar la escoria a la mezcla de mortero.	- Riesgo de no contar con los implementos necesarios para el proceso. - Riesgo de no lograr contacto con empresas cementeras.
Producción de cerámicas a base de titanato de magnesio y aluminio	Molienda y tamizado para lograr un tamaño de partícula menor a 90 μm , los polvos deben mezclarse usando un molino, se eliminan impurezas con agua hirviendo y luego con agua fría, los materiales sintetizados se obtienen mediante cocción a 1300 °C.	- Riesgo de no contar con los implementos necesarios para el proceso. - Riesgo de aumento en los costos.
Producción de compuesto de polipropileno y escoria de aluminio	Los grumos de escoria deben triturarse y tamizarse en partículas de tamaño de 53 μm a 150 μm .	- Riesgo de no contar con los implementos necesarios para el proceso. - Riesgo de aumento en los costos. - Riesgo de no lograr contacto con empresas de polipropileno.
Producción de vidrio a base de silicato	Se debe llevar a cabo el proceso de lavado del RNM y fundir el residuo o vidrio mineral de bajo contenido de silicio, en un sistema CaO - Al ₂ O ₃ .	- Riesgo de no contar con los implementos necesarios para el proceso. - Riesgo de aumento en los costos. - Riesgo por la dificultad de implementación.

La elección de la alternativa se hizo por medio del método analítico jerárquico AHP, el cual se basó en el resultado del método Disney. Después de definir las opciones que serían comparadas, se eligen los criterios de evaluación los cuales están dirigidos a la viabilidad de la realización del proyecto, éstos se eligieron teniendo en cuenta aquellos factores que se consideran más influyentes en la realización del proyecto, fueron definidos por el equipo de trabajo en compañía del director (profesor experto en materiales) y la codirectora (profesora experta en finanzas y mercadeo). Se define que los criterios a evaluar serán el costo asociado, la facilidad de implementación, la disponibilidad de información, el cumplimiento de las especificaciones y el impacto ambiental.

Para el criterio de costo asociado a la alternativa se definió la escala mostrada en la Tabla IX, siendo 0 el puntaje que representa el mayor costo y 2 el menor costo, el análisis se hizo considerando el proceso necesario para darle ese uso a la escoria de aluminio; algunos de los costos considerados para el puntaje de cada alternativa fueron el costo por el proceso de molienda, gastos energéticos por incrementos de temperatura, costo asociado al tamizado, entre otros. En la Tabla XIV se muestra el puntaje asignado.

*TABLA IX.
ESCALA DE PUNTAJE PARA CRITERIO COSTO*

Escala puntaje	Explicación
0	Mayor costo asociado a la alternativa
1	Costo promedio asociado a la alternativa
2	Menor costo asociado a la alternativa

A la hora de evaluar el criterio de facilidad de implementación se definió la escala mostrada en la Tabla X, siendo 0 el puntaje que representa que no es factible la implementación y 2 un nivel de dificultad de implementación bajo, el análisis se realizó considerando qué tan factible es implementar el proceso necesario; algunos de los factores tenidos en cuenta son la experiencia y, dispositivos y materiales con los que se cuenta para desarrollar las pruebas de laboratorio. En la Tabla XIV se muestra el puntaje asignado.

*TABLA X.
ESCALA DE PUNTAJE PARA CRITERIO FACILIDAD DE IMPLEMENTACIÓN*

Escala	Explicación
--------	-------------

0	Nivel de dificultad de implementación alto
1	Nivel de dificultad de implementación medio
2	Nivel de dificultad de implementación bajo

Para el criterio de disponibilidad de información se definió la escala mostrada en la Tabla XI, siendo 0 el puntaje que representa que no hay información al respecto y 2 que se encuentra cantidad importante de información al respecto, el análisis se llevó a cabo partiendo de información encontrada en la revisión de literatura, teniendo en cuenta si se habla ampliamente del proceso, sus beneficios o consecuencias, entre otros factores. En la Tabla XIV se muestra el puntaje asignado.

*TABLA XI.
ESCALA DE PUNTAJE PARA CRITERIO DISPONIBILIDAD DE INFORMACIÓN*

Escala puntaje	Explicación
0	No hay información
1	Se encuentra información al respecto
2	Se encuentra cantidad importante de información al respecto

Debido a que uno de los beneficios que se busca con la realización del proyecto es dar un valor agregado a un residuo, se evalúa si la alternativa afecta las propiedades del material. Se definió la escala mostrada en la Tabla XII, siendo 0 el puntaje que representa que al aplicar la alternativa se afectan o empeoran las propiedades del material y 2 que las propiedades del material se mantienen o mejoran, se tuvo en cuenta los antecedentes en los que se mencionan qué sucede con el material luego de implementar la escoria de aluminio. En la Tabla XIV se muestra el puntaje asignado.

*TABLA XII.
ESCALA DE PUNTAJE PARA CRITERIO CUMPLIMIENTO ESPECIFICACIONES*

Escala	Explicación
0	Afecta o empeora las propiedades
1	No afecta ni mejora las propiedades
2	Las propiedades se mantienen o mejoran

Por último, se decidió que era importante incluir un criterio que capturara el impacto ambiental de la realización de cada alternativa, debido a que algunas requieren gran gasto energético y otras, requieren el uso de otros materiales que generan residuos. Como se ha mencionado a lo largo del trabajo, el proyecto busca aplicar economía circular, por lo que sería incoherente elegir una alternativa de reutilización que implique generar mayor daño ambiental. Se utilizó la escala mostrada en la Tabla XIII, siendo 0 el puntaje que representa un impacto ambiental alto y 2 representa un impacto ambiental bajo. En la Tabla XIV se muestra el puntaje asignado.

*TABLA XIII.
ESCALA DE PUNTAJE PARA CRITERIO IMPACTO AMBIENTAL*

Escala	Explicación
0	Impacto ambiental alto
1	Impacto ambiental medio
2	Impacto ambiental bajo

En la Tabla XIV se sintetizaron los puntajes de cada criterio para cada alternativa siguiendo las explicaciones hechas anteriormente para cada criterio y su respectiva escala de puntaje.

TABLA XIV.
CRITERIOS AHP PARA CADA ALTERNATIVA CON SUS RESPECTIVOS PUNTAJES

Alternativas	Criterios				
	Costo asociado a la alternativa	Facilidad de implementación	Disponibilidad de información	Cumplimiento especificaciones	Impacto ambiental
Refractarios de RNM sin adiciones	0	2	1	1	2
Preparación de gamma alúmina (γ -Al ₂ O ₃) por proceso hidrometalúrgico	1	0	1	2	0
Reemplazo parcial del cemento Portland para la producción de concreto	2	1	2	2	2
Reemplazo del cemento Portland en la producción de morteros	2	2	2	2	2
Producción de compuesto de polipropileno y escoria de aluminio	1	0	2	2	1

Después de definir cada criterio, se utilizó el método visual de comparación, el cual se ilustra en el Anexo 10, con el fin de ponderar cada criterio y asegurar la consistencia de los puntajes asignados. Así mismo, se procede a completar la matriz de comparación de pares del método AHP.

A partir de la matriz de comparación de pares se logró obtener el vector prioridad de los criterios y su consistencia, resultado que se ilustra en la Tabla XV. Estos porcentajes evidencian el peso ponderado de cada criterio, estos valores serán la base para analizar cada alternativa expuesta. Es importante mencionar que el vector prioridades de los criterios resulta consistente.

TABLA XV.
VECTOR PRIORIDAD DE LOS CRITERIOS Y CONSISTENCIA METODOLOGÍA AHP

Criterios	Vector Prioridades
Costo	10%
Facilidad implementación	16%
Disponibilidad información	6%
Cumplimiento especificaciones	41%
Impacto ambiental	28%
¿ES CONSISTENTE?	SI

Finalmente, teniendo el vector prioridades de los criterios y el método visual debidamente definido con base en los puntajes asignados a cada alternativa, se realiza el método analítico jerárquico total AHP, los resultados pueden observarse en la Tabla XVI. Allí se observa el porcentaje total obtenido por cada una de las cinco alternativas considerando los criterios, además se muestra el mayor porcentaje obtenido el cual fue de 27%, la mejor alternativa es reemplazo del cemento Portland en la producción de morteros. En el Anexo 10 se muestra claramente todo el desarrollo de la metodología AHP, en la primera hoja de Excel se muestran los criterios y alternativas, en la segunda la escala usada para los criterios y los puntajes asignados a cada alternativa debido a que no se incluyen todas las tablas en el documento, en la tercera hoja se realizó la metodología visual, en la cuarta hoja se le aplicó el análisis a los criterios el cual da como resultado el vector de prioridades y consistencia, y por último, en la hoja cinco se llevó a cabo en análisis jerárquico total AHP del cual resulta la mejor alternativa de uso para la escoria de aluminio.

TABLA XVI.
RESULTADOS METODOLOGÍA AHP

Alternativas	Gran total	Mejor alternativa
Refractarios de RNM sin adiciones	18%	27%
Preparación de gamma alúmina (γ -Al ₂ O ₃) por proceso hidrometalúrgico	13%	
Reemplazo parcial del cemento Portland para la producción de concreto	24%	
Reemplazo del cemento Portland en la producción de morteros	27%	
Producción de compuesto de polipropileno y escoria de aluminio	18%	Reemplazo del cemento Portland en la producción de morteros

D. Objetivos

OBJETIVO GENERAL:

Diseñar un proceso productivo para el aprovechamiento del residuo escoria de aluminio como materia prima en la fabricación de morteros.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Determinar las características fisicoquímicas de la escoria de aluminio antes y después de lavado, mediante difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido (SEM).
- Definir parámetros de molienda de la escoria de aluminio, que permitan obtener un tamaño de partícula adecuado según la norma NTC3493.
- Establecer los requerimientos de operación del proceso de recuperación, mediante la aplicación de herramientas de ingeniería industrial.
- Evaluar la viabilidad financiera del proceso de recuperación para la escoria de aluminio, mediante proyecciones de flujo de caja y análisis de riesgo.

E. Plan de trabajo (PdT)

Con el fin de dar cumplimiento a los objetivos, el equipo elaboró un plan de trabajo el cual puede observarse en la Tabla XVII.

TABLA XVII.
PLAN DE TRABAJO

Objetivo Específico	Actividades	Área IISE	Herramientas de Ingeniería Industrial	Entregable (Alcance)	Fecha Entrega
1. Determinar las características fisicoquímicas del residuo escoria de aluminio mediante difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido (SEM).	1.1. Tomar muestras.	12. Ingeniería de diseño y fabricación.	Fundamentos de materiales.	Muestras representativas de la escoria de aluminio.	5-11 Julio/2021
	1.2. Aplicar técnica DRX y SEM.	12. Ingeniería de diseño y fabricación. 5. Ingeniería de calidad y confiabilidad.	Procesos de remoción de material. Procesamiento de partículas. Diseño de experimentos.	Informe de la composición química y las características físicas de la escoria inicial.	19-25 Julio/2021
	1.3. Lavar la escoria de aluminio con abundante agua y secar.			Material lavado con disminución o eliminación de nitruros e impurezas.	26 Julio-01 agosto/2021

Objetivo Específico	Actividades	Área IISE	Herramientas de Ingeniería Industrial	Entregable (Alcance)	Fecha Entrega
	1.4. Aplicar técnica DRX y SEM a la escoria lavada.			Informe de la composición química y las características físicas de la escoria lavada.	09-15 agosto/2021
2. Definir parámetros de molienda de la escoria de aluminio, que permitan obtener un tamaño de partícula adecuado según la norma NTC3493.	2.1. Determinar la distribución granulométrica de las partículas por tamizado, según la norma NTC3493.	14. Diseño e ingeniería de sistemas. 12. Ingeniería de diseño y fabricación.	Verificar y validar los requisitos. Fundamentos de materiales. Procesos de remoción de material. Procesamiento de partículas.	Informe con el perfil de granulometría del material.	16-22 agosto/2021
	2.2. Hacer ensayo hardgrove.			Informe con dureza y gasto energético.	23-29 agosto/2021
	2.3. Evaluar el efecto de la velocidad de molienda, tiempo y tipo de molino en el tamaño de partícula.			Informe con el análisis de los parámetros de molienda definidos.	13-19 septiembre/2021
	2.4. Determinar la distribución granulométrica de las partículas por tamizado y granulometría laser, según la norma NTC3493.			Informe con el perfil de granulometría del material.	27 septiembre-03 octubre/2021
3. Establecer los requerimientos de operación del proceso de recuperación, mediante la aplicación de herramientas de ingeniería industrial.	3.1. Definir el proceso de aprovechamiento de la escoria de aluminio.	4. Ingeniería de instalaciones y gestión energética.	Disposición de las instalaciones.	Diagrama de flujo del proceso definido.	15-22 noviembre/2021
	3.2. Definir los requisitos del sistema final.	7. Ingeniería y gestión de operaciones. 4. Ingeniería de instalaciones y gestión energética.	Planificación de operaciones. Manejo de materiales. Dimensionamiento de las instalaciones.	Informe con especificaciones de maquinaria, instalaciones, mano de obra, costos de operación y la inversión requerida.	
	3.3. Determinar la distribución de planta óptima para el proceso.			Diseño de la distribución de planta óptima para el funcionamiento del proceso.	
	3.4. Realizar un modelo de simulación para predecir el comportamiento del proceso.	2. Investigación y análisis de operaciones.	Simulación.	Resultado del proceso simulado, con sus respectivos valores de las variables y parámetros.	15-22 noviembre/2021
4. Evaluar la viabilidad financiera del proceso de recuperación para	4.1. Determinar costos de operación.	3. Análisis económico de ingeniería.	Contabilidad y contabilidad de costos.	Inversiones, costos y gastos del proyecto determinados.	15-22 noviembre/2021

Objetivo Específico	Actividades	Área IISE	Herramientas de Ingeniería Industrial	Entregable (Alcance)	Fecha Entrega	
la escoria de aluminio, mediante proyecciones de flujo de caja y análisis de riesgo.	4.2. Calcular estados financieros.		Estimación de elementos económicos.			
	4.3. Determinar estructura financiera del proyecto.					
	4.4. Proyectar flujos de caja del proyecto.		Toma de decisiones que impliquen riesgo.	Proyecciones de flujos de caja.	15-22 noviembre/2021	
	4.5. Calcular criterios de evaluación.			Criterios de evaluación financiera de proyectos calculados.	15-22 noviembre/2021	
	4.6. Desarrollar modelo de simulación.			Análisis de riesgo mediante simulación financiera.		15-22 noviembre/2021
	4.7. Realizar análisis de riesgo financiero.					

Adicionalmente, en el Anexo 11 se encuentra el cronograma detallado elaborado en Project® de todas las actividades que se planea llevar a cabo en Proyecto de Diseño 2.

V. DISEÑAR

En esta sección se encuentra la información del diseño y validación del proceso productivo que permite la recuperación de escoria de aluminio. Para tal fin, se llevaron a cabo pruebas de laboratorio con el propósito de caracterizar el material entregado por Alúmina S.A. y establecer los parámetros de molienda que determinan los requerimientos del proceso. Posteriormente, se hizo una macro localización de la planta en donde se llevará a cabo todo el proceso de recuperación y una distribución de dicha planta, teniendo en cuenta la maquinaria que se debe utilizar. Por último, se validó la propuesta y el cumplimiento de los requisitos definidos a través de un modelo simulado, utilizando el software de simulación SIMIO.

A. Desarrollo del diseño de la solución

Para el desarrollo de la propuesta de diseño del proceso productivo para la recuperación de la escoria de aluminio, el equipo del proyecto en compañía de los docentes y con el apoyo del Servicio Geológico Colombiano (SGC), realizó diferentes pruebas de laboratorio que permitieron la caracterización del material y la determinación del paso a paso a seguir para lograr su recuperación.

Se inició con la recepción de la escoria de aluminio donada por la empresa Alúmina S.A (Fig. 12), la cantidad donada fueron 20 kilogramos.



Fig. 12. Escoria de aluminio

Como se mencionó anteriormente, la escoria de aluminio contiene nitruros, que al entrar en contacto con el agua generan gases de amoníaco, el cual es considerado peligroso dado su carácter irritante y corrosivo [16]; por esta razón, con el propósito de eliminar dicho componente, el primer paso fue realizar el proceso de lavado (o apagado) que consistió en colocar sobre una superficie bien distribuida la escoria de aluminio y agregarle aproximadamente 20 litros de agua diarios durante 5 días de manera manual (Fig. 13. a). Posteriormente, se llevó a cabo el proceso de secado para el cual se hizo uso de un horno a una temperatura de entre 115° C y 120° C (Fig. 13. b) durante un día completo, para asegurar que el material estuviera completamente seco.

Cabe resaltar que se tomaron muestras de la escoria de aluminio antes y después del proceso de lavado para comparar su composición química y mineralogía lo cual será discutido posteriormente.



Fig. 13. a) Proceso de lavado de escoria de aluminio y b) secado de la escoria lavada

Los ensayos fisicoquímicos se desarrollaron en colaboración con el Servicio Geológico Colombiano ubicado en la entrada 6 de la Universidad del Valle – Sede Meléndez, en la ciudad de Cali. Se realizó el ensayo de densidad, difracción de rayos X (DRX), Hardgrove y pruebas de moliendabilidad. A lo largo de este apartado se hará discusión sobre los resultados obtenidos en dichas pruebas. Adicionalmente, con el propósito de conocer las características morfológicas de la escoria de aluminio, se realizó la prueba de microscopía electrónica de barrido (SEM - *Scanning Electron Microscopy*), la cual utiliza un haz de electrones en lugar de un haz de luz para formar una imagen ampliada de la superficie de un objeto. Este instrumento permite la observación y caracterización superficial de sólidos inorgánicos y orgánicos. Tiene una profundidad de campo que permite enfocar una gran parte de la muestra [144].

En las Fig. 14 y Fig. 15 se puede observar la morfología de la escoria antes y después del proceso de lavado respectivamente; en la primera (Fig. 14), en que el material no ha sido modificado, se observa que éste tiene una apariencia similar a la de un polvo, como el cemento. En esta imagen se puede observar que la escoria se ve como partículas aglomeradas de manera aleatoria, con presencia de partículas de forma redonda, alargada, ovalada, partículas más finas que otras, etc. Con el propósito de determinar la influencia del proceso de lavado en la morfología de la escoria de aluminio, se realizó el ensayo de SEM después del lavado y

secado (micrografía SEM mostrada en la Fig. 15), en que se evidencia que, aunque el material también presenta aglomeraciones, éstas son menos evidentes que en la escoria sin lavar.

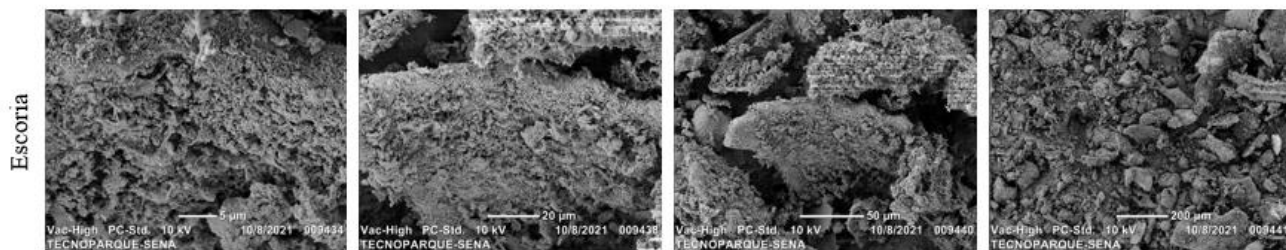


Fig. 14. SEM escoria sin lavar

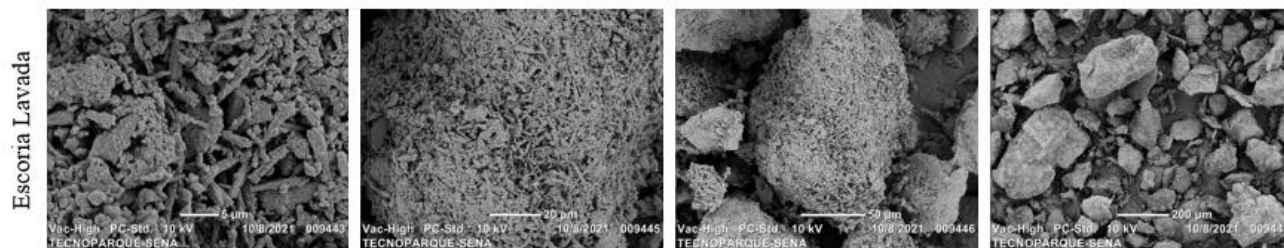


Fig. 15. SEM escoria lavada

Además, se pueden observar partículas menos heterogéneas, por lo tanto, se podría decir que la morfología de la escoria de aluminio se modificó después del proceso de lavado. Estas conclusiones y lo observado en la micrografía SEM se asemejan a los resultados encontrados y reportados por P. Ramaswamy *et al.* en el año 2019, en el que menciona que, “aunque ambas partículas de polvo son aglomerados de varias partículas, la forma de las muestras lavadas es más uniforme sin la presencia de partículas muy grandes” [145] y se muestra la comparación entre la escoria antes y después de ser lavada bajo el proceso de micrografía SEM.

Con el objetivo de lograr una caracterización mineralógica y composición química de la escoria de aluminio antes y después de ser sometida al proceso de lavado, se llevó a cabo un análisis por difracción de rayos X (DRX) (Tabla XVIII), con la finalidad de ejecutar un estudio cualitativo de las fases cristalinas de la escoria de aluminio, fundamentalmente orientado en la observación de su composición química.

TABLA XVIII.
RESULTADOS DE LA DIFRACCIÓN DE RAYOS X

Compuesto	Formula Química	Escoria sin lavar (%)	Escoria lavada (%)
Gibbsite	Al(OH) ₃	3,7	27,5
Nitruros de Aluminio	AlN	18,2	2,2
Oxido de Aluminio	Al ₂ O ₃	14,8	17,1
Aluminio	Al	6,3	3,86
Diaoyudaíta	NaAl ₁₁ O ₁₇	0	0,81
Óxidos de Hierro	Fe ₂ O ₃	0,3	2,4
Cuarzo	SiO ₂	1,5	5,2
Espinel	MgAl ₂ O ₄	34	25,5

En la Tabla XVIII se puede observar cómo el porcentaje de nitruros de aluminio presente en la escoria desciende de 18% en la escoria sin lavar a 2,2% después de lavada, también se observa un aumento en el porcentaje de óxido de aluminio. Por su parte, el porcentaje de aluminio disminuye. En general, los valores obtenidos permiten determinar que hubo una influencia del lavado sobre la calidad del material; sin embargo, éstos deberán ser validados y corroborados mediante un análisis químico por espectroscopia dispersiva de energía (EDS, por sus siglas en inglés).

Estos resultados se encuentran cerca a los rangos de los indicadores de desempeño mostrados en la Tabla VI (etapa **Medir** según la literatura). Por lo anterior, es posible afirmar que las metas propuestas en los indicadores son susceptibles de ser alcanzados; debido a que se obtuvo una reducción de los nitruros después del apagado, lo que es un resultado importante pues de no ser así, el material sería nocivo tanto para el ambiente como para la salud. Además, si estos gases se generan en el proceso de cementación, pueden generar vacíos al interior de los morteros, disminuyendo sus propiedades mecánicas. Aunque el aumento de los óxidos de aluminio también era una meta dentro de los indicadores de desempeño propuestos, este material en específico no presentó altos porcentajes de este componente dado que se trata de la fundición secundaria de chatarra de aluminio y hay presencia de muchos otros componentes en la muestra. Finalmente, en las muestras no se observó presencia de cloruros, lo que es un resultado satisfactorio, ya que esto implicaría un proceso adicional para eliminar dichas sales.

Con relación a la prueba de densidad, que es la relación entre la masa y el volumen de la sustancia [146], el resultado fue 2.19 g/cm^3 . Este valor debe tenerse en cuenta en la ficha técnica entregada al cliente, es importante debido a que permite categorizar e identificar el material, y debe tenerse en cuenta al mezclar el producto con otras sustancias.

Como un primer acercamiento a las pruebas de moliendabilidad del material, el ensayo Hardgrove (Fig. 16) permite obtener parámetros de molienda del material que sirven como base para modelar la molienda en molino de bolas; también permitió conocer que según el índice de Bond (6.82 Kwh por tonelada métrica) la escoria de aluminio es un material semiblando. Después de este ensayo se comenzaron las pruebas de moliendabilidad en molino de bolas (Fig. 17) que se tenía a disposición en el SGC, cargado con bolas de acero y los tiempos de molienda fueron 15, 30, 45, 60, 90, 120 y 150 minutos.



Fig. 16. a) Equipo ensayo de Hardgrove b) Detalle del compartimiento



Fig. 17. Molino de bolas

Este tipo de molino de bolas funciona por fricción y cuenta con una capacidad de 500 gramos. En la Fig. 18 se muestran los resultados obtenidos, en el eje x se encuentra el tamaño de partícula en micrómetros (μm), y en el eje y el porcentaje pasante. Cabe recordar que el porcentaje pasante en tamiz 325 ($45 \mu\text{m}$) que se requiere es del 66% (es decir, máximo retenido 34%) siguiendo la NTC3493. Cada línea en el gráfico representa el tamaño de partícula conseguido con cada tiempo de molienda.

En el gráfico se observa que al realizar la molienda durante 150 minutos se alcanza un porcentaje pasante de aproximadamente 18% con tamaño de partícula de $45 \mu\text{m}$. Aquí fue posible evidenciar que la escoria no presentó un cambio en los tamaños de partícula con el incremento del tiempo, lo que pudo deberse a las propiedades del material, lo cual aparentemente provoca que se lamine y no muestre un cambio significativo en la disminución de tamaño de partícula con el incremento del tiempo. A razón de esto, se concluye que el molino de bolas no es el apropiado para realizar la molienda de la escoria de aluminio. Por lo anterior, los resultados de esta prueba no se tomaron en cuenta como parámetros del proceso; sin embargo, permitieron establecer que es necesario buscar otro principio o mecanismo de molienda, como lo es la molienda por impacto.

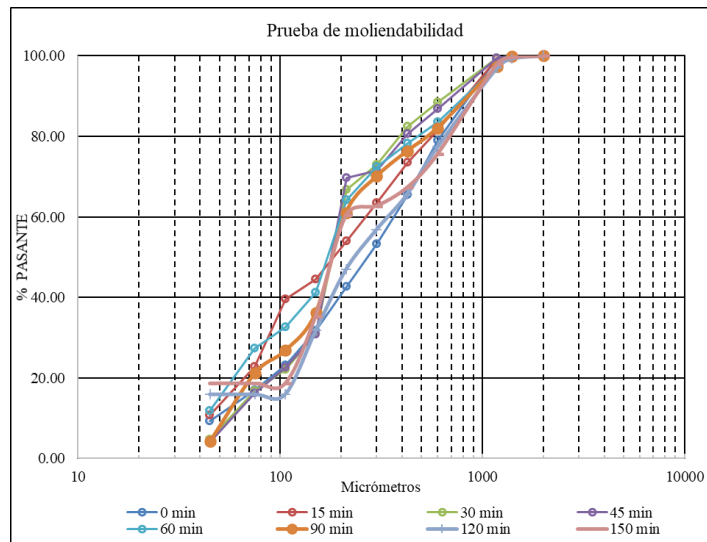


Fig. 18. Comportamiento de la escoria de aluminio molida en molino de bolas

Dado que el molino de bolas no fue eficiente para este material (escoria de aluminio), se realizaron pruebas de moliendabilidad en el molino de impacto a disposición en el SGC (Fig. 19) en el cual los tiempos de molienda son menores; por esta razón, se realizaron pruebas con una duración de 2, 4, 6, 8 y 10 minutos. Teniendo en cuenta que la capacidad del molino es de 100 gramos y su tiempo de funcionamiento es de máximo 2 minutos, para tiempos mayores a éste, se requiere moler por intervalos de 2 minutos, con periodos detenidos entre moliendas de entre 10 y 15 minutos; esto con el propósito de evitar daños en el equipo por recalentamiento o desgaste.



Fig. 19. Molino de impacto (anillos)

Pese a esto, la escoria continuó presentando un comportamiento diferente al esperado, ya que al aumentar el tiempo de molienda no se logró alcanzar el tamaño de partícula necesario para cumplir la norma (NTC3493) como se puede observar en la Fig. 20; sin embargo, los porcentajes alcanzados de escoria con tamaños inferiores a los 45 μm , fue superior al obtenido con molino de bolas. En el eje x de la Fig. 20, se observa el tamaño de partícula en micrómetros (μm) y en el eje y el porcentaje pasante. En este caso se observa que con un tiempo de molienda de 10 minutos se alcanza un porcentaje pasante de 45 μm es de aproximadamente 56.21%, es importante mencionar que este porcentaje se acerca considerablemente al deseado, además que, podría ser incrementado si la muestra con partículas con tamaños superiores al requerido se separa y se somete una vez más a molienda por impacto.

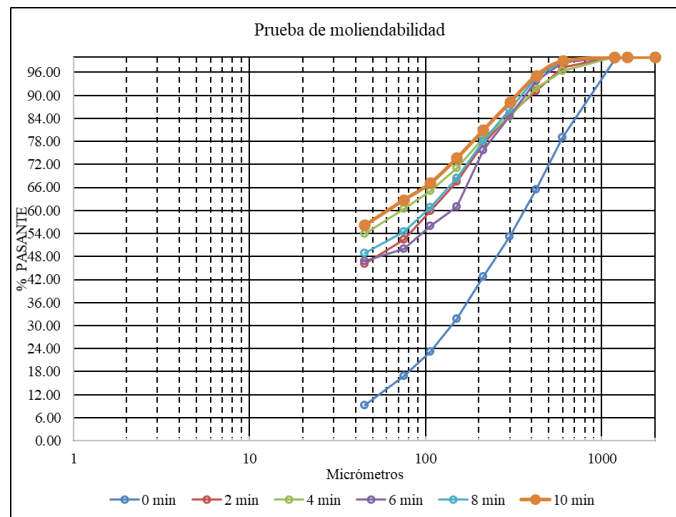


Fig. 20. Comportamiento de la escoria de aluminio molida en molino de impacto (anillos)

Con el fin de proyectar cómo es el comportamiento del porcentaje pasante de material y el porcentaje esperado, se procedió a realizar un análisis de la cinética de la escoria de aluminio con base en el *Estudio de la cinética de Molienda* escrito por Leyva Ramírez et al. [147] (Fig. 21). En esta figura en el eje x se encuentra el tiempo en minutos y en el eje y el porcentaje retenido en el tamiz de 45 μm . Como se observa, a partir de este análisis se proyecta que al moler la escoria de aluminio en el molino de impacto (molino de anillos) durante 12 minutos se alcanza el tamaño de partícula deseado (máximo 34% del material retenido en el tamiz de 45 μm , es decir, 66% pasante). En el Anexo 13 se encuentran los resultados obtenidos en todos los tiempos de molienda, un resumen general de ellos y por último el análisis de cinética.

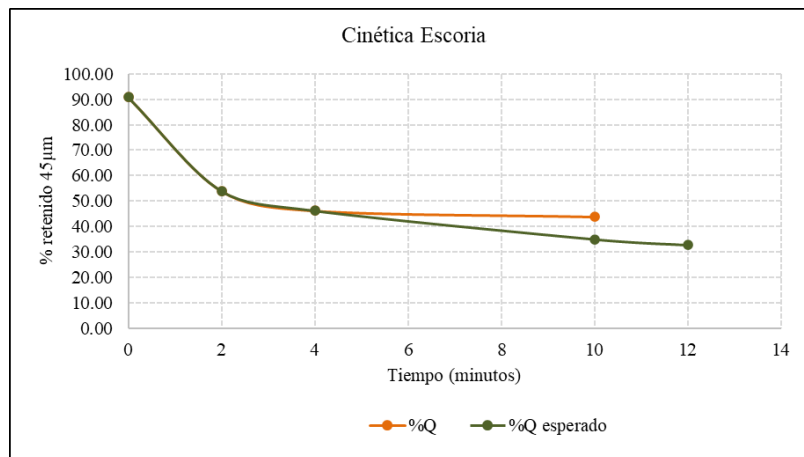


Fig. 21. Cinética de molienda

Con base en los resultados obtenidos en la fase experimental, se hace la propuesta de diseño para el proceso productivo de recuperación de la escoria de aluminio. El diagrama de flujo se muestra a continuación (Fig. 22).

DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO PRODUCTIVO PARA LA RECUPERACIÓN DE ESCORIA DE ALUMINIO PARA SU USO COMO MATERIA PRIMA EN MORTEROS

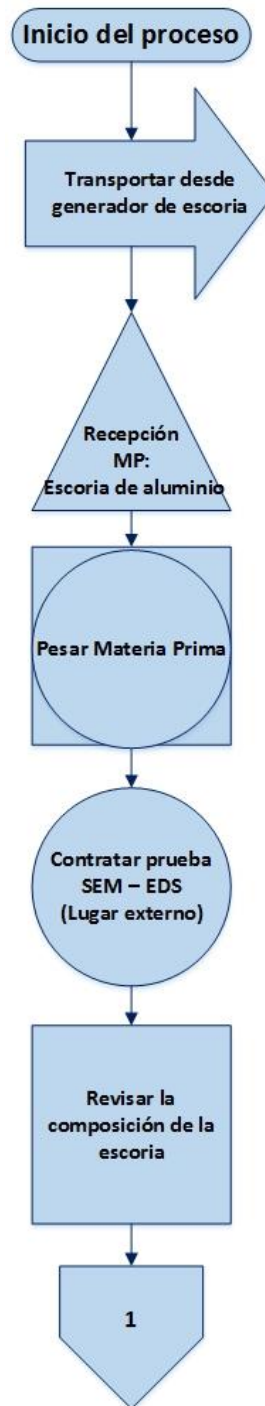


DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO PRODUCTIVO PARA LA RECUPERACIÓN DE ESCORIA DE ALUMINIO PARA SU USO COMO MATERIA PRIMA EN MORTEROS



DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO PRODUCTIVO PARA LA RECUPERACIÓN DE ESCORIA DE ALUMINIO PARA SU USO COMO MATERIA PRIMA EN MORTEROS



RESUMEN DE EVENTOS	Comentarios	
Operaciones	6	Este diagrama de flujo muestra el proceso diseñado en el presente proyecto de diseño para reutilizar la escoria de aluminio.
Inspecciones	2	
Arribos	1	
Almacenamientos	4	
Decisiones	1	
Operación – Inspección	1	
Transportes	1	
	16	

Fig. 22. Diagrama de flujo del proceso de recuperación de la escoria de aluminio

1) Maquinaria y equipos requeridos

Una vez finalizadas las pruebas de laboratorio y teniendo en cuenta el diagrama de flujo anterior, se procedió a hacer una búsqueda de la maquinaria y equipos requeridos para dicho proceso. La selección de equipos se realizó teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la sección anterior, bajo la asesoría del SGC y un empresario experto del sector de la construcción de la ciudad de Cali y actual dueño de la empresa Kubico Construcciones S.A.S, empresa en la cual se utilizan las escorias granuladas de alto horno como reemplazo parcial del cemento. De acuerdo con el SGC, una vez se ha caracterizado el material, se puede hacer la selección de los equipos mediante las especificaciones técnicas de los catálogos respectivos; éstas incluyen dimensiones, capacidades y potencias, las cuales se tendrán en cuenta con el fin de proporcionar los datos de entrada para la simulación del proceso y para hacer la distribución de planta.

Teniendo en cuenta que la escoria de aluminio es un material particulado muy fino, el sistema debe ser cerrado para que no se pierda tanto material como sucedió en la etapa de experimentación. En primera instancia, el transporte del material desde la planta de Alúmina hasta la planta de recuperación se debe hacer en camiones con capacidad de 30 ton para transportar las 75 toneladas mensuales que se producen [16] y una válvula trasera para sacar el material. Según las resoluciones del Ministerio de Transporte Colombiano, uno de los vehículos más utilizado para las operaciones de transporte terrestre nacional y urbano, y con capacidad de 32 ton, son las mulas de dos ejes (Fig. 23), cuyas dimensiones estándar son 12 m de largo x 2,5 m de ancho x 2,4 m de alto [148]. Una vez el camión llegue con el material, debe ser inspeccionado y pesado en una báscula de piso.



Fig. 23. Camión para transporte de escoria [148]

Después de la inspección, el material se debe depositar a través de una manguera en una tolva o silo (Fig. 24.a) de almacenamiento de materia prima. Este silo de fondo cónico es especial para guardar materiales para la producción de morteros como la escoria de aluminio; además, cuenta con un modo de dosificación automática y pesaje acumulativo [149]. El silo estará conectado a una piscina con una noria para lavado, especial para lavar materiales finos, en donde se hará el proceso de apagado de la escoria (Fig. 24.b) con un tornillo sin fin inmerso que arrastra la escoria fina que cae en la parte inferior de la cuba hacia la rueda de drenaje, quien se encarga de recuperar, drenar y luego descargar el material [150] en un tornillo sin fin que estará conectado a un horno rotativo basculante modelo FARB-2 (Fig. 24.c). Este horno de última generación y utilizado para el

procesamiento de todo tipo de escorias y chatarras de aluminio, se encargará del proceso de secado [151]. La escoria lavada se almacenará en otro silo para producto en proceso que abastecerá el molino que se encargará de disminuir el tamaño de partícula del material, de manera que cumpla con la norma NTC 3493. Todas las máquinas estarán conectadas a través de un tornillo sin fin, el cual es un tubo con un tornillo al interior que rota gracias a un motor y permite empujar el material.



Fig. 24. a) Silo para almacenamiento [149], b) Noria para lavado de escoria [150] y c) Horno rotativo basculante [151]

Considerando los resultados de la molienda discutidos previamente y según el análisis que se hizo, en donde se espera que con un molino de anillos se obtenga el porcentaje de material retenido requerido a los 12 min, se decidió utilizar un molino con el mismo principio de funcionamiento de impacto que el molino de anillos. El molino que más se adapta a las necesidades de este proyecto debido a su capacidad de producción (150-800 kg/h) y tamaño de descarga (10-150 μ m) es el molino vibratorio ALPA MZ500 que se muestra en la Fig. 25, cuyo principio de funcionamiento es proveer una rotación rápida al material para que sea sometido a potentes impactos y fuerzas de fricción, de modo que quede triturado en un polvo ultrafino y uniforme [152].



Fig. 25. a) Molino vibratorio ALPA [152] y b) Línea de producción de molienda [153]

La escoria molida se almacenará en un último silo de producto terminado, en donde se hará un empaclado manual y a través de una boquilla los operarios llenarán los bultos que finalmente serán almacenados previos a la venta. Teniendo en cuenta que el producto terminado es un agregado para el cemento, se utilizarán las especificaciones de empaclado y embalaje de dicho material. El cemento es empaclado en sacos de papel Kraft semi extensible con válvulas de llenado, ya que se trata de un material de llenado a gran velocidad. El peso del papel se encuentra entre 82 y 95 g/m², está diseñado con tecnología anti desgarre y rotura para disminuir los daños durante el transporte y la manipulación y cuenta con micro perforaciones que permiten eliminar el aire acumulado en el proceso de llenado. Los sacos tienen una capacidad máxima 50 kg; sin embargo, la escoria se comercializará en sacos de 30 kg para garantizar mejores condiciones ergonómicas de los trabajadores a la hora de hacer las cargas [154]. Estos sacos se enviarán al área de almacenamiento en donde se dispondrán en estibas de 1 m de ancho x 1,2 m de largo.

Teniendo en cuenta los equipos seleccionados con sus respectivos catálogos, se calcularon las capacidades de cada proceso y máquina, como se muestra en la Tabla XIX, haciendo uso de la herramienta Excel (Anexo 14), estos son los datos de entrada para la simulación del proceso.

*TABLA XIX.
REQUISITOS DEL PROCESO DE RECUPERACIÓN*

Proceso	Máquina	Cantidad	Velocidad (Kg/Hora)	Capacidad (Kg/Mes)
Inspección y pesado de materia prima	Báscula de piso	1		80 000
Almacenamiento de materia prima	Tolva / Silo almacenamiento	1		30 000
Secado	Horno rotativo basculante FARB-2	1	667 [151]	118 667
Almacenamiento de producto en proceso	Tolva / Silo almacenamiento	1		30 000
Molienda	Molino vibratorio MZ 500	1	532 [152]	94 667
Almacenamiento de producto terminado	Tolva / Silo almacenamiento	1		30 000
Empacado	Empacado manual	1	421	75 000 [16]
Total		7		

2) *Planeación del diseño de planta necesario para el proceso de recuperación de escoria de aluminio*

Para comenzar con la planeación del diseño de planta para el proceso de recuperación de escoria de aluminio se define la macro localización, la planta estará ubicada en el departamento del Valle. Según la guía de inversión de 2018 [155] el departamento del Valle del Cauca ocupa una región privilegiada para la atracción de inversionistas en varios sectores debido a sus ventajas competitivas en ubicación geoestratégica, sólida infraestructura y conectividad, tejido empresarial de talla mundial, recurso humano calificado, costos competitivos, calidad de vida, entre otros.



Fig. 26. Mapa de Colombia y Valle del Cauca

En cuanto a la micro localización, con la finalidad de determinar la ubicación óptima de la planta para el procesamiento de la escoria (Anexo 15), inicialmente se definieron unas posibles localidades cercanas a la planta de producción de aluminio/escoria; posterior a esto se definieron el costo del flete y el número de camiones a utilizar según la cantidad mensual a transportar, información suministrada por la empresa Transportes LEA [156].

El número de camiones se definió con base en la capacidad de cada uno y la cantidad de escoria a recoger en la planta de la empresa proveedora del material. La empresa Transportes LEA [156], nos suministró la información con respecto a la capacidad de los camiones, en este caso nos sugirieron 3 tractomulas de 2 ejes cada una con una capacidad de 30 toneladas, dada la cantidad de escoria mensual producida (75 toneladas) por la empresa proveedora del material, información suministrada previamente por dicha empresa.

El costo se definió teniendo en cuenta la cantidad mensual a despachar desde la planta productora de la escoria y la distancia recorrida desde dicho lugar hasta las posibles localidades previamente definidas. De igual modo, las distancias se calcularon a partir de las coordenadas establecidas anteriormente en un plano cartesiano, con el objetivo de establecer un valor de correlación entre los datos, lo cual permitió calcular el valor R, el cual fue utilizado en el software de logística Logware para determinar, según las coordenadas, el lugar óptimo para la ubicación de la planta de procesamiento.

Las coordenadas que arrojó el programa como resultado fueron, en $x = 0,84$ y en $y = 3,77$, contemplando el plano cartesiano mencionado anteriormente. Estas coordenadas hacían referencia a una ubicación en el norte de la ciudad de Cali como se puede observar en la Fig. 27. El punto F hace referencia a la intersección de las coordenadas, es decir la ubicación óptima de la planta. Por su parte, en la Fig. 28, se puede observar que la ubicación óptima de la planta es en la zona de Acopi, Yumbo.

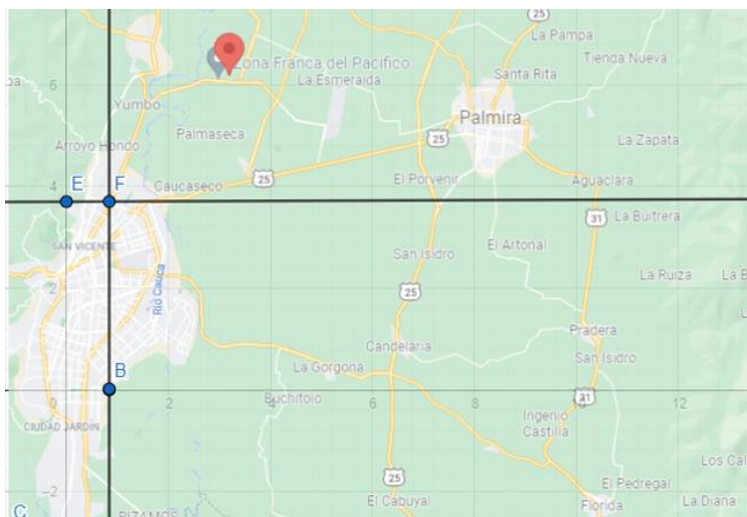


Fig. 27. Coordenadas de ubicación óptima de planta

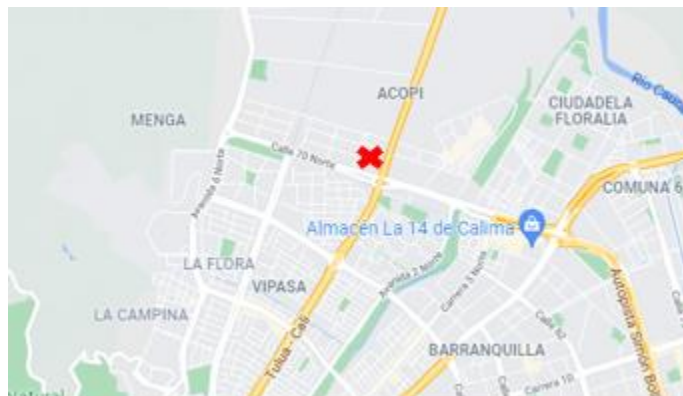


Fig. 28. Mapa de ubicación óptima de planta

Posteriormente a definir el diagrama de flujo del proceso y por ende la secuencia, además de la ubicación de la planta, se realizó el diagrama de relaciones (Anexo 16) haciendo uso de herramientas de distribución de planta para definir cuál sería el orden apropiado para las distintas áreas o departamentos que debe tener la planta en la que se realice el proceso de recuperación de la escoria de aluminio. Se definieron 11 áreas las cuales son: la entrada de vehículos de carga, zona de recepción y almacenamiento de la materia prima, zona de lavado, zona de secado, zona de almacenamiento de la escoria lavada y seca, zona de molienda, zona de almacenamiento de escoria lavada y molida, zona de empaque, zona de almacenamiento escoria empacada, zona de oficina/atención al cliente y, por último, zona de aseo y baños.

Con ayuda de la matriz de relaciones (Fig. 29) se definieron las relaciones que se deben tener entre las áreas o departamentos, y, por ende, el diagrama de relaciones (Fig. 30). A partir de ahí se logró identificar cuál es la cercanía necesaria entre algunas áreas y, por otro lado, cuales no pueden estar cerca debido por ejemplo a malos olores y/o la toxicidad de la escoria de aluminio.

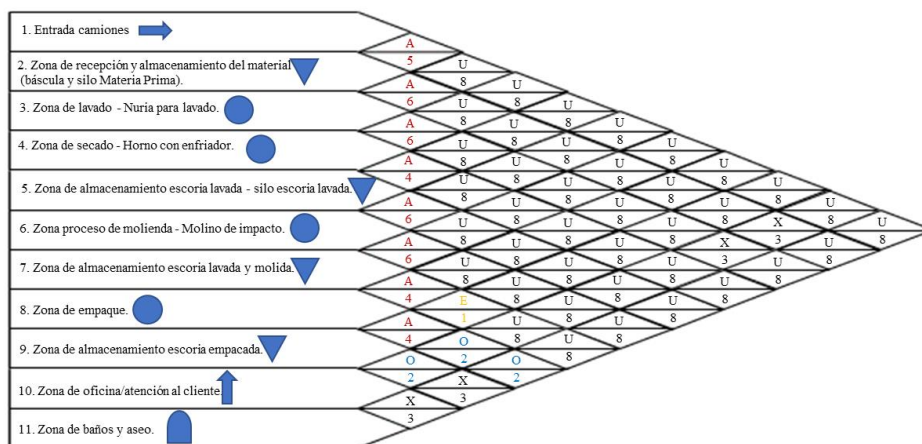


Fig. 29. Matriz de relaciones

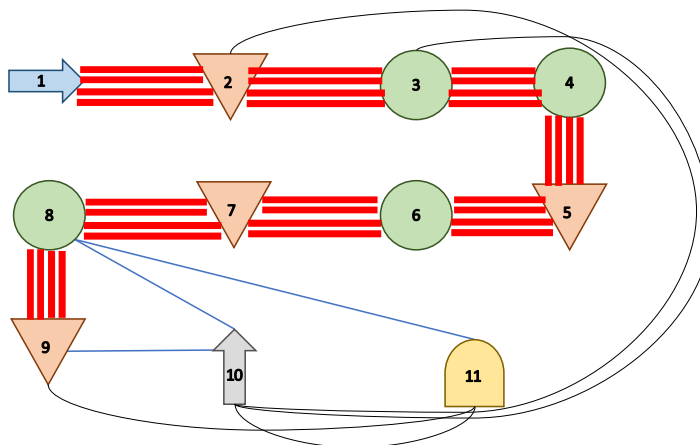


Fig. 30. Diagrama de relaciones

De acuerdo con lo anterior, se realizó una propuesta de distribución general de la planta (Fig. 31), sin embargo, en esta no se consideran las dimensiones de la maquinaria y equipos.

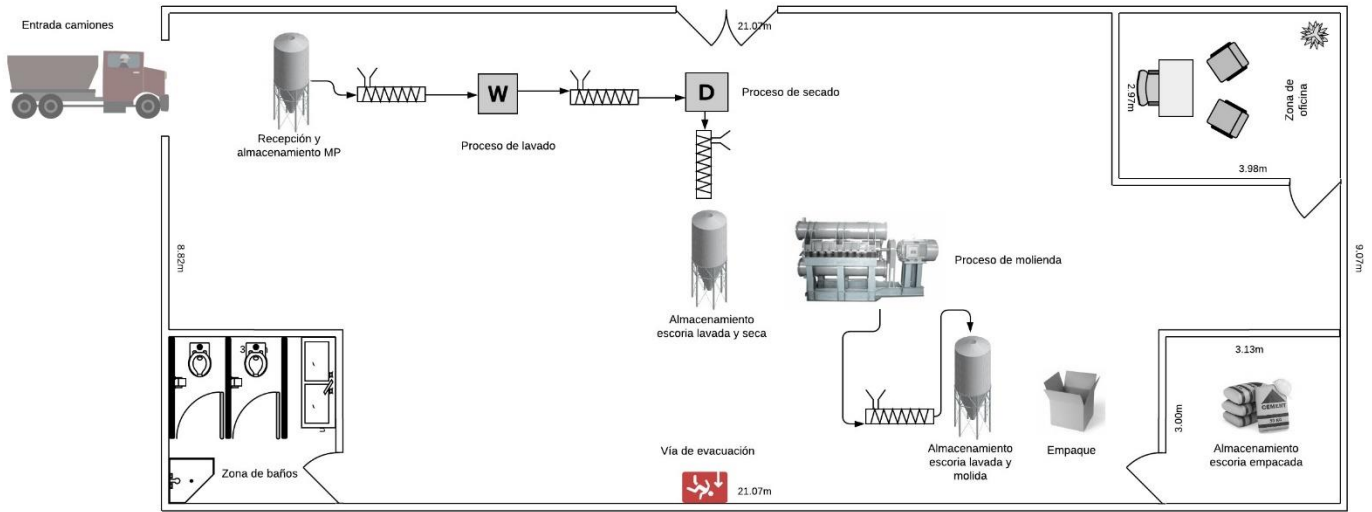


Fig. 31. Distribución general de planta

Después de realizar la distribución general de la planta y definir el tipo de relación o cercanía que debe haber entre departamentos se definió la distribución de planta teórica la cual se muestra detalladamente en el Anexo 16. El cálculo de las áreas ocupadas por cada equipo se realizó mediante el Método Guerchet o de las superficies parciales, para las dimensiones de los equipos y el área de entrada de camiones se utiliza la información referenciada en el ítem de maquinaria y equipos requeridos; para el cálculo del área de almacenamiento de la escoria empacada se tuvo en cuenta la información encontrada sobre el tamaño y la capacidad de estibas en donde se apilan los bultos de material [157]; para establecer el área requerida para la zona de oficinas se hizo uso de una referencia en la que se menciona que el espacio adecuado por empleado para una oficina son 14 m² [158]. Finalmente, da como resultado que el área requerida para la planta es 283 m². Se utilizó el 4 como número para convertir las dimensiones en unidades de superficie equivalentes (USE), como se puede observar (Fig. 32) al tener en cuenta los resultados del diagrama de relaciones la distribución que se logra es similar a la anteriormente planteada, sin embargo, se debe tener cuidado con la zona de almacenamiento de escoria empacada ya que debe tener la capacidad suficiente para mantener almacenado el inventario.

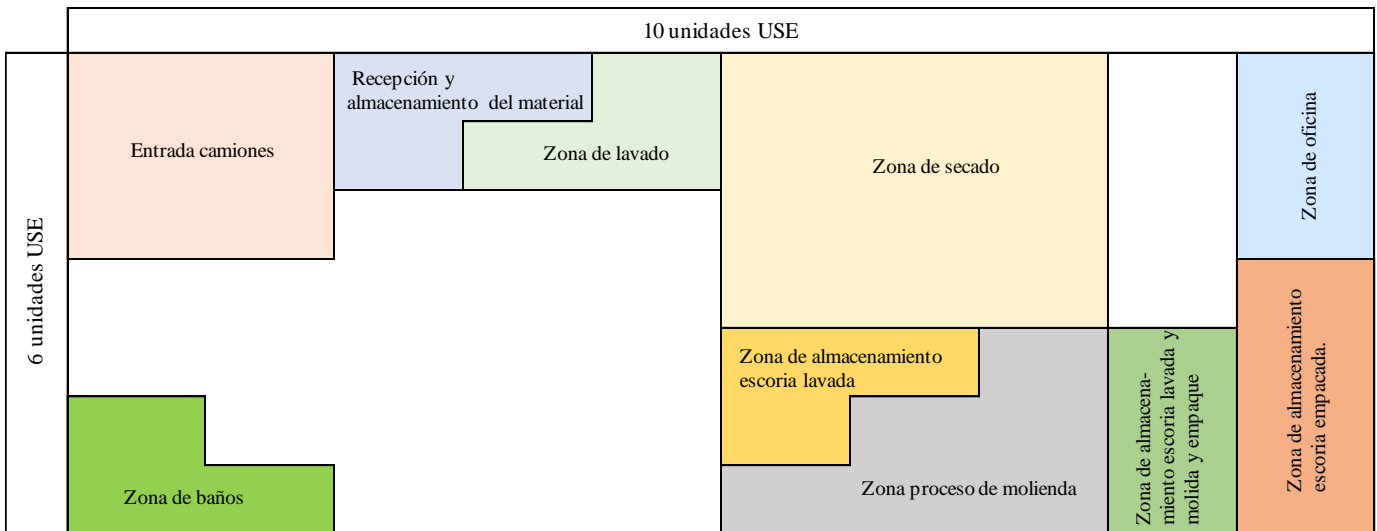


Fig. 32. Distribución de planta teórica

3) *Requerimiento de mano de obra*

Después de obtener los recursos necesarios para la producción y almacenamiento, con sus respectivos parámetros como el tiempo y la velocidad de procesamiento, se realizó un modelo de simulación del proceso para la recuperación de escoria de aluminio (Anexo 17), mediante el cual se pudo observar que, para cumplir con el procesamiento de 75 toneladas de material suministradas por Alúmina S.A., son necesarias 12 h/día, por este motivo se decide implementar dos turnos de 8 horas, es decir, 16 h/día con dos operarios por turno, obteniendo con esto una holgura de dos horas por turno, destinadas al descanso del empleado, cambio de turno, limpieza y necesidades fisiológicas, además de la generación de reportes del proceso. Teniendo en cuenta lo anterior, son necesarios 4 operarios por día, de acuerdo con el análisis realizado al crear diferentes escenarios variando los tiempos y parámetros del modelo de simulación, hasta llegar al número de operarios óptimo que cumpla con la producción requerida, estableciendo un salario mínimo mensual legal vigente (SMMLV) que en Colombia tiene un valor de \$ 908 526 para el año 2021, a lo que se le suma, el auxilio de transporte de 106.454 pesos mensuales. La carga prestacional y la seguridad social se determinan tomando como base el salario promedio de un operario [159]. Además de los operarios es necesario contratar un jefe de planta, quien se encargará del control de los procesos y de la inspección de los operarios, con un salario de \$ 2 460 998 mensuales [160] más prestaciones.

B. Validación del diseño propuesto

Para la validación del proceso de reutilización de la escoria de aluminio, se realizó una simulación en el software SIMIO como se observa en la Fig. 33, esta permitió examinar el comportamiento y las variaciones de la operación, con el análisis de diferentes escenarios en los cuales se variaron los parámetros del modelo. Adicionalmente, fue necesario tener en cuenta la secuencia que se muestra en el diagrama de flujo del proceso presentado anteriormente Fig. 22.

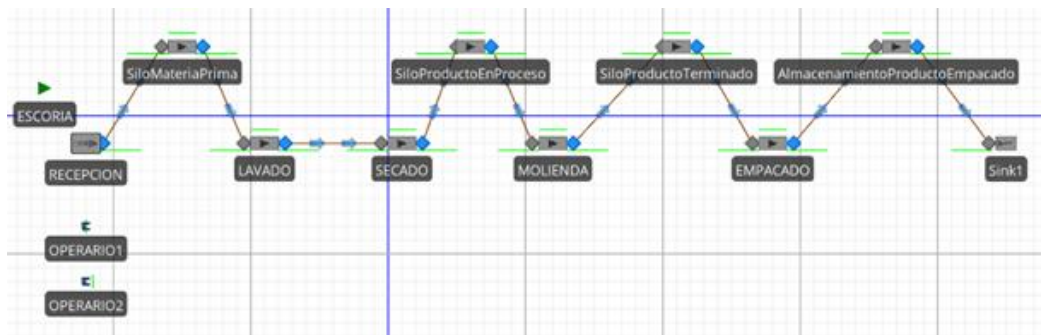


Fig. 33. Modelo en SIMIO del proceso de recuperación de la escoria de aluminio

Luego de establecer la secuencia en la cual se va a ejecutar la producción, se definieron los parámetros y recursos necesarios, para esto se realizaron diferentes escenarios en los cuales se variaron las capacidades de producción y el número de operarios, con el fin de elegir el que proporcionara un mayor rendimiento en el proceso, en la simulación (Anexo 17) se pudo observar, que son necesarias 12 horas al día para cumplir con la producción necesaria, esto debido a que presenta un proceso productivo tipo Flow Shop, en el cual la escoria de aluminio fluye en forma discreta siguiendo una misma secuencia de operaciones, por lo tanto se decide implementar dos turnos de 8 horas al día, finalmente para definir la cantidad de operarios que son necesarios, se efectuaron corridas con un número de operarios distinto, eligiendo la cantidad que presentaba un porcentaje de utilización mayor, además, se tuvieron en cuenta las capacidades de producción de los servidores, las cuales se establecieron realizando sensibilidad con los distintos escenarios, dando como resultado para el secado, la molienda, el empacado y el almacenamiento una capacidad de producción de 686 Kg/h, 667 Kg/h, 479 Kg/h, 421 Kg/h y 30 000 Kg respectivamente. Adicionalmente se observa que el porcentaje de utilización de los tanques de lavado, el horno rotativo, el molino vibratorio y el empacado varía entre 40% y 60%, esto debido a la cantidad de material que cada máquina puede procesar por hora, igualmente, se estableció que para logra procesar las 75 toneladas que se van a recibir por parte de Alúmina, la cantidad de material que será procesado por día será de 3125 Kg.

Por último, para validar el cumplimiento de los KPI's (TABLA XX), se recolectó la información obtenida en los ensayos de laboratorio, que se realizaron en el SGC, donde se obtuvieron los resultados de los indicadores de desempeño que se plantearon en la etapa **Medir**.

TABLA XX.
RESULTADOS DE KPI'S

Indicadores de desempeño (KPI's)	Resultados	Meta	Observaciones
Composición química de la escoria de aluminio.	< 2,2% de nitruro < 17,1% de óxido de aluminio 0% de cloruros	Tener menos de 0,05% de nitruros. Obtener más de 90% de óxido de aluminio. Obtener menos del 0,2% de cloruros de sodio y potasio.	Pese a que no se cumplieron las metas referentes al porcentaje de nitruros y óxido de aluminio, la morfología de la escoria de aluminio no se ve afectada. Además, el porcentaje de nitruros alcanzado permite que sea viable el procesamiento del material.
Tipo y parámetros de molienda.	Tiempo: 0.2 horas Tipo de molino: molino de impacto	Determinar el 100% de los parámetros de molienda adecuados.	Como se menciona en la parte Diseñar, las pruebas en molino de bolas dan como resultado que este tipo de molino no es eficiente para moler el material. Por lo tanto, el molino que se elige es un molino de impacto, la velocidad de molienda y su gasto energético se encontrarán en el catálogo del molino que se elija.
Tamaño de partícula.	Retención de 43.79% (pasante 56.21%) (Anexo 13)	Retención menor al 30% en un tamiz 325.	En el Anexo 13 se muestran los resultados obtenidos con el proceso de molienda en molino de impacto, debido a la capacidad del molino se realizaron pruebas hasta los 10 minutos con las cuales se obtuvo el resultado mencionado. Sin embargo, se realizó el análisis de cinética a través del cual se proyecta que con un tiempo de molienda de 12 minutos se alcanzará el porcentaje retenido máximo exigido por la norma (NTC3493) de 34%.
Cumplimiento de la norma NTC3493.	Cumplimiento del 50% de la norma.	Cumplir con el 100% de la normativa exigida.	Las secciones de la norma NTC3493 que se esperaba cumplir son composición química y propiedades físicas. En cuanto a las propiedades físicas al realizar la cinética de molienda se proyecta el tiempo necesario para lograr el tamaño de partícula, por lo cual se asumirá como cumplido. Sin embargo, la norma exige en requisitos químicos mínimo 50% de óxido de aluminio, lo cual no se cumplió.

VI. VERIFICAR

A. Medición de los impactos

Posterior a tener definido el diseño del proceso de recuperación para la escoria de aluminio, es importante realizar el análisis financiero de la propuesta, considerando que al realizar este proceso se le está dando valor agregado al material que antes era un desecho, el objetivo del análisis será establecer el precio mínimo de venta del material para que el proyecto sea viable. Para esto se realizó un estudio de factibilidad financiero del proyecto (Anexo 18), teniendo en cuenta las inversiones en activos que deben hacerse, el cálculo del estado de resultados, el cálculo del flujo de caja del proyecto y el análisis de los indicadores de evaluación de proyectos.

Teniendo en cuenta la disponibilidad de material con la que se contaría la cual sería 75 toneladas mensuales, se eligió la ubicación de la planta la cual sería en Acopi – Yumbo en donde según consultas en internet el costo mensual de arrendamiento por un lugar de aproximadamente 300 – 500 m² es de \$5 000 000, este valor es tenido en cuenta en el rubro gastos operacionales. La maquinaria y equipos que deben ser adquiridos, su precio de adquisición y su consumo energético se pueden observar en la Tabla XXI.

*TABLA XXI.
MAQUINARIA Y EQUIPOS CON SUS RESPECTIVOS PRECIOS DE ADQUISICIÓN*

Maquinaria y equipos		
Concepto	Precio de adquisición	Consumo energético Kw/h
Trituradora de impacto [166]	\$ 19,424,000	0.75
Silos de almacenamiento (4 unidades) [167]	\$ 109,318,272	NA
Horno [168]	\$ 18,600,422	22.0
Noria para lavado [169]	\$ 34,963,200	5.50
Tornillo sin fin (5 unidades) [170]	\$ 10,450,110	No se encuentran datos al respecto
Total	\$ 192,756,004	89,492 (Kwh/año)

A cada equipo se le realizó el respectivo cálculo de depreciación utilizando el método de línea recta, teniendo en cuenta que su vida útil es de 10 años. Para la financiación se consideró una proporción del 50% de los activos fijos a una tasa de 8.68% (DTF + 6.10%) con base en datos sobre un crédito de cartera ordinario del Banco AvVillas [161]. Cabe mencionar que para la tasa de socios se tuvo en cuenta la tasa de interés del banco más 5 puntos porcentuales, estableciendo 13.68% como la tasa mínima de rentabilidad que esperan los inversionistas del proyecto. Por otro lado, la inflación usada es la proyectada por el Banco de la República para el año 2022 en el informe de política monetaria a octubre de 2021 la cual es 3.60% [162].

En cuanto a los ingresos, teniendo en cuenta que el resultado de este proyecto es un producto nuevo que actualmente no se comercializa con el fin de proveer a la industria cementera, no se cuenta con precios de referencia, motivo por el cual el análisis financiero se enfocó en determinar cuál sería el precio mínimo de venta para que la implementación del proceso productivo sea viable. Para esto, se empleó la función Solver de Excel, la cual fue configurada para que el Valor Presente Neto (VPN) del proyecto tuviera un valor mínimo de 0 y el precio de venta de la escoria de aluminio un máximo de \$2 156, considerando como referencia información de mercado del precio por kilogramo de cemento, el cual oscila entre los \$548.80 y \$2 156 [163].

Para los costos, se consideró el valor que se debe pagar por adquirir la escoria de aluminio el cual es de 80 \$/Kg (valor suministrado por Alúmina S.A), los costos de mano de obra para 4 operarios el cual es de \$ 7 104 860 esto considerando el salario mínimo legal mensual vigente (SMMLV), auxilio de transporte y prestaciones sociales por 50% del salario mensual; y la estimación de \$ 6 152 495 por concepto de pago de mano de obra del jefe de planta al mes [160]; y, por último, para los costos indirectos de fabricación (CIF) el costo óptimo de transporte fundamentado en el análisis para la micro localización (Anexo 15), las tarifas de energía, acueducto y alcantarillado de Emcali [165] a industrias teniendo en cuenta los Kw/h consumidos por los equipos elegidos y los metros cúbicos de agua estimados para el proceso con base en el proceso de lavado realizado por el equipo del proyecto en el cual se utilizaron 0.1 metros cúbicos de agua para 0.2 toneladas de material en una semana, es decir, que para efectuar el mismo proceso a 75 toneladas se necesitarían 375 metros cúbicos por semana, y por ende, 19 553.5875 metros cúbicos al año.

Adicional a eso, en el primer año se tuvo en cuenta la producción mensual de escoria de aluminio de Alúmina S.A de 75 toneladas (es decir, 900 toneladas al año) y para la proyección de los ingresos y costos desde el año 2 hasta el 5, el promedio de la variación de la producción mensual de cemento en Colombia en el año 2021 (2.68%) [164].

En el análisis no se consideraron costos de administración y ventas debido a que el enfoque es hacia la parte operativa de la implementación del proceso productivo.

Posterior a tener todos los datos mencionados anteriormente y construir el estado de resultados, se tiene el flujo de caja del proyecto (Fig. 34).

FLUJO DE CAJA DEL PROYECTO	0	1	2	3	4	5
Utilidad operacional		13,989,029	40,476,894	51,050,909	61,887,878	72,994,110
Impuestos operativos		4,336,599	12,547,837	15,825,782	19,185,242	22,628,174
Utilidad Neta Operativa		9,652,430	27,929,057	35,225,127	42,702,636	50,365,936
+ Depreciaciones o amortizaciones		19,275,600	19,275,600	19,275,600	19,275,600	19,275,600
Flujo de Caja Bruto		28,928,030	47,204,657	54,500,728	61,978,236	69,641,537
- Inversiones Activos Fijos	192,756,004					
Flujo de Caja Libre del Proyecto	-	192,756,004	28,928,030	47,204,657	54,500,728	61,978,236

Fig. 34. Flujo de caja del proyecto

Partiendo del flujo de caja del proyecto se obtienen los indicadores de evaluación de proyectos (Tabla XXII). Como se evidencia en dicha tabla, los indicadores de evaluación del proyecto tenidos en cuenta son la tasa de descuento o WACC (por sus siglas en inglés), el Valor Presente Neto (VPN), la Tasa Interna de Retorno (TIR), la Tasa Interna de Retorno Modificada (TIRM) y el índice de relación Beneficio/Costo (B/C). Los resultados obtenidos para dichos indicadores son mostrados en la Tabla XXII.

TABLA XXII.
INDICADORES DE EVALUACIÓN DE PROYECTOS

Indicadores de evaluación de proyectos	
Tasa de descuento - WACC	9.83%
VPN	0
TIR	9.83%
TIR Modificada	9.83%
B/C	\$ 1.00

El objetivo planteado para el análisis financiero era establecer un precio de venta mínimo para la escoria de aluminio con el fin de que el proyecto sea viable. Con un precio de venta de 579.09 \$/kg se logra un VPN de 0, es decir, se cubre la operación, los gastos financieros y el rendimiento que piden los socios; la TIR y TIRM son equivalentes a la tasa de descuento y el B/C es igual a \$ 1.00.

B. Estandarización de la solución – POE'S (plan de control)

Con el fin de estandarizar el proceso de recuperación de escoria de aluminio para su uso como materia prima en morteros, se realizó un formato con el Procedimiento operativo estandarizado (POE) (Tabla XXIII), especificando las operaciones y actividades que se van a realizar durante el proceso, con sus respectivos responsables. Lo cual se realiza con el objetivo de prevenir errores sistemáticos y sirve como guía para el personal sobre la correcta forma de llevar a cabo las operaciones.

TABLA XXIII.
FORMATO POE DEL PROCESO DE RECUPERACIÓN DE ESCORIA DE ALUMINIO

LOGO DE LA EMPRESA	PROCESO PRODUCTIVO PARA LA RECUPERACIÓN DE ESCORIA DE ALUMINIO PARA SU USO COMO MATERIA PRIMA EN MORTEROS	Código: Versión:
OBJETIVO		
Estandarizar el proceso para la recuperación de escoria de aluminio para su uso como materia prima en morteros		
ALCANCE		
Aplica a los operarios encargados del proceso y se enfoca en las actividades y operaciones en el proceso de recuperación de escoria de aluminio		
DEFINICIONES		

Escoria de aluminio: Residuo generado en la fundición de aluminio.
 Prueba de laboratorio SEM: Microscopía electrónica de barrido, es aquel que utiliza un haz de electrones en lugar de un haz de luz para formar una imagen.
 Prueba de laboratorio EDS: Es una técnica analítica que permite la caracterización química/análisis elemental de materiales

ELEMENTOS DE PROTECCIÓN PERSONAL

- Gafas de seguridad.
- Guantes de Nitrilo.
- Botas de seguridad.
- Tapabocas industrial.

PROCESO DE PRODUCCIÓN

Paso	Descripción del procedimiento	Responsable
1	Recepción de materia prima.	Operario
2	Inspección y pesado de materia prima.	Operario
3	Prueba de laboratorio SEM y EDS.	Laboratorio externo
4	Revisión de la composición de la escoria de aluminio.	Laboratorio externo
5	Registro de la información obtenida en las pruebas de laboratorio.	Supervisor
6	Almacenamiento de la escoria de aluminio.	Operario
7	Lavado de la escoria de aluminio.	Operario
8	Secado en horno.	Operario
9	Revisión de la escoria después del lavado.	Operario
10	Prueba de laboratorio SEM y EDS.	Laboratorio externo
11	Revisión de la composición de la escoria de aluminio después del lavado.	Laboratorio externo
12	Registro de la información obtenida en las pruebas de laboratorio.	Supervisor
13	Almacenamiento de la escoria de aluminio lavada y seca.	Operario
14	Molienda de la escoria de aluminio.	Operario
15	Registro del pasante.	Supervisor
16	Almacenamiento de la escoria molida.	Operario
17	Empacado	Operario
18	Registro de producto terminado	Operario
19	Almacenamiento de producto terminado	Operario

RESPONSABLE

Operario

REGISTRO

Paso en donde se genera el registro	Nombre del registro	Lugar de archivo
5	Formato de caracterización de la escoria de aluminio.	Oficina

LOGO DE LA EMPRESA	CARACTERIZACION DE LA ESCORIA DE ALUMINIO DESPUES DEL LAVADO Y SECADO	Hoja 1 de 1
Producto:		
Diligenciado por:		
Fecha:		
Compuesto	Formula química	% Presente
OBSERVACIONES		

En cuanto al control del proceso de molienda, se elaboró un formato en el cual se registra el porcentaje pasante y retenido de la escoria de aluminio en un tamiz 325 (TABLA XXVI), con el objetivo de definir si la escoria debe ser reprocesada, lo cual se establece con el porcentaje de pasante, si el pasante es menor al 66% la escoria debe volver a reprocesarse en el molino.

TABLA XXVI.
FORMATO CONTROL DEL PROCESO DE MOLIENDA

LOGO DE LA EMPRESA	REGISTRO DEL PROCESO DE MOLIENDA				Hoja 1 de 1
Producto:					
Diligenciado por:					
Fecha inicio:					
Fecha fin:					
Fecha	Turno	% Pasante	% Retenido	Devolución a molino	Operario

C. Conclusiones

- Después de tomar las muestras representativas de la escoria a través de la técnica de cuarteo, se logró hacer la caracterización fisicoquímica del material antes y después del proceso de lavado, para lo cual se contó con la colaboración del Servicio Geológico Colombiano (SGC) en donde se realizaron las pruebas de difracción de rayos X (DRX). Se encontró que la muestra de escoria sin lavar no presentó fases de cloruros y en el caso de la escoria lavada, el porcentaje de nitruros disminuyó y el de óxido de aluminio aumentó, lo cual es un resultado beneficioso teniendo en cuenta los efectos que estos componentes tienen sobre la producción de morteros. La prueba de microscopia electrónica de barrido (SEM) se realizó con el apoyo del Tecnoparque SENA y se encontró que el lavado mejoró la calidad del material, ya que se observaron partículas más compactas y uniformes que en la muestra sin lavar.
- Mediante el análisis de distribución granulométrica de las partículas por tamizado, se encontró que el tamaño de partícula inicial de la muestra era de un 80% inferior a 625 μm y desde el punto de vista de la dureza, el ensayo Hardgrove permitió definir que se trataba de un material semiblando. Con el fin de definir los parámetros de molienda y reducir este tamaño de partícula a un 66% inferior a 45 μm según lo exigido en la norma NTC3493, se hicieron diferentes pruebas de moliendabilidad. Las pruebas en el molino de bolas no dieron resultado, pues a pesar de haberse logrado reducción del tamaño de partícula en los minutos iniciales, después de los 120 min de molienda, el porcentaje de material pasante fue disminuyendo, esto ocurre pues al contener aluminio, las partículas se laminan y su área aumenta con el método de funcionamiento por fricción de este tipo de molinos. Por otro lado, con las pruebas en el molino de anillos se obtuvo un pasante del 56,21% a los 10 min y mediante el análisis de cinética, se proyecta que con un tiempo de molienda de 12 min se puede alcanzar el porcentaje exigido en la norma. De acuerdo con estos hallazgos, se recomienda considerar a escala industrial, el uso de un molino de impacto.
- Una vez terminada la fase experimental se establecieron los requerimientos de operación del proceso de aprovechamiento de la escoria de aluminio, haciendo uso de herramientas de la Ingeniería Industrial como diagramas de flujo, distribución logística, distribución de planta y simulación. De este modo, se puede concluir que para satisfacer la demanda mensual de 75 toneladas de escoria que se producen en Alúmina S.A mensualmente, se requiere montar una planta de aprovechamiento con un área de 283 m^2 en la zona de Acopi-Yumbo, dividida en 10 zonas, incluyendo la zona de oficinas administrativas y con un total de 12 máquinas y equipos. En la planta se requieren 4 operarios y un supervisor, que se encargarán de hacer la recepción del material, la programación de las máquinas y el empaclado manual de los bultos de 30 kg de escoria que se planea comercializar.
- Posterior al diseño del proceso de recuperación para la escoria de aluminio, se evaluó su viabilidad financiera mediante la proyección del flujo de caja del proyecto y el cálculo de los indicadores de evaluación de proyectos como VPN, TIR, TIRM y el índice B/C. A través de dichos indicadores se observa que con un precio de venta de la escoria de aluminio igual a 579.09 \$/kg el proyecto es viable financieramente cubriendo la operación y rentando el costo de los recursos o tasa de descuento.

D. Recomendaciones

- A la hora de adquirir la maquinaria y equipos necesaria para el proceso de recuperación de la escoria de aluminio se recomienda comparar precios de otros lugares o considerar fabricar sobre medida los equipos, dependiendo de la capacidad que se requiera.
- En estudios posteriores, se podrían realizar los ensayos mecánicos (tensión y flexión) de morteros con adición de escoria de aluminio para evaluar sus propiedades.
- En estudios posteriores, se podrían realizar adiciones en porcentajes diferentes de la escoria de aluminio al cemento Portland para ver de qué manera se afectan sus propiedades mecánicas.
- En futuros estudios, se recomienda analizar con mayor profundidad la composición química de la escoria de aluminio a través de pruebas de laboratorio más especializadas como la espectroscopia dispersiva de energía (EDS, por sus siglas en inglés).

- Se sugiere realizar un análisis de riesgo financiero utilizando programas como Risk Simulator, para evaluar las probabilidades de pérdida con el proyecto, en caso de que se presentaran grandes desviaciones en los ingresos proyectados o en los costos estimados.
- En futuras investigaciones, puede incluirse en el análisis financiero el estudio para determinar los gastos asociados a los procesos administrativos y de comercialización.

VII. GLOSARIO

- **Ácido:** Sustancia que puede aceptar un par de electrones y tiene un pH de 0 a 6 [73].
- **Agente espumante:** sustancia química con propiedades surfactantes que cuando se encuentra presente en pequeñas dosis en una disolución facilita la generación de espuma [74].
- **Agua desionizada:** Es aquella a la que se le han extraído cationes como el sodio, el calcio, el hierro, entre otros, y aniones tales como el carbonato, el fluoruro, el cloruro y otros, mediante un proceso de intercambio iónico. Esto significa que al agua se le han quitado todos los iones, excepto el ion hidrógeno (H⁺), pero puede contener pequeñas cantidades de impurezas no iónicas, como compuestos orgánicos [75].
- **Agua destilada:** Es agua que ha sido sometida a un proceso de destilación que permitió limpiarla y purificarla. Esto hace, en teoría, que el agua destilada sea agua potable, ya que es una sustancia pura que solo contiene un átomo de oxígeno y dos de hidrógeno (H₂O) [75].
- **Alcalino:** Dicho de una solución: Que tiene un pH superior a 7 [76].
- **Agregados:** Son un conjunto de partículas, de origen natural o artificial, que pueden ser tratados o elaborados. Pueden tener tamaños que van desde partículas casi invisibles hasta pedazos de piedra, junto con el agua y el cemento, conforman el trío de ingredientes necesarios para la fabricación de concreto [77].
- **Al:** Aluminio.
- **Aleación:** Producto homogéneo, obtenido por fusión, compuesto de dos o más elementos químicos, uno de los cuales, debe ser un metal [78].
- **AlN:** Nitruro de aluminio.
- **Al₂O₃:** Óxido de aluminio o alúmina.
- **ANDI:** Asociación Nacional de Empresarios de Colombia.
- **Base:** Sustancia que puede donar un par de electrones y tiene un pH de 8 a 14 [79].
- **Bauxita:** Mineral de óxido hidratado de aluminio que contiene generalmente cierta cantidad de óxido de hierro y suele ser de color blanquecino, gris o rojizo [80].
- **Calcinar:** Someter al calor un cuerpo para eliminar sustancias volátiles que pueda contener [81].
- **Caolín:** Arcilla blanca muy pura que se emplea en la fabricación de porcelanas, aprestos y medicamentos [82].
- **Cemento:** Mezcla formada de arcilla y materiales calcáreos, sometida a cocción y muy finamente molida, que mezclada a su vez con agua se solidifica y endurece [83].
- **Cemento de aluminato de calcio:** Es el cemento formado a partir de la combinación de piedra caliza y alúmina a altas temperaturas. Se utiliza en aplicaciones de cemento especializadas donde es necesaria resistencia a temperaturas extremas, ácidos y álcalis suaves, sulfatos y agua. También se utiliza en situaciones donde se requiere un fortalecimiento rápido [84].
- **Cemento Portland ordinario:** es uno de los tipos de cemento más utilizados. Su nombre se debe a la similitud que tiene, en el color y la calidad, a la piedra de Portland (una piedra caliza gris blanca en la isla de Portland, Dorset). Las principales materias primas que se utilizan en su fabricación son argiláceos o silicatos de alúmina en forma de arcillas y lutitas y calcio o carbonato de calcio, en forma de piedra caliza, tiza y marga, que es una mezcla de arcilla y carbonato de calcio [85].
- **Cenizas volantes:** Es un subproducto de la combustión del carbón pulverizado en plantas generadoras de electricidad y es el material cementante suplementario más utilizado en los Estados Unidos. Es la ceniza precipitada electrostáticamente de los humos escapados de las estaciones de fuerza motriz que funcionan a base de carbón, y es la puzolana artificial más común. La adición de las cenizas al concreto reduce su costo, se utiliza menos cemento y se mejora algunas de sus propiedades como su trabajabilidad, durabilidad, densidad y sangrado, su impermeabilidad, su resistencia al ataque químico sobre todo de sulfatos y su resistencia a la compresión [86].
- **Cerámicos:** Se entiende por material cerámico el producto de diversas materias primas, especialmente arcillas, que se fabrican en forma de polvo o pasta (para poder darles forma de una manera sencilla) y que al someterlo a cocción sufre procesos fisicoquímicos por los que adquiere consistencia pétreo. Dicho modo más sencillo, son materiales sólidos inorgánicos no metálicos producidos mediante tratamiento térmico [87].
- **CO₂:** Dióxido de carbono.
- **Compuestos:** Que están formados por dos o más elementos [88].
- **Concreto:** Es la mezcla de cemento, arena gruesa, piedra y agua. La cantidad de cada uno de estos materiales dependerá de la resistencia que se quiera lograr, la cual se indica en los planos con el símbolo f 'c [89].
- **Concreto celular:** Es un tipo especial de material de construcción liviano que se produce en forma de bloques o paneles utilizados para construcción de edificios residenciales o comerciales [90].
- **Criba:** Utensilio consistente en un aro con una malla u otro material agujereado fijados en él, y que sirve para pasar una semilla, un mineral u otra materia para separar las partes menudas de las gruesas o para eliminar impurezas [91].

- **Difracción de rayos x:** es uno de los fenómenos físicos que se producen al interaccionar un haz de rayos x, de una determinada longitud de onda, con una sustancia cristalina [92].
- **Disolución:** Mezcla que resulta de separar las partículas o moléculas de un sólido, un líquido o un gas en un líquido de forma que queden incorporadas a él [93].
- **Densidad:** es una medida del grado de compactación de un material o sustancia. Es por tanto cantidad de masa por unidad de volumen [147].
- **Durabilidad:** Calidad de un material respecto a su duración [94].
- **Dureza:** Resistencia que opone un mineral a ser rayado por otro [95].
- **Economía circular:** La economía circular se presenta como un sistema de aprovechamiento de recursos donde prima la reducción, la reutilización y el reciclaje de los elementos [96].
- **Elementos cementantes:** es aquel que tiene las propiedades de adhesión y cohesión necesarias para unir agregados y conformar una masa [97].
- **Escoria granulada de alto horno:** es un material que puede utilizarse como árido artificial en la construcción de carreteras [98].
- **Etanol anhidro:** Es etanol obtenido a partir de deshidratación limpia (tamices moleculares) de alcohol rectificado, con pureza mínima de 99,6% v/v [99].
- **Extrusora:** Maquina para dar forma a una masa metálica, plástica, etc., haciéndola salir por una abertura especialmente dispuesta [100].
- **Fluorescencia de rayos x:** es una técnica analítica que se puede utilizar para determinar la composición química de una amplia variedad de tipos de muestras, entre los que se encuentran sólidos, líquidos, lodos y polvos sueltos [101].
- **Fraguado:** Acción de trabar y endurecerse consistentemente de la cal, el concreto, el yeso y otras masas [102].
- **Fundición:** Derretir y licuar los metales, los minerales u otros cuerpos solidos [103].
- **Gases de efecto invernadero:** son aquellos gases que se acumulan en la atmósfera de la Tierra y que absorben la energía infrarroja del Sol [104].
- **Granulometría:** Tamaño de las piedras, granos, arenas, partículas, etc., que constituyen un árido o polvo [105].
- **Globalización:** Difusión mundial de modos, valores o tendencias que fomenta la uniformidad de gustos y costumbres. [142]
- **Hidrolisis:** Desdoblamiento de una molécula por la acción del agua [106].
- **Hidrometalurgia:** rama de la metalurgia en la cual el elemento de interés es extraído desde una solución que lo contiene [107].
- **Humo de sílice:** es un material puzolánico de alta reactividad, subproducto del desecho de la fabricación de silicio metálico y aleaciones de ferrosilicio [108].
- **KPI's:** Los "indicadores claves de desempeño" o KPI's (por sus siglas en inglés) son todas las variables, factores y unidades de medida para generar una estrategia de marketing [109].
- **Lingote:** Masa solida (trozo o barra) que se obtiene vaciando el metal liquido en un molde [110].
- **Lixiviado:** Liquido residual, generalmente toxico, que se filtra de un vertedero por percolación [111].
- **Lixiviar:** Tratar una sustancia completa, como un mineral, con un disolvente adecuado para separar sus partes solubles de las insolubles [112].
- **Matrices cementicias:** Es un material de refuerzo compuesto que se usa para reforzar estructuras [113].
- **Módulo de Young:** s un parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico, según la dirección en la que se aplica una fuerza [114].
- **Molienda:** Acción de moler, especialmente el grano [115].
- **Molino de bolas:** Es un tipo de molino utilizado para moler y mezclar materiales para ser utilizados en procesos de mezclado de minerales, pinturas, pirotecnia, cerámicas y sinterización de láser [116].
- **Morteros:** El mortero está compuesto de cemento, arenas finas y cal, y se suele utilizar como material adhesivo cuando se construye con ladrillo, piedra o bloques de concreto [117].
- **Nitruros:** Es un compuesto de nitrógeno con un elemento electronegativo menos donde el nitrógeno tiene un estado de oxidación de -3 [118].
- **Oxidación:** Dicho del oxígeno o de otro agente oxidante: producir oxido al reaccionar con una sustancia. Dicho de un átomo o de un ion: perder electrones [119].
- **Óxidos:** Compuesto que resulta de combinar oxigeno generalmente con un metal o un metaloide [120].
- **Perfiles de aluminio:** Los perfiles de aluminio son subproductos normalmente utilizados para propósitos estructurales. Es posible distinguir tres tipos de perfiles de acuerdo con su uso: construcción, arquitectónicos e industriales.[121]
- **PIB:** Producto Interno Bruto.

- **Pirometalurgia:** El término proceso pirometalúrgico es usado con frecuencia para describir los procesos de alta temperatura relacionados con la producción de metales. Sin embargo, los principios básicos que sustentan el uso de altas temperaturas comunes en el proceso de todos los materiales.[122].
- **PNM:** Productos No Metálicos.
- **Polímeros:** Compuestos químicos, naturales o sintéticos, formados por una reacción en la que dos o más moléculas se combinan para formar otra en la que se repiten unidades estructurales de las moléculas originales [123].
- **Polipropileno (PP):** Es el polímero termoplástico, parcialmente cristalino, que se obtiene de la polimerización del propileno (o propeno). Perteneció al grupo de las poliolefinas y es utilizado en una amplia variedad de aplicaciones que incluyen empaques para alimentos, tejidos, equipo de laboratorio, componentes automotrices y películas transparentes.[124].
- **Propiedades mecánicas:** Las propiedades mecánicas son las que describen el comportamiento de un material ante las fuerzas aplicadas sobre él, por eso son especialmente importantes al elegir el material del que debe estar construido un determinado objeto. [125].
- **Proporción sólido-líquido:** Igualdad de sustancias.
- **Pulverización:** Reducción de un material a polvo [127].
- **Puzolanas:** La puzolana es un material silíceo o silico-aluminoso, que por sí solo posee poco o ningún valor cementante, pero que finamente dividido y en medio húmedo a temperatura ordinaria, reacciona químicamente con el hidróxido de calcio, formando un compuesto con propiedades cementantes.[128].
- **Refractarios:** Material capaz de resistir elevadas temperaturas sin cambiar de estado ni descomponerse. Según su composición [129].
- **Residuos sólidos:** Los residuos sólidos, constituyen cualquier objeto, material, sustancia o elemento principalmente sólido resultante del consumo o uso de un bien en actividades domésticas, industriales, comerciales, institucionales o de servicios, que el generador presenta para su recolección. [130].
- **Rendimiento de una reacción:** El rendimiento de una reacción es la cantidad de producto que se puede obtener al llevarse a cabo una reacción completamente [131].
- **Resistencia:** Se define como la capacidad para soportar una carga por unidad de área, y se expresa en términos de esfuerzo, generalmente en kg/cm², MPa y con alguna frecuencia en libras por pulgada cuadrada (psi) [132].
- **Resistencia de compresión:** La resistencia a la compresión simple es la característica mecánica principal del concreto. Se define como la capacidad para soportar una carga por unidad de área, y se expresa en términos de esfuerzo, generalmente en kg/cm², MPa y con alguna frecuencia en libras por pulgada cuadrada (psi).[133].
- **Resistencia de flexión:** La tensión máxima de la fibra desarrollada en una muestra justo antes de que se agriete o se rompa en una prueba de flexión. Se informa el límite elástico a la flexión en lugar de la resistencia a la flexión para materiales que no se agrietan en la prueba de flexión. Un término alternativo es módulo de ruptura.[134].
- **Resistencia de tracción:** Máximo esfuerzo de tracción que un cuerpo puede soportar antes de romperse. Es sinónimo de carga de rotura por tracción. No debe confundirse con la carga admisible; ésta resulta inferior a la carga de fluencia en una cantidad que se denomina coeficiente de seguridad.[135].
- **RNM:** Residuo No Metálico.
- **Rutilo:** Oxido de titanio.
- **Simbiosis industrial:** La simbiosis industrial es una forma de intermediación para reunir a las empresas en colaboraciones innovadoras, encontrando maneras de usar los residuos de uno como materia prima para otro. [136].
- **Sinterizar:** Producir piezas de gran resistencia y dureza calentando, sin llegar a la temperatura de fusión, conglomerados de polvo a los que se ha modelado por presión [137].
- **Stakeholders:** Partes interesadas.
- **Tamizar:** Pasar algo por un instrumento compuesto de un aro y de una tela, por lo común de cerdas, más o menos clara, que cierra la parte inferior. Sirve para separar las partes sutiles de las gruesas de algunas cosas. [138].
- **Vertederos:** Lugar donde se vierten basuras, escombros o residuos [139].
- **Virutas (aluminio):** Hoja delgada que se saca con el cepillo u otras herramientas al labrar la madera o los metales, y que sale, por lo común, arrollada en espiral [140].

VIII. ANEXOS

TABLA XXVIII.
TABLA DE ANEXOS

No. Anexo	Nombre	Desarrollo (propio o terceros)	Tipo de Archivo (PDF, HTLM, Excel, Word...)
1	2021103 – Anexo 1. Entrevista al grupo de interés “Equipo de Proyecto de la Convocatoria Interna”.	Elaboración propia	Word
2	2021103 – Anexo 2. Hoja de trabajo de identificación requisitos grupos de interés.	Elaboración profesor Carlos Olarte	Word
3	2021103 – Anexo 3. Plan de recolección de datos.	Elaboración profesor Carlos Olarte	Excel
4	2021103 – Anexo 4. Entrevista con La Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca CVC.	Elaboración propia	Word
5	2021103 – Anexo 5. Entrevista con Experto y Cliente Potencial.	Elaboración propia	Word
6	2021103 – Anexo 6. Entrevista con Profesor Experto.	Elaboración propia	Word
7	2021103 – Anexo 7. Entrevista con Experto.	Elaboración propia	Word
8	2021103 – Anexo 8. Hoja de trabajo exploración del mercado.	Elaboración profesor Carlos Olarte	Word
9	2021103 – Anexo 9. Resumen revisión de literatura.	Elaboración profesora Estefany Rey Becerra	Word
10	2021103 – Anexo 10. Metodología AHP.	Elaboración propia (con base en el formato del profesor Álvaro Figueroa)	Excel
11	2021103 – Anexo 11. Plan de trabajo.	Elaboración Propia	Microsoft Project
12	2021103 – Anexo 12. Herramienta QFD.	Elaboración Propia	Excel
13	2021103 – Anexo 13. Pruebas de moliendabilidad en molino de anillos y cinética de molienda.	Elaboración Propia	Excel
14	2021103 – Anexo 14. Máquinas y capacidades.	Elaboración Propia	Excel
15	2021103 – Anexo 15. Micro localización.	Elaboración Propia	Excel
16	2021103 – Anexo 16. Distribución de planta.	Elaboración Propia	Excel
17	2021103 – Anexo 17. Modelo de simulación en SIMIO.	Elaboración Propia	Simio
18	2021103 – Anexo 18. Evaluación financiera de la propuesta.	Elaboración Propia	Excel

IX. REFERENCIAS

- [1] G. Madge, "Predicción de la temperatura global para 2021 por la Met Office", *Tiempo.com / Meteored*, 2020. [Online]. Available: <https://www.tiempo.com/ram/prediccion-de-la-temperatura-global-para-2021-por-la-met-office.html>.
- [2] C. Álvarez, "¿Qué significa que el agua empiece a cotizar en el mercado de futuros de Wall Street?", *EL PAÍS*, 2020. [Online]. Available: <https://elpais.com/clima-y-medio-ambiente/2020-12-08/que-significa-que-el-agua-empiece-a-cotizar-en-el-mercado-de-futuros-de-wall-street.html>.
- [3] A. Moreno González, *Repository.udca.edu.co*, 2018. [Online]. Available: [https://repository.udca.edu.co/bitstream/11158/954/1/Econom%C3%ADa Circular - Crecimiento Inteligente%2C Sostenible e Integrador.pdf](https://repository.udca.edu.co/bitstream/11158/954/1/Econom%C3%ADa%20Circular%20-%20Crecimiento%20Inteligente%20Sostenible%20e%20Integrador.pdf).
- [4] C. Trout Lastra, "ANDI - Noticias", *Andi.com.co*, 2019. [Online]. Available: <http://www.andi.com.co/Home/Noticia/7357-economia-circular-mas-que-una-necesidad>.
- [5] L. Laura Pérez-González, R. Quintana-Puchol, L. Perdomo-González, and A. Alujas-Díaz, "Potencialidad de la mezcla escoria de cubilote-cascarilla de laminación-viruta de aluminio para obtener un material puzolánico mediante aluminotermya Potential of mixing aluminum shavings-cupola slag-mill scale to obtain a pozzolanic material by aluminothermy." [Online].
- [6] "ANDI - Noticias", *Andi.com.co*, 2020. [Online]. Available: <http://www.andi.com.co/Home/Noticia/15823-colombia-general-el-sector-minero-energe>.
- [7] "Aluminum Recycling | The Aluminum Association." <https://www.aluminum.org/sustainability/aluminum-recycling>.
- [8] "Alucol S.A", *Alucol S.A*. [Online]. Available: <http://www.alucol.com.co/proceso-productivo/14/fundicion>.
- [9] "World Aluminium — Primary Aluminium Production", *World-aluminium.org*, 2021. [Online]. Available: <https://www.world-aluminium.org/statistics/primary-aluminium-production/#histogram>.
- [10] bM. C. Santos, A. R. Machado, W. F. Sales, M. A. S. Barrozo, and E. O. Ezugwu, "Machining of aluminum alloys: a review," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 86, no. 9–12. Springer London, pp. 3067–3080, oct. 01, 2016, doi: 10.1007/s00170-016-8431-9.
- [11] E. Lemos Micolta, L. Chilito Bolaños, J. Maya Soto, A. Gómez Gómez and M. Rojas Manzano, "(PDF) USO DE LA ESCORIA DE ALUMINIO EN EL CONCRETO - REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE", *ResearchGate*, 2020. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/346332290_USO_DE_LA_ESCORIA_DE_ALUMINIO_EN_EL_CONCRETO_-_REVISION_DEL_ESTADO_DEL_ARTE.
- [12] A. Quintero Vega, "Alumina pasará de exportar 12% a 25% de su producción", *Larepublica.co*, 2016. [Online]. Available: <https://www.larepublica.co/empresas/alumina-pasara-de-exportar-12-a-25-de-su-produccion-2427331#:~:text=Colombia%20consume%203.900%20toneladas%20mensuales,Colombia%20y%2040%25%20de%201%20C3%A1minas>.
- [13] A. Gómez, N. B. Lima, and J. A. Tenório, "Quantitative Analysis of Aluminum Dross by the Rietveld Method," 2008, doi: 10.2320/matertrans. MRA2007129.
- [14] S. Xu, W. Chen, B. Wan, and J. Liu, "Progress in treatment processes for aluminum slag from scrap aluminum remelting," *Tezhong Zhuzao Ji Youse Hejin/Special Casting and Nonferrous Alloys*, vol. 36, no. 9, Journal Office of Special Casting and Nonferrous Alloys, pp. 934–938, Sep. 20, 2016.
- [15] E. David and J. Kopac, "Toxic compounds generated by metalworking fluids and aluminum slag landfill and their effects on environment and people," *Environmental Engineering and Management Journal*, vol. 17, no. 3, pp. 739–748, Mar. 2018, doi: 10.30638/eemj.2018.074.
- [16] "Proyecto de Investigación Escoria de Aluminio en Morteros", 2021.

- [17] "Entidades sector Comercio, Industria y Turismo | Superintendencia de Industria y Comercio", *Sic.gov.co*. [Online]. Available: <https://www.sic.gov.co/entidades-sector-comercio-industria-y-turismo>.
- [18] A. P Samboni Navarrete, J. G. Blanco Torres, "Herramientas de gestión de interesados utilizadas en las etapas de planeación y control de proyectos", 2015 [Online] Available: http://bibliotecadigital.usb.edu.co/bitstream/10819/2549/1/Herramientas_Interesados_Gestion_Etapas_Control_Proyectos_Samboni_2015.pdf
- [19] "Matriz interés-poder", *Guiasjuridicas.wolterskluwer.es*, 2021. [Online]. Available: https://guiasjuridicas.wolterskluwer.es/Content/Documento.aspx?params=H4sIAAAAAAAEAMtMSbF1jTAAASMTMwNztlUOUlM_DxbIwMDSONDQ7BAZlqIS35ySGVBqm1aYk5xKgC-hVH_NQAAAA==WKE.
- [20] "Funciones de las virtutas de aluminio y la calcita en las propiedades de ingeniería de los compuestos a base de cemento - ScienceDirect." <https://bdbib.javerianacali.edu.co:2100/science/article/pii/S0959652620341494?via%3Dihub>
- [21] Congreso de la República de Colombia, *Ley 1252 de 2008*. Colombia, 2008.
- [22] Congreso de la República de Colombia, *Ley 99 de 1993*. Colombia, 1993.
- [23] Congreso de la República de Colombia, *Ley 1562 de 2012*. Colombia, 2012.
- [24] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, norma técnica colombiana 3493.
- [25] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, norma técnica colombiana 4435.
- [26] Y. Gallardo and A. Moreno Garzón, *APRENDER A INVESTIGAR Módulo 3*, 3rd ed. INSTITUTO COLOMBIANO PARA EL FOMENTO DE LA EDUCACIÓN SUPERIOR, ICFES, 1999.
- [27] C. Fernández Collado, R. Hernández Sampieri, and P. Baptista Lucio, *Metodología de la investigación científica*, 6th ed. Mexico DF: McGraw-Hill, 2014.
- [28] "Aplicaciones de la difracción de rayos x", *Materias.fi.uba.ar*, 2009. [Online]. Available: <http://materias.fi.uba.ar/6210/Difracci%C3%B3n%20de%20rayos%20X-1%20doc.pdf>.
- [29] D. Martínez B., O. Gil Novoa and A. Barón Gonzáles, "ESPECTOMETRÍA DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X", *REVISTA COLOMBIANA DE FÍSICA*, 2006.
- [30] "Quiénes somos", *Www2.sgc.gov.co*. [Online]. Available: <https://www2.sgc.gov.co/Nosotros/AcercaDelSgc/Paginas/Quienes-Somos.aspx#>.
- [31] "CEMENTOS. MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LA FINURA DEL CEMENTO HIDRÁULICO UTILIZANDO EL TAMIZ DE 45 mm (No. 325) - Icontec", *Icontec*. [Online]. Available: <https://www.icontec.org/rules/cementos-metodo-de-ensayo-para-determinar-la-finura-del-cemento-hidraulico-utilizando-el-tamiz-de-45-mm-no-325/>.
- [32] R. Martín Crespo, "Incorporación de escorias de aluminio en la fabricación de productos de arcilla cocida", Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, 2015.
- [33] Dai, C., 2012. DEVELOPMENT OF ALUMINUM DROSS-BASED MATERIAL FOR ENGINEERING APPLICATIONS. Degree of Master of Science. WORCESTER POLYTECHNIC INSTITUTE.
- [34] M. Mahinroosta and A. Allahverdi, "Hazardous aluminum dross characterization and recycling strategies: A critical review", *Journal of Environmental Management*, vol. 223, pp. 452-468, 2018 [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479718307205#bib3>. [Accessed: 21- May- 2021]

- [35] S. Maropoulos, D. Kountouras, X. Voulgaraki, S. Papanikolaou and I. Sanaidis, "A Characterization Method for Al Recovery from Dross Based on Compression at Elevated Temperatures", *Advances in Tribology*, vol. 2011, pp. 1-5, 2011. Available: <https://www.hindawi.com/journals/at/2011/395716/>.
- [36] Minambiente, "Plan Nacional de negocios verdes,"2020. [Online]. Available: <https://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/1385-plantilla-negocios-verdes-y-sostenibles-40>.
- [37] Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, "Política Ambiental para la Gestión Integral de Residuos o Desechos Peligrosos "Bogota,2005.
- [38] Vanguardia, "Confianza empresarial se desploma a mínimos históricos,"2020. [Online]. Available: <https://www.vanguardia.com/economia/nacional/confianza-empresarial-se-desploma-a-minimos-historicos-BL2287201>.
- [39] "DANE", *dane.gov.co*, 2021. [Online]. Available: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/construccion/estadisticas-de-cemento-gris#:~:text=En%20febrero%20de%202021%2C%20la,al%20mismo%20mes%20de%202020>.
- [40] scielo "Ingeniería, investigación y tecnología",2013[Online]. Available: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405
- [41] A. Meshram, R. Jha and S. Varghese, "Towards recycling: Understanding the modern approach to recover waste aluminium dross", *Materials Today: Proceedings*, 2020 [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320390830>. [Accessed: 21- May- 2021]
- [42] C. Dai and D. Apelian, "Fabrication and Characterization of Aluminum Dross-Containing Mortar Composites: Upcycling of a Waste Product", *Journal of Sustainable Metallurgy*, vol. 3, no. 2, pp. 230-238, 2016 [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40831-016-0071-7>. [Accessed: 21- May- 2021]
- [43] P. Tsakiridis, "Aluminium salt slag characterization and utilization – A review", *Journal of Hazardous Materials*, vol. 217-218, pp. 1-10, 2012 [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389412003317?via%3Dihub>. [Accessed: 21- May- 2021]
- [44] H. Shen, B. Liu, C. Ekberg and S. Zhang, "Harmless disposal and resource utilization for secondary aluminum dross: A review", *Science of The Total Environment*, vol. 760, p. 143968, 2021 [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720374994#bb0300>. [Accessed: 20- May- 2021]
- [45] D. Bajare, A. Korjakins, J. Kazjonovs and I. Rozenstrauha, "Pore structure of lightweight clay aggregate incorporate with non-metallic products coming from aluminium scrap recycling industry", *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 32, no. 1, pp. 141-148, 2012 [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955221911003736>. [Accessed: 20- May- 2021]
- [46] P. Ramaswamy, S. Gomes and N. Ravichander, "Utilization of aluminum dross: Refractories from industrial waste", *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 577, p. 012101, 2019 [Online]. Available: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/577/1/012101>. [Accessed: 20- May- 2021]
- [47] R. Beheshti, J. Moosberg-Bustnes, S. Akhtar and R. Aune, "Black Dross: Processing Salt Removal from Black Dross by Thermal Treatment", *JOM*, vol. 66, no. 11, pp. 2243-2252, 2014 [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11837-014-1178-6>. [Accessed: 21- May- 2021]
- [48] S. Yang, T. Wang, Z. Shie, S. Jiang, C. Hwang and C. Tzeng, "Fine Al₂O₃ Powder Produced by Radio-Frequency Plasma from Aluminum Dross", *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 42, no. 12, pp. 3751-3755, 2014 [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6851130>. [Accessed: 21- May- 2021]
- [49] R. Saravanakumar, K. Ramachandran, L. Laly, P. Ananthapadmanabhan and S. Yugeswaran, "Plasma assisted synthesis of γ -alumina from waste aluminium dross", *Waste Management*, vol. 77, pp. 565-575, 2018 [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X18302976?via%3Dihub>. [Accessed: 18- May- 2021]

- [50] Q. Li, Q. Yang, G. Zhang and Q. Shi, "Investigations on the hydrolysis behavior of AlN in the leaching process of secondary aluminum dross", *Hydrometallurgy*, vol. 182, pp. 121-127, 2018 [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304386X18304912?via%3Dihub>. [Accessed: 21- May- 2021]
- [51] H. Guo, J. Wang, X. Zhang, F. Zheng and P. Li, "Study on the Extraction of Aluminum From Aluminum Dross Using Alkali Roasting and Subsequent Synthesis of Mesoporous γ -Alumina", *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 49, no. 5, pp. 2906-2916, 2018 [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11663-018-1341-5>. [Accessed: 20- May- 2021]
- [52] M. Aziz, M. Othman, N. Hashim, M. Rahman, J. Jaafar, S. Hubadillah and Z. Tai, "Pretreated aluminium dross waste as a source of inexpensive alumina-spinel composite ceramic hollow fibre membrane for pretreatment of oily saline produced water", *Ceramics International*, vol. 45, no. 2, pp. 2069-2078, 2019 [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884218329158?via%3Dihub>. [Accessed: 20- May- 2021]
- [53] T. Hashishin, Y. Kodera, T. Yamamoto, M. Ohyanagi and Z. Munir, "Synthesis of (Mg,Si)Al₂O₄Spinel from Aluminum Dross", *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 87, no. 3, pp. 496-499, 2004 [Online]. Available: <https://ceramics.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1551-2916.2004.00496.x>. [Accessed: 21- May- 2021]
- [54] B. Das, B. Dash, B. Tripathy, I. Bhattacharya and S. Das, "Production of η -alumina from waste aluminium dross", *Minerals Engineering*, vol. 20, no. 3, pp. 252-258, 2007 [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S089268750600238X>. [Accessed: 29- May- 2021]
- [55] K. Hu, D. Reed, T. Robshaw, R. Smith and M. Ogden, "Characterisation of aluminium black dross before and after stepwise salt-phase dissolution in non-aqueous solvents", *Journal of Hazardous Materials*, vol. 401, p. 123351, 2021 [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389420313406?via%3Dihub>. [Accessed: 20- May- 2021]
- [56] W. Wöhlk, G. Niederjaufner and G. Hofmann, "Recycling of Cover Salt in the Secondary Aluminium Industry", *Crystallization and Precipitation*, pp. 99-108, 1987 [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080357515500209>. [Accessed: 23- May- 2021]
- [57] M. Reddy and D. Neeraja, "Mechanical and durability aspects of concrete incorporating secondary aluminium slag", *Resource-Efficient Technologies*, vol. 2, no. 4, pp. 225-232, 2016 [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405653716301907>. [Accessed: 21- May- 2021]
- [58] S. Javali, A. Chandrashekar, S. Naganna, D. Manu, P. Hiremath, H. Preethi and N. Vinod Kumar, "Eco-concrete for sustainability: utilizing aluminium dross and iron slag as partial replacement materials", *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol. 19, no. 9, pp. 2291-2304, 2017 [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10098-017-1419-9>. [Accessed: 23- May- 2021]
- [59] G. Mailar, S. N, S. B.M, M. D.S, P. Hiremath and J. K., "Investigation of concrete produced using recycled aluminium dross for hot weather concreting conditions", *Resource-Efficient Technologies*, vol. 2, no. 2, pp. 68-80, 2016 [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405653716300306>. [Accessed: 20- May- 2021]
- [60] A. Gil and S. Korili, "Management and valorization of aluminum saline slags: Current status and future trends", *Chemical Engineering Journal*, vol. 289, pp. 74-84, 2016 [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894715017416#b0205>. [Accessed: 29- May- 2021]
- [61] G. Dubé, "METHOD FOR THE PRODUCTION AND THE PURIFICATION OF MOLTEN CALCIUM ALUMINATE USING CONTAMINATED ALUMNUMIDROSS RESIDUE", US 9,382,595 B2014.
- [62] E. Ewais, N. Khalil, M. Amin, Y. Ahmed and M. Barakat, "Utilization of aluminum sludge and aluminum slag (dross) for the manufacture of calcium aluminate cement", *Ceramics International*, vol. 35, no. 8, pp. 3381-3388, 2009 [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884209002612?via%3Dihub>. [Accessed: 19- May- 2021]
- [63] A. Elinwa and E. Mbadike, "The Use of Aluminum Waste for Concrete Production", *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, vol. 10, no. 1, pp. 217-220, 2011 [Online]. Available: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.3130/jaabe.10.217>. [Accessed: 22- May- 2021]

- [64] N. Ozerkan, O. Maki, M. Anayeh, S. Tangen and A. Abdullah, "The Effect of Aluminium Dross on Mechanical and Corrosion Properties of Concrete", *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, vol. 3, no. 3, pp. 9912-9921, 2014 [Online]. Available: <https://qspace.qu.edu.qa/handle/10576/5453>. [Accessed: 22- May- 2021]
- [65] Y. Liu, B. Leong, Z. Hu and E. Yang, "Autoclaved aerated concrete incorporating waste aluminum dust as foaming agent", *Construction and Building Materials*, vol. 148, pp. 140-147, 2017 [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817309376#b0075>. [Accessed: 20- May- 2021]
- [66] D. Pereira, B. de Aguiar, F. Castro, M. Almeida and J. Labrincha, "Mechanical behaviour of Portland cement mortars with incorporation of Al-containing salt slags", *Cement and Concrete Research*, vol. 30, no. 7, pp. 1131-1138, 2000 [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008884600002726>. [Accessed: 18- May- 2021]
- [67] E. Ewais and N. Besisa, "Tailoring of magnesium aluminum titanate-based ceramics from aluminum dross", *Materials & Design*, vol. 141, pp. 110-119, 2018 [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127517311292>. [Accessed: 22- May- 2021]
- [68] A. Li, H. Zhang and H. Yang, "Evaluation of aluminum dross as raw material for high-alumina refractory", *Ceramics International*, vol. 40, no. 8, pp. 12585-12590, 2014 [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884214006208>. [Accessed: 21- May- 2021]
- [69] S. Adeosun, E. Akpan and M. Dada, "Refractory Characteristics of Aluminum Dross-Kaolin Composite", *JOM*, vol. 66, no. 11, pp. 2253-2261, 2014 [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11837-014-1179-5>. [Accessed: 20- May- 2021]
- [70] S. Adeosun, M. Usman, W. Ayoola and I. Sekunowo, "Evaluation of the Mechanical Properties of Polypropylene-Aluminum-Dross Composite", *ISRN Polymer Science*, vol. 2012, pp. 1-6, 2012 [Online]. Available: <https://www.hindawi.com/journals/isrn/2012/282515/>. [Accessed: 21- May- 2021]
- [71] N. Samat, F. Sabaruddin, M. Meor Yusoff and A. Dayang Habibah, "Evaluation of Waste from Aluminum Industry as Filler in Polypropylene Composites", *JOM*, vol. 69, no. 4, pp. 790-795, 2017 [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11837-016-2232-3>. [Accessed: 23- May- 2021]
- [72] "El método Walt Disney: Una técnica creativa realista | Job Wizards", *Job Wizards*. [Online]. Available: <https://job-wizards.com/es/el-metodo-walt-disney-una-tecnica-creativa-realista/>.
- [73] "Ácido", *Quimica.es*, 2021. [Online]. Available: <https://www.quimica.es/enciclopedia/%C3%81cido.html>. [Accessed: 03- Jun- 2021]
- [74] "Agente espumante", *Mexpolimeros*, 2019 [Online]. Available: <https://www.mexpolimeros.com/agente%20espumante.html>. [Accessed: 04- Jun- 2021]
- [75] "Agua destilada vs Agua desionizada ¿Cuál es la diferencia? | Matraz.pe.pe", *Matraz.pe*, 2021. [Online]. Available: <https://www.matraz.pe/agua-destilada-vs-agua-desionizada/>. [Accessed: 04- Jun- 2021]
- [76] "Alcalino", *Real Academia Española*. 2020 [Online]. Available: <https://www.rae.es/>. [Accessed: 03- Jun- 2021]
- [77] Concretos super mix, "Agregados para la elaboración de concreto," 2018. [Online]. Available: <https://www.supermix.com.pe/agregados-para-la-elaboracion-de-concreto/#:~:text=Los%20agregados%20son%20un%20conjunto,para%20la%20fabricaci%C3%B3n%20de%20concreto.>
- [78] "Aleación", *Real Academia Española*. 2020 [Online]. Available: <https://www.rae.es/>. [Accessed: 03- Jun- 2021]
- [79] "Base_(química)", *Quimica.es*, 2021. [Online]. Available: https://www.quimica.es/enciclopedia/Base_%28qu%C3%ADmica%29.html. [Accessed: 03- Jun- 2021]
- [80] "Bauxita", *Real Academia Española*. 2020 [Online]. Available: <https://www.rae.es/>. [Accessed: 03- Jun- 2021]

- [81] "Calcinar", *Real Academia Española*. 2020 [Online]. Available: <https://www.rae.es/>. [Accessed: 03- Jun- 2021]
- [82] "Caolín", *Real Academia Española*. 2020 [Online]. Available: <https://www.rae.es/>. [Accessed: 03- Jun- 2021]
- [83] "Cemento", *Real Academia Española*. 2020 [Online]. Available: <https://www.rae.es/>. [Accessed: 03- Jun- 2021]
- [84] "Cemento De Aluminato De Calcio – Royal White Cement", *Royalwhitecement.com*, 2021. [Online]. Available: <https://www.royalwhitecement.com/es/our-products/calcium-aluminate-cement/>. [Accessed: 04- Jun- 2021]
- [85] "Cemento Portland Ordinario", *ARQUITECTURA PURA*, 2021. [Online]. Available: <https://www.arquitecturapura.com/cemento-portland-ordinario/>. [Accessed: 04- Jun- 2021]
- [86] S. Huaquisto Cáceres and G. Belizario Quispe, "Utilización de la ceniza volante en la dosificación del concreto como sustituto del cemento", *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, vol. 20, no. 2, pp. 255-234, 2018 [Online]. Available: http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2313-29572018000200007. [Accessed: 04- Jun- 2021]
- [87] P. Landín, "Materiales cerámicos: propiedades, clasificación y obtención", *Pelandintecno.blogspot.com*, 2013. [Online]. Available: <http://pelandintecno.blogspot.com/2013/02/materiales-ceramicos-propiedades.html>. [Accessed: 04- Jun- 2021]
- [88] "Compuestos", *Real Academia Española*. 2020 [Online]. Available: <https://www.rae.es/>. [Accessed: 03- Jun- 2021]
- [89] aceros arequipa, "Tipos de concreto y usos,"2021. [Online]. Available: <https://www.construyendoseguro.com/los-tipos-de-concreto-y-sus-usos/>
- [90] argos, "PROPIEDADES Y APLICACIONES DEL CONCRETO CELULAR,"2019. [Online]. Available: <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/category/innovacion-y-tendencias/propiedades-aplicaciones-del-concreto-celular>.
- [91] "Criba", *Real Academia Española*. 2020 [Online]. Available: <https://www.rae.es/>. [Accessed: 03- Jun- 2021]
- [92] "Técnicas - Difracción de Rayos X - Caracterización de Materiales Cristalinos", *Ehu.eus*, 2006. [Online]. Available: <http://www.ehu.eus/imacris/PIE06/web/DRXP.htm>. [Accessed: 04- Jun- 2021]
- [93] "Disolución", *Real Academia Española*. 2020 [Online]. Available: <https://www.rae.es/>. [Accessed: 03- Jun- 2021]
- [94] "Durabilidad", *Real Academia Española*. 2020 [Online]. Available: <https://www.rae.es/>. [Accessed: 03- Jun- 2021]
- [95] "Dureza", *Real Academia Española*. 2020 [Online]. Available: <https://www.rae.es/>. [Accessed: 03- Jun- 2021]
- [96] "¿En qué consiste la economía circular?", *Sostenibilidad.com*, 2019. [Online]. Available: <https://www.sostenibilidad.com/desarrollo-sostenible/en-que-consiste-la-economia-circular/>. [Accessed: 04- Jun- 2021]
- [97] " MATERIALES CEMENTANTES SUPLEMENTARIOS Y SUS EFECTOS EN EL CONCRETO ", 360enconcreto, 2020 [Online]. Available: <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/efectos-de-cementantes-suplementarios>. [Accessed: 04- Jun- 2021]
- [98] "Escorias de alto horno", *Cedex*, 2011 [Online]. Available: <http://www.cedex.es/NR/rdonlyres/BFF81F23-BDB7-4B5B-85A5-A7ABD2974A42/119856/ESCORIASDEHORNOALTO>. [Accessed: 04- Jun- 2021]
- [99] " Alcohol Anhidro ", *INCAUCA S.A.S.* 2020 [Online]. Available: <https://www.incauca.com/es/producto/alcohol-anhidro/>. [Accessed: 04- Jun- 2021]
- [100] "Extrusora", *Real Academia Española*. 2020 [Online]. Available: <https://www.rae.es/>. [Accessed: 03- Jun- 2021]
- [101] " Fluorecencia de rayos x ", *MalvernPanalytical*. 2020 [Online]. <https://www.malvernpanalytical.com/es/products/technology/xray-analysis/x-ray-fluorescence>. [Accessed: 04- Jun- 2021]

- [102] "Fraguado", *Real Academia Española*. 2020 [Online]. Available: <https://www.rae.es/>. [Accessed: 03- Jun- 2021]
- [103] "Fundir", *Real Academia Española*. 2020 [Online]. Available: <https://www.rae.es/>. [Accessed: 03- Jun- 2021]
- [104] " Los gases de efecto invernadero ", *AQUAE Fundacion* 2020 [Online]. Available: <https://www.fundacionaquae.org/los-gases-de-efecto-invernadero/>. [Accessed: 04- Jun- 2021]
- [105] "Granulometría", *Real Academia Española*. 2020 [Online]. Available: <https://www.rae.es/>. [Accessed: 03- Jun- 2021]
- [106] "Hidrolisis", *Real Academia Española*. 2020 [Online]. Available: <https://www.rae.es/>. [Accessed: 03- Jun- 2021]
- [107] "Hidrometalurgia ", *Ministerio de mineria*. 2020 [Online]. Available: <https://www.rae.es/>. [Accessed: 04- Jun- 2021]
- [108] " Humo de Silice ", *Tecsil*. 2020 [Online]. Available: <https://tecsil-la.com/humo-de-silice/>. [Accessed: 04- Jun- 2021]
- [109] " ¿Qué es un KPI y para qué sirve? ", *DigitalTalent*. 2017[Online]. Available: <https://www.isdi.education/mx/blog/que-es-un-kpi-y-para-que-sirve/>. [Accessed: 04- Jun- 2021]
- [110] "Lingote", *Real Academia Española*. 2020 [Online]. Available: <https://www.rae.es/>. [Accessed: 03- Jun- 2021]
- [111] "Lixiviado", *Real Academia Española*. 2020 [Online]. Available: <https://www.rae.es/>. [Accessed: 03- Jun- 2021]
- [112] "Lixiviar", *Real Academia Española*. 2020 [Online]. Available: <https://www.rae.es/>. [Accessed: 03- Jun- 2021]
- [113] "Matrices cementicias multifuncionales mediante adición de nanofibras de carbono", *Dialnet*. 2013 [Online]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/>. [Accessed: 04- Jun- 2021]
- [114] "El módulo de Young o módulo de elasticidad longitudinal", *Servocis*. 2020 [Online]. Available: <https://www.servocis.com/noticias/el-modulo-de-young-o-modulo-de-elasticidad-longitudinal-38/>. [Accessed: 04- Jun- 2021]
- [115] "Molienda", *Real Academia Española*. 2020 [Online]. Available: <https://www.rae.es/>. [Accessed: 03- Jun- 2021]
- [116] "Molino de bolas", *BUHLER*. 2020 [Online]. Available: <https://www.buhlergroup.com/content/buhlergroup>. [Accessed: 04- Jun- 2021]
- [117] Building Together, "Cuál es la diferencia entre mortero y cemento: todo lo que necesitas saber,"2021. [Online]. Available: <https://www.rubi.com/es/blog/diferencia-entre-mortero-y-cemento/>.
- [118] "Nitruro", *Quimica*. 2020 [Online]. Available: <https://www.quimica.es/enciclopedia/Nitruro.html>. [Accessed: 04- Jun- 2021]
- [119] "Oxidación", *Real Academia Española*. 2020 [Online]. Available: <https://www.rae.es/>. [Accessed: 03- Jun- 2021]
- [120] "Oxido", *Real Academia Española*. 2020 [Online]. Available: <https://www.rae.es/>. [Accessed: 03- Jun- 2021]
- [121] "Diseña y suministra perfiles de aluminio para la industria y la construcción," Accessed: jun. 05, 2021. [Online]. Available: <https://www.gestiondecompras.com/es/productos/conformado-de-tubos-y-perfiles/perfiles-de-aluminio>.
- [122] "Pirometalurgia." <https://www.hatch.com/es-CL/Expertise/Services-and-Technologies/Pyrometallurgy> (accessed Jun. 05, 2021).
- [123] "Polimero", *Real Academia Española*. 2020 [Online]. Available: <https://www.rae.es/>. [Accessed: 03- Jun- 2021]
- [124] "Polipropileno (PP) - Plásticos técnicos - Elaplas." <http://www.elaplas.es/materiales/plasticos-tecnicos/polipropileno-pp/> (accessed jun. 05, 2021).
- [125] "2.2 Propiedades mecánicas | Materiales de uso técnico." https://www.edu.xunta.gal/espazoAbalar/sites/espazoAbalar/files/datos/1464947174/contido/22_propiedades_mecnicas.html (accessed jun. 05, 2021).

- [127] "Pulverización", *Real Academia Española*. 2020 [Online]. Available: <https://www.rae.es/>. [Accessed: 03- Jun- 2021]
- [128] "¿Qué es la puzolana? - Comunidad 360." <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/category/cemento/191qu233-es-la-puzolana> (accessed jun. 05, 2021).
- [129] "refractario", *TheFreeDictionary.com*, 2021. [Online]. Available: <https://es.thefreedictionary.com/refractario>. [Accessed: 05- Jun- 2021].
- [131] "Rendimiento de las reacciones. - Problemas de química general para universitarios." <https://www.aulafacil.com/cursos/quimica/problemas-de-quimica-general-para-universitarios/rendimiento-de-las-reacciones-140254> (accessed jun. 05, 2021).
- [132] Cemex, "Artículos de construcción," 2019. [Online]. Available: <https://www.cemex.com.pe/-/por-que-se-determina-la-resistencia-a-la-compresion-en-el-concreto->.
- [133] "Residuos Sólidos." <https://www.corantioquia.gov.co/SitePages/gestiointegralresiduossolidos.aspx> [accessed jun. 05, 2021].
- [134] "¿Por qué se determina la resistencia a la compresión en el concreto? | CEMEX Peru." <https://www.cemex.com.pe/-/por-que-se-determina-la-resistencia-a-la-compresion-en-el-concreto-> [accessed Jun. 05, 2021].
- [135] "RESISTENCIA A LA TRACCIÓN - Definición - Significado." <https://diccionario.motorgiga.com/diccionario/resistencia-a-la-traccion-definicion-significado/gmx-niv15-con195386.htm> [accessed jun. 05, 2021].
- [136] "¿Qué es la simbiosis industrial? | FISSAC." <https://fissacproject.eu/es/que-es-la-simbiosis-industrial/> [accessed Jun. 05, 2021].
- [137] "Sinterizar", *Real Academia Española*. 2020 [Online]. Available: <https://www.rae.es/>. [Accessed: 03- Jun- 2021]
- [138] "Tamizar", *Real Academia Española*. 2020 [Online]. Available: <https://www.rae.es/>. [Accessed: 03- Jun- 2021]
- [139] "Vertederos", *Real Academia Española*. 2020 [Online]. Available: <https://www.rae.es/>. [Accessed: 03- Jun- 2021]
- [140] "Viruta", *Real Academia Española*. 2020 [Online]. Available: <https://www.rae.es/>. [Accessed: 03- Jun- 2021]
- [141] "Temáticas", economía internacional, 2021. [Online]. Available: <https://tematicas.org/indicadores-economicos/economia-internacional/precios/precio-aluminio/2021/> [Accessed: 31-May-2021].
- [142] *Globalización*. Real Academia Española. Consultado el 13 de agosto de 2021 en <https://dle.rae.es/globalizaci%C3%B3n>.
- [143] "ANDI - Cámaras Sectoriales", *Andi.com.co*. [En línea]. Disponible: <http://www.andi.com.co/Home/Camara/10-camara-fedemetal>. [Consultado: 13 de agosto de 2021].
- [144] "SEM", <http://www.pucv.cl>. [En línea]. Disponible: <https://www.pucv.cl/uuaa/asistencia-tecnica-y-capacitacion-instituto-de-quimica/sem>. [Consultado: 22 de octubre de 2021].
- [145] P. Ramaswamy, S. Avijit Gomes and N. Ravichander, *Utilization of aluminum dross: Refractories from industrial waste*. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 577 012101, 2019.
- [146] "Densidad - EcuRed", *Ecured.cu*. [En línea]. Disponible: <https://www.ecured.cu/Densidad>. [Consultado: 6 de noviembre de 2021].
- [147] E. Leyva Ramírez, M. de La Fuente Fernández, O. Leyva González, A. Sánchez Cruz e Y. Ferreiro Guerrero, *ESTUDIO DE LA CINÉTICA DE MOLIENDA DE LA MENA DE CROMITA DEL YACIMIENTO ALBERTINA*. Tecnología Química, vol. XXIX, núm. 3, 2009, págs. 55 - 63.

- [148] "Vehiculos y Dimensiones", *Logisticatotal.co*, 2021. [Online]. Available: http://www.logisticatotal.co/principal/index.php?option=com_content&view=article&id=21&Itemid=157&lang=es. [Accessed: 15- Nov- 2021].
- [149] "CG22 - Silo de fondo cónico by SHANDONG SHANTUI CONSTRUCTION MACHINERY IMP&EXP CO | DirectIndustry", *Directindustry.es*, 2021. [Online]. Available: <https://www.directindustry.es/prod/shandong-shantui-construction-machinery-imp-exp-co/product-57420-1843749.html>. [Accessed: 15- Nov- 2021].
- [150] "Equipos para Lavado - FRC Ingeniería", *FRC Ingeniería*, 2021. [Online]. Available: <http://frcingenieria.com/productos/equipos-para-lavado/>. [Accessed: 15- Nov- 2021].
- [151] "Horno rotativo basculante FARB® - Insertec", *Insertec-store.com*, 2021. [Online]. Available: <https://www.insertec-store.com/es/hornos-industriales/hornos-reciclado-de-aluminio/reciclado-escorias/horno-rotativo-farb.html>. [Accessed: 15- Nov- 2021].
- [152] *Alpapowder.com*, 2021. [Online]. Available: <https://www.alpapowder.com/es/machines/molino-vibratorio/>. [Accessed: 15- Nov- 2021].
- [153] *Alpapowder.com*, 2021. [Online]. Available: <https://www.alpapowder.com/es/project/linea-de-produccion-de-molienda-superfina-de-cemento-de-una-fabrica-de-materiales-de-construccion-en-grecia/>. [Accessed: 15- Nov- 2021].
- [154] M. Hernandez Calderon, C. Nieves de la Hoz, *Perfil Logístico del Sector Cemento en Colombia*. Universidad del Rosario, 2015, pág. 24.
- [155] E. Sánchez, A. Ossa Cárdenas, P. Kwasnycia y X. Zuluaga, "Guía de Inversión en el Valle del Cauca", *Investpacific.org*, 2018. [Online]. Disponible: <https://investpacific.org/wp-content/uploads/532.pdf>. [Consultado: 15 de noviembre de 2021].
- [156] LEA, T., 2021. *Transportes LEA*. [online] Transportes-lea.business.site. Available at: <<https://transportes-lea.business.site/>> [Accessed 6 November 2021].
- [157] "Tipos de estibas y sus características | AR Racking Colombia", *Ar-racking.com*. [En línea]. Disponible: <https://www.ar-racking.com/co/actualidad/blog/calidad-y-seguridad-4/tipos-de-estibas-y-caracteristicas>. [Consultado: 15 de noviembre de 2021].
- [158] L. Hervás, "La oficina ideal: 14m² por empleado", *El País | Cinco Días*, 2014. [Online]. Disponible: https://cincodias.elpais.com/cincodias/2014/10/28/pyme/1414500383_553511.html. [Consultado: 15 de noviembre de 2021].
- [159] D. LTD., «CompuTrabajo» [En línea]. Available: <https://www.computrabajo.com.co/salarios/operarioa?p=4>. [Último acceso: 10 2021].
- [160] D. LTD., «CompuTrabajo,» [En línea]. Available: <https://www.computrabajo.com.co/salarios/jefea-de-planta>. [Último acceso: 11 2021].
- [161] "Banco AV Villas - cartera ordinaria", *Avvillas.com.co*. [En línea]. Disponible: <https://www.avvillas.com.co/wps/portal/avvillas/banco/banca-empresarial/productos/prestamos/cartera-ordinaria/>. [Consultado: 17 de noviembre de 2021].
- [162] INFORME DE POLÍTICA MONETARIA. Banco de la República, 2021.
- [163] "Tienda Argos", *Tienda Argos*. [En línea]. Disponible: https://www.tiendargos.com.co/?utm_cp=cali. [Consultado: 20 de noviembre de 2021].
- [164] "COLOMBIA CONSTRUCCIÓN EN CIFRAS", *Camacol.co*, 2021. [En línea]. Disponible: <https://camacol.co/sites/default/files/documentos/Colombia%20Construccion%20en%20Cifras%20Octubre.xlsx>. [Consultado: 20 de noviembre de 2021].

[165] "Tarifas - EMCALI", *Emcali.com.co*, 2021. [Online]. Disponible: <https://www.emcali.com.co/web/energia/tarifas>. [Consultado: 20 de noviembre de 2021].

[166] D. Productos, M. Procesamiento y M. Clasificación, "La Vibración Vibromill super fina Máquina de molienda Molino de la vibración de hierbas y el polvo mineral", *Made-in-China.com*. [En línea]. Disponible: https://es.made-in-china.com/co_alpapowder/product_Superfine-Vibromill-Vibration-Grinding-Machine-Vibration-Mill-of-Herbs-Mineral-Powder_oiohsgg.html. [Consultado: 22 de noviembre de 2021].

[167] "Pequeño Silo De Cemento A Granel Para Almacenamiento De Plantas, Pequeño Silo De Cemento A Granel Para Pisos De Hormigón, Precio De Fábrica De China - Compre China Small Cement Silo, Powder Storage Silo, Bulk Powder Storage Silo Product en Alibaba.com ", *español.alibaba.com*. [En línea]. Disponible: https://spanish.alibaba.com/product-detail/silo-storage-cement-silo-factory-price-china-small-cement-silo-bulk-powder-storage-silo-for-concrete-batching-plant-160018247742.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.50b949e0LSctUK&s=p. [Consultado: 22 de noviembre de 2021].

[168] "Alta Temperatura De Cemento De Mineral De Hierro Del Horno Rotatorio Secador Para Venta - Compre Horno Rotatorio De Mineral De Hierro, Horno Rotatorio De Cal, Producto De Horno Rotatorio De Alta Temperatura en Alibaba.com", *Spanish.alibaba.com*. [En línea]. Disponible: https://spanish.alibaba.com/product-detail/high-temperature-cement-lime-iron-ore-rotary-kiln-dryer-for-sale-60660427325.html?spm=a2700.7724857.normal_offer.d_title.55011cf0dHEQ1k. [Consultado: 22 de noviembre de 2021].

[169] "Equipo De Lavado De Arena En Espiral, Precio De Fábrica, Lavadora De Arena En Planta De Lavado De Piedra - Compre Lavadora De Piedra, Lavadora De Arena, Producto De Lavadora De Precio De Fábrica En Alibaba.com", *Spanish.alibaba.com*. [En línea]. Disponible: https://spanish.alibaba.com/product-detail/equipment-sand-washing-machine-price-sand-sieving-machine-washing-equipment-spiral-factory-price-sand-washer-in-stone-washing-plant-1600083259854.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.34f57d2dZySIx9&s=p. [Consultado: 22 de noviembre de 2021].

[170] "Precio De Transportador De Barrena De Tornillo De Sal - Compre Transportador De Tornillo Flexible, Transportador De Tornillo Para Chip, Producto Transportador De Tornillo De Maíz en Alibaba.com", *Spanish.alibaba.com*. [En línea]. Disponible: https://spanish.alibaba.com/product-detail/salt-screw-auger-conveyor-price-62596332339.html?spm=a2700.7735675.normal_offer.d_title.940b5d18UWB6fl&s=p. [Consultado: 22 de noviembre de 2021].