



**UNIVERSIDAD  
DEL AZUAY**

**FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

**ESCUELA DE INGENIERÍA EN MINAS**

**“Reducción de impurezas de óxidos de hierro en caolín mediante  
flotación espumante”**

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:

**INGENIERO EN MINAS**

**Autoras:**

CAROL ANAHÍ MONCAYO PALOMEQUE.

JESSICA LISBETH TORRES GONZÁLEZ.

**Director:**

FERNANDO TULIO VALENCIA GUARICELA

**CUENCA, ECUADOR**

**2026**

Carol Anahí Moncayo Palomeque

Jessica Lisbeth Torres González

Trabajo de Titulación

Ing. Fernando Tulio Valencia Guaricela

Mayo, 2026

**“Reducción de impurezas de óxidos de hierro en caolín mediante  
flotación espumante”**

## **DEDICATORIA**

En primer lugar, dedico este trabajo a mis padres, quienes, con su amor incondicional, sacrificio, esfuerzo y apoyo constante, han sido el pilar fundamental en cada uno de mis logros.

De igual manera, a mis hermanos y abuelitos, quienes, con su cariño y palabras de aliento han sido una motivación constante para perseverar.

A todas las personas que he conocido a lo largo de mi vida universitaria, por su apoyo, compañía y por dejar en mí enseñanzas y palabras que contribuyeron a este proceso.

Finalmente, pero no menos importante, me lo dedico a mí misma, en reconocimiento al esfuerzo, constancia y dedicación que he puesto para hacer posible la culminación de esta etapa.

**Carol Moncayo P.**

Dedico este logro, en primer lugar, a Dios, por iluminar mi camino, darme fortaleza y la sabiduría necesaria para culminar esta importante etapa de mi vida.

A mis queridos padres, especialmente a mi madre Lupe González y a mi padre Silvio Torres, quienes con su amor, esfuerzo, sacrificio y dedicación hicieron posible que alcanzara esta meta. Gracias por ser mi mayor ejemplo de perseverancia, por confiar siempre en mí y por brindarme su apoyo incondicional en cada momento de mi formación académica y personal.

A mi hermana Kerly Torres, por acompañarme a lo largo de este camino, por sus palabras de ánimo, su cariño y su apoyo incondicional en los momentos más difíciles.

Y de una manera muy especial, a mi querida mascota Doky, quien estuvo presente durante toda mi carrera universitaria brindándome compañía, tranquilidad y alegría en los días de esfuerzo, desvelo y cansancio. Su compañía se convirtió en un apoyo silencioso pero muy significativo en esta etapa de mi vida.

Finalmente, agradezco a todas aquellas personas que formaron parte de este proceso y contribuyeron de alguna manera a mi crecimiento personal y profesional.

**Jessica Torres G.**

## **AGRADECIMIENTO**

Expreso mi profundo agradecimiento a la Universidad del Azuay y a la Escuela de Ingeniería en Minas, por abrirme las puertas y permitirme formar como profesional.

Al Ing. Fernando Valencia Guaricela, director de tesis, por su orientación, dedicación y valiosos aportes, que enriquecieron significativamente esta investigación.

De igual manera, agradezco a los ingenieros Eduardo Luna, Patricio Feijoo y Leonardo Núñez, quienes, como docentes, han contribuido de manera significativa a mi formación académica. Su acompañamiento, enseñanzas y disposición para guiar han sido fundamentales a lo largo de este proceso de aprendizaje.

**Carol Moncayo P.**

Agradezco de manera especial a la Universidad del Azuay y a la Escuela de Ingeniería en Minas, por la formación académica recibida. Al Ing. Fernando Tulio Valencia Guaricela, director de tesis, por su guía experta, paciencia y compromiso con el desarrollo de esta investigación.

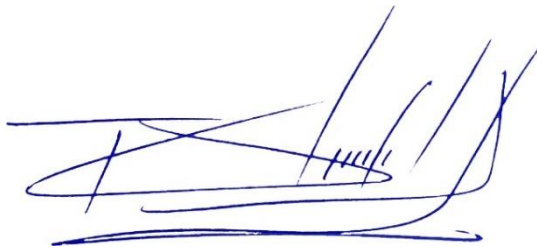
Expreso también mi sincero agradecimiento a los ingenieros Patricio Feijoo, Eduardo Luna y Leonardo Núñez, así como a todos mis profesores, quienes compartieron sus conocimientos, experiencias y enseñanzas, contribuyendo significativamente a mi formación académica y personal. Y agradezco a todas las personas que, de una u otra manera, hicieron posible la culminación de este trabajo y me acompañaron durante este importante proceso de mi vida.

**Jessica Torres G.**

## RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo reducir las impurezas de óxidos de hierro en caolín mediante el proceso de flotación espumante. La muestra de caolín presentó una composición mineralógica predominante de caolinita (57.2%) y cuarzo (36.9%), con trazas de oligoclasa (2.9%) y gibbsita (3.0%), determinada mediante difracción de rayos X. Se realizó la caracterización física del material, incluyendo análisis granulométrico, límites de Atterberg, densidad y pH, obteniendo valores de límite líquido de 30.4%, límite plástico de 26.62% e índice de plasticidad de 3.78%, clasificando el material como limo inorgánico de baja plasticidad. El proceso experimental consistió en nueve ensayos de flotación siguiendo un diseño factorial 3×3, evaluando el efecto del pH (4, 7 y 9) y la fracción de sólidos (15%, 25% y 35%) sobre la eficiencia de remoción de impurezas. Se emplearon xantato amílico de potasio (Z-6) como colector y espumante XF-250, con tiempos de acondicionamiento y aireación controlados. Los resultados obtenidos permitieron establecer las condiciones de mejor desempeño dentro del intervalo experimental estudiado de operación para la reducción de óxidos de hierro en el caolín, contribuyendo al mejoramiento de su calidad para aplicaciones en la industria cerámica.

**Palabras clave:** caolín, flotación espumante, óxidos de hierro, purificación mineral, caracterización mineralógica, industria cerámica



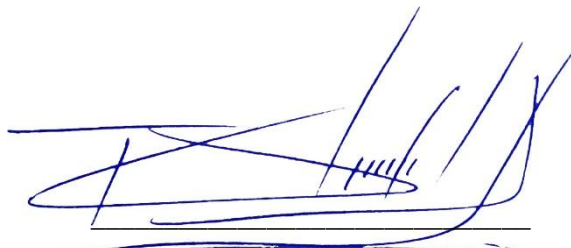
---

Ing. Fernando Valencia Guaricela.  
**Director de tesis.**

## ABSTRACT

This study aimed to reduce iron oxide impurities in kaolin using froth flotation. The kaolin sample had a predominant mineralogical composition of kaolinite (57.2%) and quartz (36.9%), with traces of oligoclase (2.9%) and gibbsite (3.0%), as determined by X-ray diffraction. Physical characterization of the material was performed, including particle size analysis, Atterberg limits, density, and pH, yielding liquid limit values of 30.4%, plastic limit of 26.62%, and plasticity index of 3.78%, classifying the material as low-plasticity inorganic silt. The experimental process consisted of nine flotation trials following a 3×3 factorial design, evaluating the effect of pH (4, 7, and 9) and solids fraction (15%, 25%, and 35%) on impurity removal efficiency. Potassium amyl xanthate (Z-6) was used as the collector and XF-250 frother, with controlled conditioning and aeration times. The results obtained allowed the establishment of optimal operating conditions for the reduction of iron oxides in kaolin, contributing to the improvement of its quality for applications in the ceramics industry.

**Keywords:** kaolin, froth flotation, iron oxides, mineral purification, mineralogical characterization, ceramics industry



Ing. Fernando Valencia Guaricela.

**Thesis director.**

**TABLA DE CONTENIDOS**

DEDICATORIA .....	iii
AGRADECIMIENTO .....	iv
RESUMEN .....	vi
ABSTRACT.....	vii
TABLA DE CONTENIDOS .....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
ÍNDICE DE TABLAS .....	xiv
ÍNDICE DE ANEXOS .....	xv
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO 1.....	3
MARCO TEÓRICO.....	3
1.1    Materiales cerámicos .....	3
1.1.1 Definición de materiales cerámicos .....	3
1.1.2 Estructura de materiales cerámico.....	4
1.1.3 Clasificación de materiales cerámicos .....	5
1.1.4 Propiedades mecánicas de materiales cerámicos .....	6
1.1.5 Propiedades fisicoquímico de materiales cerámicos.....	8
1.2    Definición de arcillas .....	9
1.2.1 Tipos de clasificación de arcillas .....	9
1.2.2 Minerales arcillosos en el Ecuador.....	10
1.3    Generalidades el caolín .....	12
1.3.1 Propiedades físicas del caolín .....	14
1.3.2 Composición y estructura cristalina del caolín .....	15
1.4    Genesis y clasificación de minerales de caolín.....	16
1.4.1 Caolines primarios .....	16

1.4.2	Caolines secundarios.....	17
1.5	Principales usos del caolin.....	18
1.5.1	Industria del papel.....	20
1.5.2	Industria de plásticos, adhesivos y caucho.....	20
1.5.3	Industria de la pintura.....	21
1.5.4	Industria farmacéutica.....	21
1.5.5	Industria Química.....	22
1.5.6	Industria de la cerámica.....	23
1.5.7	Industria del cemento.....	23
1.5.8	Remediación ambiental.....	23
1.6	El caolín en la industria cerámica.....	24
1.6.1	Cerámica roja.....	25
1.6.2	Cerámica blanca.....	25
1.6.3	Cerámica refractaria.....	26
1.7	Impurezas presentes en los depósitos de caolín.....	28
1.7.1	Alteración del color del caolín por la presencia de impurezas no deseadas.....	29
1.8	Caracterización del hierro en materiales arcillosos.....	30
1.9	Índices metalúrgicos.....	31
1.9.1	Clasificación de índices metalúrgicos.....	33
1.9.1.1	Índices que relacionan calidad.....	33
1.9.1.2	Índices que relacionan capacidad.....	34
1.9.2	Índices metalúrgicos ideales.....	36
1.10	Flotación espumante.....	37
1.10.1	Factores que interviene en la flotación.....	39

1.10.2	Reactivos de flotación .....	40
1.10.2.1	Especificación de uso de colectores .....	42
1.11	Equipos de flotación .....	43
1.11.1.	Tipos de celda de flotación.....	44
1.12	Celda de flotación tipo Denver .....	45
1.13	Maquinaria Humboldt.....	47
1.14	Clasificación de los hornos cerámicos.....	48
1.14.1	Hornos según la dirección de los gases.....	48
1.14.1.1	Horno de tiro ascendente .....	48
1.14.1.2	Horno de tiro descendente .....	49
1.14.2	Hornos según el combustible utilizado.....	50
1.14.2.1	Horno de combustibles sólidos .....	50
1.14.2.2	Horno de combustibles líquidos.....	50
1.14.2.3	Horno de combustibles gaseosos .....	51
1.14.2.4	Horno eléctrico.....	51
1.14.2.5	Horno utilizado para la realización de las briquetas .....	52
CAPÍTULO 2.....		54
PROCESO EXPERIMENTAL.....		54
2.1	Caracterización de la muestra mediante difracción de rayos X.....	54
2.1.1.	Composición mineralógica.....	54
2.1.2.	Preparación inicial del material.....	56
2.1.3.	Secado del material .....	57
2.1.4.	Molienda del material.....	57
2.1.5.	Análisis de textura y color.....	58
2.1.6.	Medición del pH.....	59

2.1.7. Determinación de densidad .....	60
2.1.8. Tamizado de la materia prima.....	63
2.1.9. Límites de Atterberg.....	66
2.1.9.1. Limite plástico.....	67
2.1.9.2. Limite líquido.....	67
2.2 Flotación espumante del material.....	69
2.2.1. Densidad de la pulpa .....	69
2.2.2. Reactivos químicos utilizados.....	72
2.2.3. Preparación y dosificación de los reactivos químicos.....	73
2.2.3.1. Dosificación de reactivos en el ensayo 1 .....	73
2.2.3.2. Dosificación de reactivos en el ensayo 2 .....	75
2.2.3.3. Dosificación de reactivos en el ensayo 3 .....	75
2.2.3.4. Dosificación de reactivos en el ensayo 4 - 5 y 6.....	76
2.2.3.5. Dosificación de reactivos en el ensayo 7 – 8 y 9 .....	77
2.2.3.6. Parámetros de cada experimento .....	79
2.2.3.7 Procedimiento .....	81
2.2.3.8. Secado del material.....	85
CAPÍTULO 3.....	90
ANÁLISIS Y RESULTADOS .....	90
3.1 Análisis de resultados de quema de briquetas.....	90
3.1.1. Color.....	90
3.1.2. Contracción .....	92
3.1.3. Absorción .....	96
3.1.4. Resistencia a la flexión.....	101
CONCLUSIONES .....	109
RECOMENDACIONES.....	112

REFERENCIAS.....	114
ANEXOS .....	117

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Estructura cristalina y vítrea de silicatos.....	5
<b>Figura 2.</b> Clasificación de los materiales cerámicos en base a su aplicación .....	5
<b>Figura 3.</b> Clasificación de los materiales arcillosos .....	10
<b>Figura 4.</b> Iones de oxígeno en el plano X.....	15
<b>Figura 5.</b> Iones de oxígeno en el plano Y.....	15
<b>Figura 6.</b> Principales usos del caolín .....	19
<b>Figura 7.</b> Procesos aplicables para el blanqueamiento del caolín .....	29
<b>Figura 8.</b> Esquema de un Concentrador .....	32
<b>Figura 9.</b> <i>Partículas y burbujas</i> .....	38
<b>Figura 10.</b> Zonas específicas en proceso de flotación.....	44
<b>Figura 11.</b> <i>Celda mecánica Outokumpu</i> .....	44
<b>Figura 12.</b> <i>Celda neumática de columna</i> .....	45
<b>Figura 13.</b> <i>Celda de flotación Denver con sus respectivas partes</i> .....	46
<b>Figura 14.</b> <i>Celda de flotación Denver con sus respectivas partes</i> .....	47
<b>Figura 15.</b> <i>Maquinaria Humboldt</i> .....	47
<b>Figura 16.</b> <i>Horno tipo ascendente tipo mufla</i> .....	49
<b>Figura 17.</b> <i>Horno tipo descendente</i> .....	49
<b>Figura 18.</b> <i>Esquema de un horno a combustible sólido (madera)</i> .....	50
<b>Figura 19.</b> <i>Horno SAMO THERMAL marca TT</i> .....	53
<b>Figura 20.</b> <i>Equipo de difracción de rayos X (DRX) Bruker D8 ADVANCE</i> .....	55
<b>Figura 21.</b> <i>Muestra del caolín en su estado inicial</i> .....	56
<b>Figura 22.</b> <i>Secado del material dentro del horno</i> .....	57

<b>Figura 23.</b> <i>Molino de bolas de cerámica utilizado en el proceso de molienda</i> .....	58
<b>Figura 24.</b> Muestra de caolín secado utilizada durante el análisis visual de textura y color .....	59
<b>Figura 25.</b> <i>pH inicial de la muestra de caolín</i> .....	60
<b>Figura 26.</b> Ensayo de determinación de densidad mediante el método de probeta después de 24 horas de sedimentación.....	61
<b>Figura 27.</b> Ensayo de determinación de densidad mediante el método del picnómetro .....	62
<b>Figura 28.</b> Conjunto de tamices normalizados utilizados en la máquina Ro-Top.....	64
<b>Figura 29.</b> <i>Curva granulométrica del material de caolín por el método de Rosin Rammler</i> .....	66
<b>Figura 30.</b> Limite Líquido .....	68
<b>Figura 31.</b> Preparación del material de caolín a distintas fracciones de sólidos empleadas en la elaboración de pulpas para los ensayos de flotación. ....	81
<b>Figura 32.</b> <i>Incorporación de la muestra de caolín y agua en la celda de flotación para la preparación de la pulpa.</i> ....	82
<b>Figura 33.</b> <i>Ajuste del pH con caolín</i> .....	83
<b>Figura 34.</b> <i>Adición del colector mediante un gotero</i> .....	83
<b>Figura 35.</b> <i>Adición del espumante por medio de gotero</i> .....	84
<b>Figura 36.</b> <i>Recolección de la espuma con los óxidos de hierro</i> .....	85
<b>Figura 37.</b> <i>Secado del material flotado</i> .....	86
<b>Figura 38.</b> <i>Molde para la elaboración de briqueta</i> .....	88
<b>Figura 39.</b> <i>Briquetas sinterizadas con sus respectivos</i> .....	89
<b>Figura 40.</b> <i>Color de las Briquetas</i> .....	92
<b>Figura 41.</b> Contracción post-quema de las briquetas obtenidas a una fracción de sólidos al 15 % .....	93
<b>Figura 42.</b> Contracción post-quema de las briquetas obtenidas a una fracción de sólidos al 25 % .....	93
<b>Figura 43.</b> Contracción post-quema de las briquetas obtenidas a una fracción de sólidos al 35 % .....	94

<b>Figura 44.</b> <i>Contracción post-quema de las briquetas del material sin tratar y concentrado de flotación</i> .....	94
<b>Figura 45.</b> <i>Absorción de agua de las briquetas obtenidas a una fracción de sólidos al 15 %</i> .....	98
<b>Figura 46.</b> <i>Absorción de agua de las briquetas obtenidas a una fracción de sólidos all 25 %</i> .....	98
<b>Figura 47.</b> <i>Absorción de agua de las briquetas obtenidas a una fracción de sólidos al 35 %</i> .....	99
<b>Figura 48.</b> <i>Absorción de agua de las briquetas del material sin tratar y concentrado de flotación</i> .....	100
<b>Figura 49.</b> <i>Comparación de absorción de agua entre el material sin tratar, los ensayos de flotación (C, J y A) con los mejores resultados y el concentrado de óxidos.</i> .....	100
<b>Figura 50.</b> <i>Resistencia a la flexión de las briquetas obtenidas para una fracción de sólidos al 15%</i> .....	104
<b>Figura 51.</b> <i>Resistencia a la flexión de las briquetas para una fracción de sólidos al 25 %</i> .....	105
<b>Figura 52.</b> <i>Resistencia a la flexión de las briquetas obtenidas para una fracción de sólidos al 35%</i> .....	105
<b>Figura 53.</b> <i>Resistencia a la flexión de las briquetas del material sin tratar y concentrado de flotación</i> .....	106
<b>Figura 54.</b> <i>Comparación de la resistencia a la flexión entre el material sin tratar, los ensayos de flotación (C, J y A) con los mejores resultados y el concentrado de óxidos.</i> .....	107

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> <i>Distribución de minerales arcillosos en el Ecuador</i> .....	11
<b>Tabla 2.</b> <i>Elementos del caolín</i> .....	13
<b>Tabla 3.</b> <i>Rocas utilizadas como materia prima cerámica</i> .....	26
<b>Tabla 4.</b> <i>Requisitos granulométricos, mineralógicos y composición química de los caolines para su uso en porcelana de mesa y sanitarios</i> .....	27
<b>Tabla 5.</b> <i>Minerales típicos que aportan el color a depósitos de caolín</i> .....	30
<b>Tabla 6.</b> <i>Índices metalúrgicos</i> .....	36

<b>Tabla 7.</b> Composición mineralógica de la muestra de caolín mediante DRX .....	55
<b>Tabla 8.</b> Resultado de densidad por el método de la probeta.....	61
<b>Tabla 9.</b> Resultado de densidad mediante picnómetro.....	63
<b>Tabla 10.</b> Valores correspondientes al análisis granulométrico del material de caolín .....	65
<b>Tabla 11.</b> Resultados del ensayo de límite plástico .....	67
<b>Tabla 12.</b> Resultados del ensayo de límite líquido.....	68
<b>Tabla 13.</b> Parámetros operativos de los ensayos de flotación a diferentes valores del pH con una fracción de sólidos al 15%.....	81
<b>Tabla 14.</b> Parámetros operativos de los ensayos de flotación a diferentes valores del pH con una fracción de sólidos al 25%.....	80
<b>Tabla 15.</b> Parámetros operativos de los ensayos de flotación a diferentes valores de) pH con una fracción de sólidos al 35%.....	81
<b>Tabla 16.</b> Color .....	91
<b>Tabla 17.</b> Resultados antes y después de la quema.....	93
<b>Tabla 18.</b> Resultados de la absorción de agua .....	97
<b>Tabla 19.</b> Resultados de la resistencia a la flexión .....	103

## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>Anexo A.</b> Resultados de análisis difracción de rayos X.....	117
<b>Anexo B.</b> Ensayo de límite líquido.....	118
<b>Anexo C.</b> Ensayo de límite plástico .....	119
<b>Anexo D.</b> Briquetas con sus respectivos códigos después de la quema .....	120
<b>Anexo E.</b> Ensayo de resistencia a la flexión.....	121
<b>Anexo F.</b> Ensayo de absorción de agua.....	122

## INTRODUCCIÓN

El caolín es un mineral arcilloso de gran importancia industrial, constituido principalmente por caolinita [ $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ], que desempeña un papel fundamental en múltiples sectores productivos, siendo la industria cerámica uno de los más relevantes. Su valor comercial se fundamenta en propiedades específicas como su elevada blancura, baja abrasividad, inercia química, refractariedad y comportamiento plástico en presencia de agua, características que lo hacen indispensable en la fabricación de productos cerámicos de alta calidad como porcelana, sanitarios, vajillas, revestimientos y materiales refractarios.

Sin embargo, la presencia de impurezas minerales, especialmente óxidos e hidróxidos de hierro como hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), goethita ( $\text{FeOOH}$ ) y magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), constituye uno de los principales factores limitantes para la aplicación del caolín en la industria cerámica. Estos compuestos férricos, aun en concentraciones mínimas, afectan significativamente la blancura del material, generando tonalidades que varían desde amarillo tenue hasta rojo intenso, dependiendo de su concentración, tamaño de partícula y distribución en la matriz mineral. Adicionalmente, la presencia de hierro compromete otras propiedades tecnológicas del caolín, como la resistencia mecánica, la densificación durante la sinterización y el comportamiento térmico de los productos finales.

El presente estudio tiene como objetivo evaluar la eficiencia del proceso de flotación espumante para la reducción de impurezas de óxidos de hierro en caolín, mediante el diseño y ejecución de ensayos experimentales que permitan establecer las condiciones mejoradas de operación. Para ello, se planteó un diseño factorial  $3 \times 3$  que evalúa el efecto del pH (4, 7 y 9) y la fracción de sólidos (15%, 25% y 35%) sobre la eficiencia del proceso, empleando xantato amílico de potasio (Z-6) como colector y espumante XF-250. La caracterización integral del material, tanto antes como después del proceso de flotación, incluyó análisis mineralógico mediante difracción de rayos X (DRX), caracterización física mediante límites

de Atterberg y análisis granulométrico, así como la evaluación de propiedades mecánicas del material sinterizado mediante la elaboración de briquetas.

La estructura del presente trabajo se organiza en tres capítulos principales. El Capítulo 1 presenta el marco teórico que fundamenta la investigación, abordando aspectos relacionados con los materiales cerámicos, las arcillas y el caolín, sus aplicaciones industriales, las impurezas presentes en los depósitos naturales, los fundamentos de la flotación espumante y los índices metalúrgicos empleados para evaluar la eficiencia del proceso. El Capítulo 2 describe detalladamente el proceso experimental desarrollado, incluyendo la caracterización inicial del material, la preparación de reactivos, el diseño de los ensayos de flotación y la elaboración de briquetas para la evaluación de las propiedades mecánicas del caolín purificado. Finalmente, el Capítulo 3 presenta el análisis y discusión de los resultados obtenidos, estableciendo las relaciones entre las variables operacionales del proceso y la calidad del material purificado.

Los resultados de esta investigación contribuyen al desarrollo de tecnologías de beneficio mineral aplicables a los yacimientos de caolín del Ecuador, proporcionando información técnica valiosa para la industria cerámica nacional y generando conocimiento científico que puede servir como base para futuras investigaciones orientadas al escalamiento del proceso a nivel industrial.

## CAPÍTULO 1

### MARCO TEÓRICO

#### 1.1 Materiales cerámicos

##### 1.1.1 Definición de materiales cerámicos

Tradicionalmente, el concepto de material cerámico se asociaba con cualquier pasta elaborada a base de materia terrosa que, gracias a su propiedad plástica, permitía moldear formas en estado húmedo. Tras el secado al aire y la cocción mediante fuego, el material perdía su plasticidad conservando la forma modelada (Morales, 2010).

En la actualidad, los materiales cerámicos desempeñan un rol fundamental en la ingeniería, ya que están presentes tanto en aplicaciones de uso cotidiano como en tecnologías avanzadas, tales como la impresión 3D, los implantes óseos y las prótesis dentales. No se limitan únicamente a elementos tradicionales como utensilios de cocina, recubrimientos o materiales para la construcción, sino que también forman parte de desarrollos modernos en áreas como la electrónica, la industria aeronáutica y el campo biomédico. Esta diversidad de aplicaciones evidencia que los materiales cerámicos no solo han evolucionado con el tiempo, sino que continúan siendo fundamentales para el avance tecnológico y científico.

Desde una perspectiva técnica, Askeland (2012) define los materiales cerámicos como compuestos químicos complejos formados por elementos metálicos y no metálicos. Un ejemplo representativo es la alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), material cerámico constituido por aluminio (Al), un metal, y oxígeno ( $\text{O}_2$ ), un no metal.

Asimismo, Callister (1995) destaca que los materiales cerámicos actúan como aislantes eléctricos y térmicos debido a sus excelentes propiedades mecánicas y fisicoquímicas. Además, al encontrarse en ambientes agresivos, caracterizados por altas temperaturas, atmósferas oxidantes o presencia de ácidos, presentan una resistencia superior a la de los metales y los polímeros.

### **1.1.2 Estructura de materiales cerámico**

Los materiales cerámicos se componen fundamentalmente de asociaciones entre elementos metálicos y no metálicos, enlazados a través de uniones iónicas y/o covalentes. La manera en que se distribuyen los átomos, iones o moléculas, junto con el tipo de fuerzas de enlace que actúan entre ellos, define la estructura interna del sólido. Por lo general, estas especies se organizan en el espacio conforme a un esquema tridimensional repetitivo, dando lugar a una red cristalina que presenta un orden estructural a largo alcance (Lefevre, 2014).

De acuerdo con Callister (1995) los materiales cerámicos pueden clasificarse estructuralmente en dos grandes categorías: cerámicos cristalinos y cerámicos no cristalinos (vítreos). Esta clasificación se basa en el grado de ordenamiento atómico presente en el material.

#### **1.1.2.1 Materiales cerámicos cristalinos**

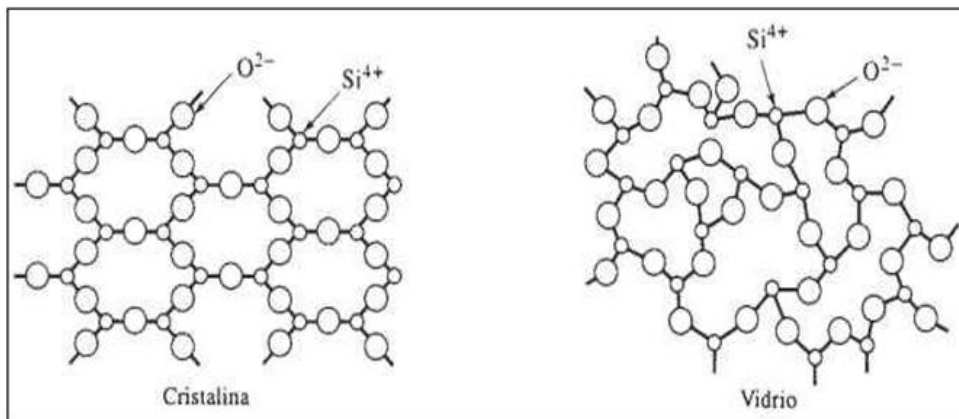
Según Callister (1995) en los materiales cerámicos cristalinos los átomos o iones se encuentran dispuestos en un arreglo tridimensional ordenado y repetitivo, formando una red cristalina con orden a largo alcance. Esta organización está determinada principalmente por dos factores fundamentales:

- La neutralidad eléctrica del sistema.
- La relación entre radios iónicos de cationes y aniones.

#### **1.1.2.2 Materiales cerámicos no cristalinos**

Los materiales no cristalinos, denominados vidrios, no presentan un ordenamiento atómico periódico a largo alcance. Según Callister (1995), estos materiales poseen una coordinación local definida, pero no existe una repetición estructural tridimensional extendida como en los cristales.

**Figura 1.** Estructura cristalina y vítrea de silicatos



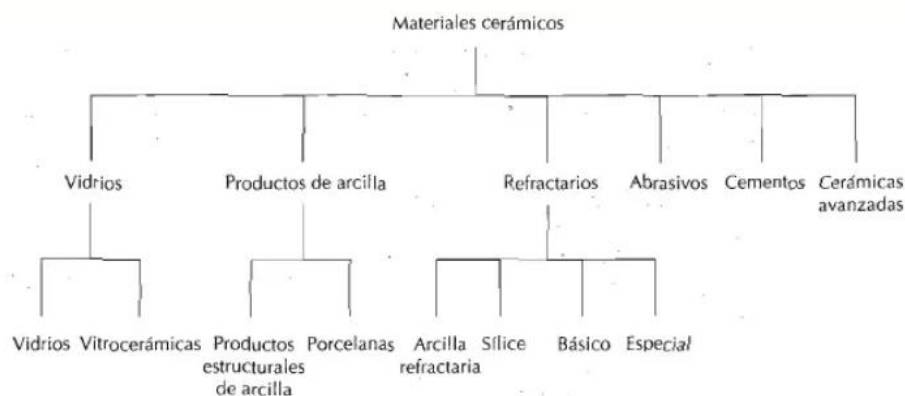
*Fuente:* Tomado de Callister (1995)

### 1.1.3 Clasificación de materiales cerámicos

Los materiales cerámicos se emplean en usos específicos y, en muchos casos, complementan a los materiales metálicos y polímeros en distintas aplicaciones tecnológicas (Callister, 1995).

De acuerdo con Callister (1995) los materiales cerámicos pueden agruparse según su campo de aplicación en varias categorías principales: vidrio, productos estructurales de arcilla, porcelanas, refractarios, abrasivos, cementos y cerámicas avanzadas. Esta clasificación permite organizar su estudio en función de sus características funcionales y tecnológicas.

**Figura 2.** Clasificación de los materiales cerámicos en base a su aplicación



*Fuente:* Tomado de Callister (1995)

#### **1.1.4 Propiedades mecánicas de materiales cerámicos**

Los materiales inorgánicos no metálicos, como la arcilla, el feldespato, el caolín y la bentonita, son frágiles o vidriosos y generalmente se fracturan en presencia de esfuerzos de tensión. Estos materiales manifiestan una elasticidad que puede ser baja, ya que tienden a ser porosos. Las propiedades mecánicas de un material determinan sus limitaciones en las aplicaciones estructurales, es decir, en aquellas donde el material debe soportar cargas.

Dentro de las propiedades mecánicas de los materiales cerámicos se pueden mencionar las siguientes:

##### **1.1.4.1 Módulo de elasticidad**

El módulo de elasticidad de un material se refiere a la capacidad para resistir deformaciones cuando se le aplica una carga (Bautista, 2020). Esta deformación implica un cambio en la disposición de los átomos dentro de la estructura del material, y su naturaleza depende en gran medida de la resistencia de los enlaces atómicos presentes. Algunas deformaciones son reversibles, lo que significa que cuando cesa la carga aplicada, los átomos vuelven a su posición original, restaurando así la forma original del material (Rocha, 2012).

Esta propiedad mecánica depende principalmente de la temperatura, reduciéndose de forma no lineal al elevarse la temperatura a la que está sometido el material. Los materiales cerámicos manifiestan deformaciones de tipo plástico. Sin embargo, debido a la rigidez presente en la estructura de los componentes cristalinos, la deformación se produce de forma lenta. En los materiales cerámicos vítreos (no cristalinos), la fluidez viscosa es la que ocasiona la deformación plástica; al igual que en los materiales cristalinos, esta deformación también ocurre de manera lenta (Vélez, 2008, como se citó en Solís y Amanda, 2021).

#### **1.1.4.2 Resistencia a la compresión**

La resistencia a la compresión de los materiales cerámicos puede verse afectada por diversos factores. Los materiales con porosidades, impurezas, grietas o alineamientos deficientes son más propensos a experimentar fallos bajo cargas de compresión. Además, el tamaño de grano también influye significativamente en esta resistencia: a menor tamaño de grano, mayor será la resistencia a la compresión (Rocha, 2012).

#### **1.1.4.3 Comportamiento refractario**

Los materiales cerámicos con comportamiento refractario son idóneos para ambientes de alta temperatura, ya que mantienen su integridad estructural sin fundirse ni reaccionar químicamente con otros materiales. Estos materiales son también excelentes aislantes térmicos, lo que les permite resistir condiciones extremas sin sufrir daños significativos. Su estructura única proporciona un excelente aislamiento térmico en aplicaciones de alta temperatura (Donoso, 2007).

#### **1.1.4.4 Termofluencia**

Los materiales cerámicos a elevadas temperaturas conservan sus propiedades mecánicas; a esta característica se le conoce como termofluencia. Los materiales cerámicos poseen una muy buena resistencia a la termofluencia, lo que los hace especialmente valiosos en aplicaciones que requieren estabilidad estructural bajo condiciones de alta temperatura (Vélez, 2008, como se citó en Solís y Amanda, 2021).

#### **1.1.4.5 Comportamiento eléctrico**

La mayoría de los tipos de materiales cerámicos no son conductores de electricidad, lo que les convierte en muy buenos aislantes eléctricos lo que significa que el calor no se transmite a través de ella (Vélez, 2008, como se citó en Solís y Amanda, 2021).

## **1.1.5 Propiedades fisicoquímico de materiales cerámicos**

### **1.1.5.1 Contracción**

Esta propiedad se manifiesta cuando el material cerámico se somete a secado y posteriormente a cocción. Durante este proceso, el material pasa por etapas de quemado, enfriamiento y solidificación, en las cuales las moléculas tienden a contraerse debido al cambio de su estado inicial líquido a un estado final sólido a temperatura ambiente (García, 2017).

### **1.1.5.2 Absorción**

La absorción mecánica del suelo se refiere a su capacidad para retener mecánicamente sustancias a través de sus poros. Las partículas suspendidas en una sustancia que atraviesa el perfil del suelo son retenidas y puestas en suspensión por estos poros. La intensidad de esta absorción depende de la porosidad del suelo, el tamaño de los poros y la dispersión del material, siendo los suelos arcillosos y limosos los más absorbentes mecánicamente en comparación con los suelos arenosos y limosos (Gueto, 2010).

### **1.1.5.3 Densidad**

La densidad se puede interpretar de varias maneras, ya que está determinada por el tamaño y peso de los elementos, así como por el empaquetamiento de la estructura. Según Rocha (2012) la densidad teórica puede ser calculada a partir de los datos de la estructura y los pesos atómicos, mientras que la densidad total se determina mediante la diferencia entre el peso del cuerpo en aire y el peso suspendido en agua, lo que permite calcular el volumen.

## 1.2 Definición de arcillas

Para comprender mejor la naturaleza de las arcillas utilizadas en la industria cerámica, es necesario acudir a definiciones ampliamente aceptadas en la literatura especializada. En este sentido, los minerales arcillosos se describen como hidrosilicatos de aluminio cuya fórmula general es  $n\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot m\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ , donde los valores de  $n$ ,  $m$  y  $x$  dependen de las condiciones de formación del mineral (Güeto, 2005, citado en Lema, 2018). Estos compuestos constituyen una parte significativa de la corteza terrestre externa y pueden clasificarse en arcillas plásticas y no plásticas. El conocimiento de sus propiedades y características resulta esencial para la formulación de pastas o barbotinas cerámicas, debido a su influencia en el comportamiento durante la preparación y el procesamiento.

Desde otra perspectiva, la arcilla es el producto de la descomposición de la roca madre debido a la acción de agentes de meteorización fisicoquímica. Estos materiales se pueden encontrar en acumulaciones naturales in situ, consolidadas o no consolidadas, y su tamaño de grano fino puede variar según la disciplina: menor a  $1 \mu\text{m}$  según químicos que estudian los coloides, menor a  $2 \mu\text{m}$  de acuerdo con mineralogistas e investigadores del suelo, y menor a  $4 \mu\text{m}$  conforme a sedimentólogos (Díaz y Torrecillas, 2002). Además, en algunas ocasiones conservan un comportamiento físico particular en contacto con el agua, denominado plasticidad, e incluso endurecen cuando son secadas o sometidas a tratamientos térmicos a alta temperatura. Los aspectos clave para su caracterización incluyen el tamaño del grano y la composición mineralógica.

### 1.2.1 Tipos de clasificación de arcillas

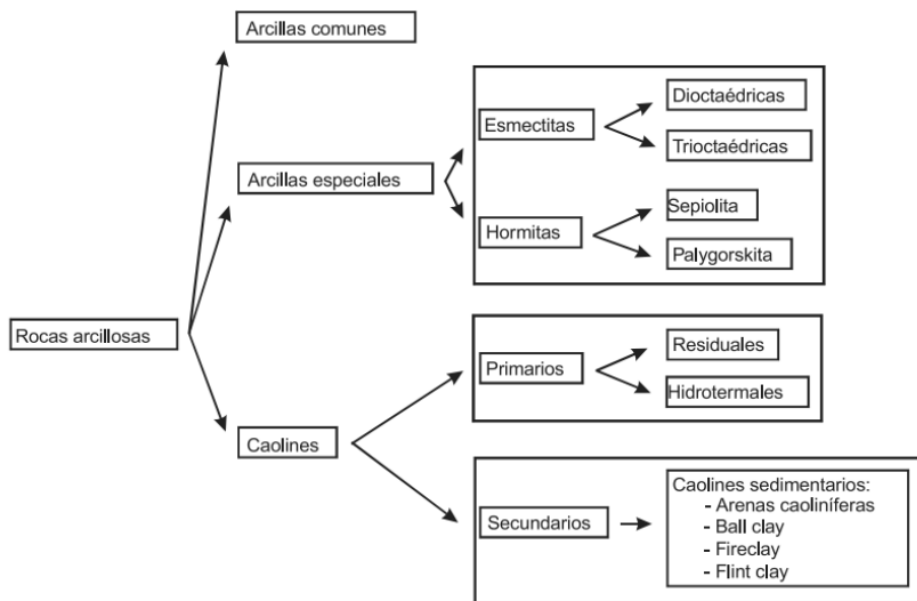
Desde el punto de vista petrográfico se observan varios parámetros los cuales son:

1. Mineralogía son ricas en caolinita.
2. Quimismo con alto contenido de alúmina.

3. Origen geológico de tipo sedimentario
4. Propiedades físicas como la plasticidad, reología
5. Utilización industrial en el sector refractario
6. Comportamiento geotécnico en ingeniería geológica

En la figura 3 se muestra un esquema general de clasificación de los materiales arcillosos de aplicación cerámica:

**Figura 3.** Clasificación de los materiales arcillosos



**Fuente:** Tomado de Díaz y Torrecillas (2002).

Así mismo, Díaz y Torrecillas (2002) mencionan que las arcillas pertenecen a un yacimiento mineral no metálico, por lo tanto, se debe tomar en cuenta la cantidad, calidad y disposición del yacimiento, ya que su uso cerámico puede ser mediante arcillas comunes y caolines que son la materia prima de los productos.

### 1.2.2 Minerales arcillosos en el Ecuador

En el Ecuador, los materiales arcillosos constituyen un componente relevante dentro de los recursos minerales no metálicos. Su disponibilidad ha permitido que sean ampliamente utilizados tanto en procesos industriales como en actividades artesanales. Diversos estudios

nacionales realizados a lo largo de los años han documentado su ubicación en el territorio y los distintos usos que se les da en la producción de bienes cerámicos y otros productos derivados.

Uribe et al. (2019) en su artículo concluyen que los minerales arcillosos comprenden aproximadamente el 20% del total de los minerales no metálicos valorados en el país, lo que evidencia su relevancia dentro del inventario nacional de recursos minerales. En las distintas provincias del Ecuador se emplean diversas clases de arcillas para la elaboración de productos cerámicos de consumo local y comercial, tales como ladrillos, tejas y otros componentes de construcción. Las arcillas caoliníticas, por ejemplo, se encuentran presentes en provincias como Azuay, Cañar y Carchi, donde se utilizan principalmente en la fabricación de cerámica plana, piezas artísticas, vajillas y materiales cerámicos de construcción. Otros tipos de arcillas como las impuras o esmectíticas son empleadas en la elaboración de materiales de obra, dependiendo de su composición y comportamiento durante el conformado y la cocción.

La siguiente tabla resume la presencia de minerales arcillosos en varias provincias del país, así como sus principales usos:

**Tabla 1.** *Distribución de minerales arcillosos en el Ecuador*

Provincia	Mineral arcilloso presente	Aplicación
Azuay	Arcillas caoliniticas y esmectiticas	Fabricación de cerámica plana, artística y de vajillas.
Bolívar	Arcillas caoliniticas y feldespatos	Elaboración de ladrillos
Cañar	Arcillas caoliniticas y feldespatos	Elaboración de ladrillos
Carchi	Arcillas caoliniticas y feldespatos	Fabricación de ladrillos y tejas
Cotopaxi	Pómez y lapilli	Figuras artesanales de barro y alfarería
Chimborazo	Ceniza volcánica con componentes feldespáticos y material amorfo	Elaboración de ladrillos
El Oro	Arcillas para la elaboración de ladrillos, gravas, caolín y feldespato	Elaboración de ladrillos y cerámica fina.
Esmeraldas	Arcillas caoliniticas y feldespatos	Elaboración de ladrillos
Guayas	Piedra caliza y arcilla	Elaboración de ladrillos
Imbabura	Piedra caliza	Elaboración de cemento
Loja	Arcilla para ladrilleras y arenas	Elaboración de ladrillos
Los Ríos	No existe	No existe
Manabí	Arcilla de quema blanca importada y arcillas de la zona	Figuras artesanales
Morona Santiago	Arcillas caoliniticas	Fabricación de ladrillos y tejas
Napo	Piedra caliza, arcillas, carbonato de calcio, yeso, bentonita, diatomita y caolín	No existe
Pastaza	Sílice, caolín, arcillas y calizas	No existe
Pichincha	Arcillas, limos y lutitas	Fabricación de ladrillos y tejas
Tungurahua	Arcillas caoliniticas y feldespatos	Fabricación de ladrillos
Zamora Chinchipe	Arena silicea y feldespato	Fabricación de cerámica roja

**Fuente:** Tomado de Lema (2018)

### 1.3 Generalidades el caolín

El caolín se define como toda roca masiva con porcentaje variable de minerales de arcilla de composición igual o similar a la del mineral caolinita  $Al_2Si_2O_5(OH)_4$  que sean fáciles de concentrar por separación de los minerales restantes tales como: cuarzo, sulfuros, feldespatos, micas, clorita, biotita, moscovita, illita y óxidos de hierro, carbonatos etc. (Bartolomé, 1997).

Mientras tanto, Mata (2010) menciona que, el caolín es una arcilla blanca constituida por caolinita, halloysita o diquita formadas por el metamorfismo de feldespatos que puede ser de tipo meteorizado o hidrotermal.

La composición química de la arcilla normalmente se da en función de los óxidos de varios elementos. El caolín aparte de la caolinita está conformado por otros elementos como:

aluminio, cobre, silicio, titanio, hidrógeno y oxígeno que pueden presentarse en formas complicadas y a veces desconocidas.

A continuación, se detalla una tabla que indica los minerales y elementos que conforman el caolín:

**Tabla 2.** *Elementos del caolín*

<b>Elemento</b>	<b>Forma de Presentación</b>
Silicio	Sílice - $\text{SiO}_2$
Aluminio	Alúmina - $\text{Al}_2\text{O}_3$
Hierro	Óxido de Hierro - $\text{Fe}_2\text{O}_3$
Titanio	Dióxido de Titanio - $\text{TiO}_2$
Calcio	Cal - $\text{CaO}$
Magnesio	Magnesia – $\text{MgO}$
Potasio	Óxido de Potasio - $\text{K}_2\text{O}$
Sodio	Óxido de Sodio - $\text{Na}_2\text{O}$
Magnesio	Óxido de Magnesio - $\text{MnO}$
Cobre	Óxido de Cobre - $\text{CuO}$
Hidrógeno-Oxígeno	Agua - $\text{H}_2\text{O}$
Sulfuro	Trióxido de Azufre - $\text{SO}_3$
Carbón	Dióxido de Carbono - $\text{CO}_2$

*Fuente.* Elaboración propia con datos tomados de Mata (2010)

De acuerdo con Torres (2022) la explotación del caolín comúnmente es realizado a cielo abierto. Su extracción es sencilla y económicamente rentable si el depósito es de tipo sedimentario. El uso de este es principalmente en la industria cerámica, por sus propiedades como: color, ausencia de toxicidad, partículas de tamaño fino, etc.

El caolín, tal y como se obtiene en una explotación minera poseen un contenido variable de caolinita y/o haloisita, que la mayoría de las veces no llega al 20% y dependiendo de su formación también puede estar constituida por minerales como el cuarzo, feldespatos y micas. Debido a que, las aplicaciones se basan en la pureza de esta materia prima, por lo que esta se somete a diferentes procesos mineralógicos logrando incrementar el contenido de filosilicatos hasta un rango superior al 80%. El producto que se obtiene recibe el nombre de “Caolín lavado”. Se menciona también que un caolín de alta calidad deberá presentar un tamaño promedio a 20  $\mu\text{m}$  (Bartolomé, 1997).

### **1.3.1 Propiedades físicas del caolín**

Según investigaciones de Murray (2007) los caolines presentan las siguientes propiedades:

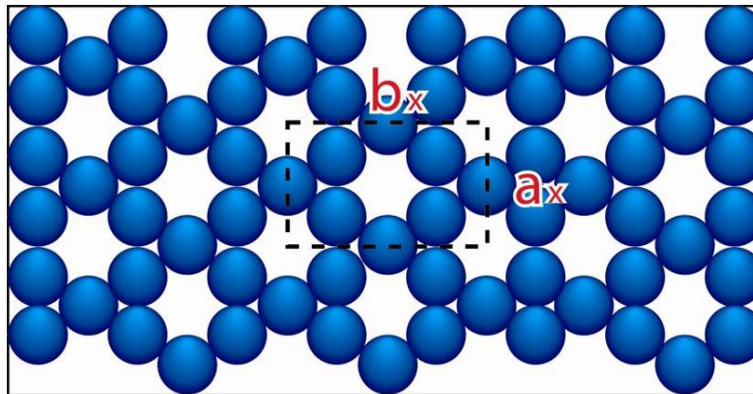
- Partículas con forma de pseudo-hexagonal definidas.
- Presentan cristales largos con forma vermicular.
- Área superficial baja (8-15  $\text{m}^2/\text{g}$ ).
- No es tóxico ni abrasivo.
- En la escala de Mohs su dureza es de 2
- Raya blanca.
- Su punto de fusión es aproximadamente 1850 °C.
- Es inodoro y moldeable fácilmente con el agua.
- Presenta un brillo terroso mate.
- Tiene un rango de pH amplio que varía de 4 a 9.
- Es aislante eléctrico y resiste a altas temperaturas.
- Es un material hidrófilo (atrae el agua).

### 1.3.2 Composición y estructura cristalina del caolín

Los minerales arcillosos pertenecen a los filosilicatos y pueden estar hidratados en mayor o menor medida. Su estructura se basa principalmente en una disposición de tetraedros de sílice y octaedros que contienen aluminio y/o magnesio. Estos tetraedros y octaedros, formados por la superposición de tres planos aniónicos paralelos, poseen iones oxígeno y agrupamientos de iones OH<sup>-</sup>. Los planos, identificados como X, Y y Z, corresponden a diferentes posiciones que pueden visualizarse en diversas figuras, donde cada uno se distingue también por su representación de color (Mata, 2010).

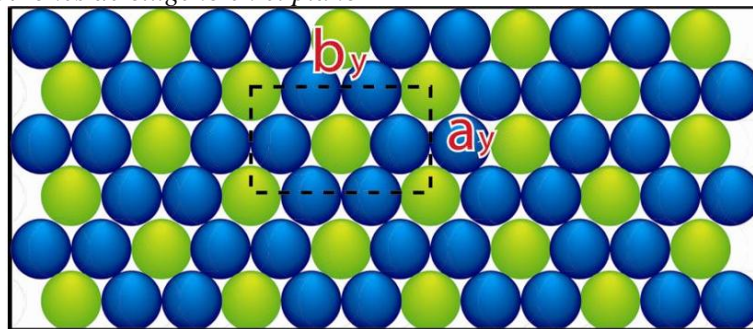
En la figura 4 se presenta los iones de oxígeno en el plano “X” y en la figura 5 los iones de hidrógeno en el plano “Y”.

**Figura 4.** Iones de oxígeno en el plano X



*Fuente:* Tomado de Muñoz (2010)

**Figura 5.** Iones de oxígeno en el plano Y



*Fuente:* Tomado de Muñoz (2010)

## 1.4 Genesis y clasificación de minerales de caolín

El origen de los minerales de caolín depende de una litología favorable y de condiciones ambientales que faciliten la transformación de silicatos ricos en aluminio, los cuales son producto de la descomposición de rocas feldespáticas y micas presentes en pegmatitas y esquistos micáceos, acompañados de otros minerales como la illita, la esmectita y la montmorillonita. Las concentraciones explotables de caolín se forman bajo condiciones de meteorización en climas templados y húmedos, a partir de rocas como granitos, gneises, vulcanitas ácidas, areniscas, pizarras alumínicas, arcosas y micasquistos (Bartolomé, 1997).

Según Bartolomé (1997), los yacimientos de caolín se clasifican en dos tipos principales:

- Caolines primarios originados directamente a partir de la roca madre, conservando gran parte de sus rasgos texturales y estructurales. Se forman por la alteración de la roca a través de procesos volcánicos, hidrotermales o por meteorización.
- Caolines secundarios de origen sedimentarios se forman por acumulaciones de material transportado por el agua, posteriormente depositado, y formando nuevos yacimientos.

### 1.4.1 Caolines primarios

Formados en yacimientos que producen por la alteración “in situ” de otros minerales como feldespatos u otros silicatos alumínicos a caolinita. Dentro de estos se mencionan varios caolines que pueden ser:

- Caolines residuales:

Son rocas meteorizadas sobre la superficie topográfica que fueron formadas en antiguos ciclos de erosión y han quedado sellados por formaciones geológicas más recientes. Bartolomé (1997) explica que la meteorización es un fenómeno que siempre se da, pero con

mayor frecuencia en climas tropicales y húmedos. También menciona que las regiones ecuatoriales son las zonas con mayor grado de descomposición de feldespatos y otros silicatos aluminicos en rocas graníticas y metamórficas. En algunos casos, también las arcillas o esquistos se transforman rápidamente en una mezcla de caolinita y cuarzo.

- Caolines hidrotermales:

Los caolines hidrotermales son aquellos que se encuentran comúnmente en rocas ígneas ácidas y metamórficas. Se forman por la circulación de fluidos calientes a través de fisuras o estructuras geológicas del terreno, o bien por el calor generado durante el lento enfriamiento de masas graníticas intrusivas sobre los materiales suprayacentes. En particular, las rocas graníticas con micas no biotíticas son las más propicias para los procesos de caolinización hidrotermal. Estos minerales son muy valorados como materiales para cargas y en la producción de cerámica blanca (Díaz & Torrecillas, 2002).

#### 1.4.2 Caolines secundarios

La diagénesis desempeña un rol relevante en la formación de ciertos caolines secundarios. Por ejemplo, las arenas con contenidos caoliníticos pueden originarse por la alteración “in situ” de feldespatos presentes en arenas arcósicas cuando circulan aguas superficiales. La meteorización, sobre todo en regiones tropicales, también influye al transformar arcillas de baja calidad en depósitos de caolín que sean útiles, aunque a veces dichos depósitos presentan tanto origen primario como secundario (Bartolomé, 1997).

Los caolines secundarios se dividen en tres grupos importantes:

- Caolines sedimentarios:

Son originados por la erosión y aporte de materiales de distintos orígenes transportados a las cuencas sedimentarias, además por mecanismos de precipitación como la autogénesis o alteración diagénesis.

- **Arcillas caoliníferas:**

**Ball-clays:** mezcla de tamaño de grano muy fino de 70% de caolinita, micas, cuarzo, clorita y materia orgánica, presenta propiedades importantes como su brillo por procesos de calcinación, son altamente plásticas, su color natural puede ser oscuro. Estas son resultado de la transportación a depósitos de lagos o en zonas de desbordamiento de ríos asociados con lignitos (Díaz & Torrecillas, 2002).

**Fire-clays o conocidas como arcillas refractarias** presentan caolinita e impurezas de otros minerales arcillosos, micas, cuarzo, pirita y materia orgánica, su coloración es de tono gris. Son el resultado de la alteración de arcillas ball-clays por el aumento de la profundidad y un mayor enterramiento que provoca litificación lo que hace que se forme un material no plástico. Algunas presentan cantidades notorias de hierro y titanio que hace que no sean rentables para su explotación por carencia de brillo (Bartolomé, 1997).

**Flint-clays o conocidas como caolín pétreo** están constituidos principalmente por caolinita, con bajos contenidos de hierro y otros componentes. Son rocas duras, no plásticas, masivas y con fractura coloidea, de alto nivel refractario, y cuando se somete a procesos de calcinación son materiales resistentes y densos (Bartolomé, 1997).

- **Arenas caoliníticas:**

Son arenas que tienen un contenido menor al 20%, formadas por la alteración de feldespatos “in situ” de una arcosa por circulación de aguas superficiales, también pueden ser originados por la mezcla de caolín y arena (Bartolomé, 1997).

## 1.5 Principales usos del caolín

El caolín es una arcilla blanca compuesta principalmente por la mineral caolinita, caracterizada por su elevada blancura, ausencia de toxicidad, capacidad de dispersión en agua, baja agresividad y plasticidad en estado húmedo. Además, Bartolomé (1997) menciona

que los caolines presentan inercia frente a los agentes químicos, gran superficie específica, elevado poder cubriente, y alta refractariedad. Lo que les confiere una alta versatilidad industrial, y ha permitido su utilización en múltiples sectores productivos.

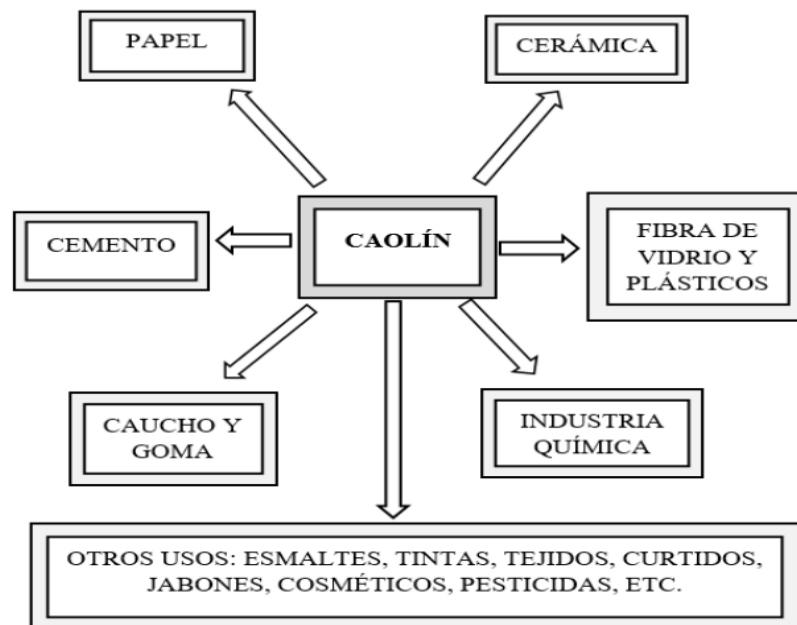
Elzea et al. (2009) describieron que los principales usos de caolín son los siguientes:

- En la industria de papel
- Elaboración de caucho, plástico, losetas, y productos de fibra de vidrio
- En la industria del cemento
- Industria de la cerámica
- Industria de la pintura
- Industria química

Y en menor porcentaje de este se usa en:

- Farmacéuticos
- Remediación Ambiental

**Figura 6.** Principales usos del caolín



*Fuente:* Tomado de Bartolomé (1997)

### **1.5.1 Industria del papel**

El caolín se utiliza ampliamente en la industria del papel debido a su capacidad para mejorar la calidad de impresión y proporcionar mayor blancura y suavidad a la superficie del papel. En este proceso, actúa como material de relleno al ocupar los espacios entre las fibras, lo que incrementa la opacidad y favorece la adecuada adherencia de la tinta. Además, se emplea como recubrimiento superficial, permitiendo obtener imágenes más nítidas y colores más intensos.

Las características que hacen valioso al caolín en esta industria incluyen su alto brillo, baja viscosidad, baja abrasividad, control en la distribución del tamaño de partícula y su superficie plana en forma de plaquetas hexagonales. Asimismo, sus propiedades reológicas influyen directamente en la textura, el peso del recubrimiento y la suavidad del papel (Murray, 1961, como se citó en Olvera y Hernández, 2014).

Bartolomé (1997) menciona que para conseguir dichas propiedades se elaboran dos tipos de arcillas con especificaciones muy estrictas, tales como: contener 90% de caolinita, al menos un 60% de partículas inferiores a 2  $\mu\text{m}$  y blancura superior al 82%.

### **1.5.2 Industria de plásticos, adhesivos y caucho**

En el sector del caucho, el caolín se emplea como insumo importante debido a que contribuye a incrementar la resistencia a la abrasión. Para este fin se prefieren caolines duros, ya que su granulometría fina mejora la durabilidad del caucho y, además, constituye una alternativa de bajo costo frente a otros pigmentos utilizados industrialmente. Asimismo, el caolín actúa como material de carga en distintos productos de goma y también puede intervenir como medio auxiliar en diversos procesos de filtración.

Tal como describe Bartolomé (1997) el caolín es fundamental en la producción de fibra de vidrio, puesto que sus propiedades lo convierten en un eficaz material aislante. En la

fabricación de plásticos, este mineral se incorpora como relleno, como agente de soporte en filtración y como recubrimiento en conductos o elementos plásticos como tejas. Su presencia mejora la suavidad del material, aumenta su estabilidad dimensional y favorece la resistencia al ataque químico, además de optimizar el comportamiento mecánico, térmico y eléctrico de los polímeros. Para industrias como la de resinas y polietileno, suele utilizarse caolín calcinado con el fin de mejorar la capacidad de absorción del material. Finalmente, también se utiliza en la elaboración de cables y en la fabricación de discos fonográficos.

### **1.5.3 Industria de la pintura**

Como indica Murray (2007, citado por Olvera y Hernández, 2014) el caolín es un componente importante en la industria de las pinturas, especialmente como extensor de pigmentos. Cada año se emplean cientos de miles de toneladas a nivel mundial para modificar el brillo, la fluidez y las propiedades de la película de pintura. Su uso principal es en recubrimientos de látex para interiores a base de agua, aunque también se aplica en primers industriales a base de aceite. El caolín contribuye a mejorar la retención del esmalte, aumentando la calidad del acabado.

### **1.5.4 Industria farmacéutica**

En la industria farmacéutica, el caolín desempeña un papel fundamental debido a sus propiedades químicas y físicas únicas. Su naturaleza químicamente inerte y libre de bacterias lo convierte en un material valioso para la elaboración de medicamentos (Medinaceli, 2016).

El caolín se utiliza principalmente como excipiente farmacéutico, es decir, como sustancia no activa que se emplea para dar forma, estructura y consistencia a los productos. Su principal función es actuar como vehículo o diluyente, mejorando la manipulación y el almacenamiento de las sustancias activas. Su pureza y su capacidad para no interferir con las

propiedades de los principios activos lo hacen especialmente útil en la fabricación de tabletas, cápsulas y polvos orales (Bartolomé, 1997).

Además, el caolín se emplea en la fabricación de suspensiones líquidas, ya que tiene la capacidad de estabilizar las fórmulas y evitar que los componentes sólidos se depositen, garantizando una distribución uniforme de los ingredientes activos. Esto es esencial en medicamentos que deben ser administrados en dosis precisas, como jarabes y preparaciones pediátricas (Olvera & Hernández, 2014).

Desde el punto de vista terapéutico, el caolín actúa como agente adsorbente gastrointestinal, siendo utilizado en el tratamiento de trastornos digestivos, especialmente en casos de diarrea. Su capacidad de absorción le permite retener agua, bacterias y virus presentes en el tracto digestivo, ayudando a regularizar la consistencia de las heces. Asimismo, el caolín se emplea en el tratamiento de úlceras pépticas debido a su resistencia a los ácidos y sus propiedades adhesivas, al neutralizar el ácido gástrico y adsorber sustancias nocivas en la superficie de la mucosa gástrica (Abarca, 2011).

En formulaciones tópicas y dermatológicas, el caolín de alta pureza ofrece propiedades adsorbentes mejoradas, textura suave y no abrasiva, y compatibilidad con otros ingredientes activos. También se utiliza como materia prima para apósitos y desecantes en el tratamiento de heridas y quemaduras, promoviendo la cicatrización y reduciendo el riesgo de infección (Abarca, 2011).

### **1.5.5 Industria Química**

El caolín se emplea en la fabricación de diversos productos como el sulfato de aluminio, la alúmina y el alumbre. También se utiliza en la producción de catalizadores y materiales absorbentes, en el acabado de textiles, en la elaboración de jabones, recubrimientos y procesos de curtiduría. Además, tiene aplicaciones en productos de asbesto,

en la fabricación de ruedas abrasivas, como agente aglutinante en fundiciones y en la soldadura de recubrimientos para varillas (QuimiNet, 2012).

#### **1.5.6 Industria de la cerámica**

Se utiliza en la fabricación de diversos productos cerámicos, como sanitarios, comedores, porcelana eléctrica, tejas de alto grado, vajillas, objetos de baño y refractarios. También se utiliza en la fabricación de cajas de arcilla refractaria para cocer alfarería fina, donde su resistencia a altas temperaturas es crucial para el proceso de cocción (Medinaceli, 2016).

#### **1.5.7 Industria del cemento**

En la industria del cemento, el caolín y sus derivados son utilizados como componente de materias primas para la fabricación de cementos especiales, como el cemento blanco, debido a que aporta sílice y óxidos de aluminio al crudo del cemento, lo cual es fundamental en la composición química de estos productos (Díaz, Guillén, Moisés, Martínez, & Moraño, 2011).

#### **1.5.8 Remediación ambiental**

El caolín ha sido investigado como material para la remediación ambiental por su alta superficie específica y estructura laminar favorecen la adsorción de contaminantes como metales pesados en aguas residuales y su uso como soporte en procesos fotocatalíticos para degradar compuestos orgánicos persistentes. Esta versatilidad permite considerar al caolín como un adsorbente natural de bajo costo y un componente prometedor en tecnologías de tratamiento ambiental (Chen et al., 2023).

## 1.6 El caolín en la industria cerámica

El caolín constituye una de las materias primas más importantes para la cerámica tradicional debido a su elevada pureza mineralógica y su composición dominada por minerales del grupo de la caolinita. Aquellos productos se obtienen principalmente de materiales naturales que pueden clasificarse en plásticos y no plásticos. Los materiales plásticos corresponden fundamentalmente a diversas arcillas, mientras que los no plásticos actúan como desgrasantes, que disminuyen la plasticidad y mejoran el secado, o como fundentes, que favorecen la cocción a temperaturas menores y contribuyen a la formación de nuevas fases mineralógicas durante el proceso térmico.

Dentro de este grupo tradicional se incluyen materiales como la cerámica estructural (ladrillos, tejas, bovedillas, clinkers, etc.), la loza, la porcelana doméstica y artística, la cerámica sanitaria, los pavimentos y revestimientos, así como los esmaltes, fritas y productos refractarios (Aparicio & Galán, 2006).

Según Bartolomé (1997) en diversos métodos de elaboración cerámica como el conformado plástico, el colado o el prensado en seco se emplean arcillas caoliníferas como materia prima principal. En el caso de la porcelana, el caolín puede representar hasta un 60% de la mezcla, mientras que en productos como gres, loza sanitaria, porcelana eléctrica o azulejos de pasta blanca suele estar presente alrededor del 25%.

Al igual el autor destaca que, en aplicaciones porcelánicas, el caolín aporta cualidades esenciales, entre ellas un alto nivel de blancura, impermeabilidad, dureza y resistencia frente a agentes químicos. También contribuye a la transparencia y a una adecuada plasticidad para facilitar el proceso de moldeo. De igual manera, este mineral soporta temperaturas superiores a 1200 °C y proporciona una elevada resistencia mecánica antes y después de la cocción.

### **1.6.1 Cerámica roja**

De acuerdo con Aparicio y Galán (2006) los productos cerámicos de coloración rojiza se emplean principalmente en la construcción, incluyendo ladrillos, bovedillas, viguetas, pavimentos, tuberías y distintos artículos de alfarería. Cuando estas piezas reciben un recubrimiento vítreo, pueden utilizarse como elementos decorativos o como revestimientos y pavimentos, como es el caso de los azulejos y el gres cerámico.

Las materias primas empleadas para su elaboración corresponden a arcillas comunes, margas y pizarras. Desde el enfoque industrial, estas arcillas conforman masas plásticas de tonalidad oscura, moldeables y con puntos de vitrificación inferiores a 1100 °C. Se caracterizan por su amplia distribución geográfica, diversidad composicional y bajo costo. Para ser explotables comercialmente, los yacimientos deben cumplir ciertos criterios como accesibilidad, facilidad de extracción, disponibilidad de grandes reservas y proximidad a los centros de consumo.

Las arcillas comunes poseen una composición heterogénea en la que predominan minerales arcillosos como esmectitas, illitas y cloritas, acompañados de cuarzo y carbonatos; en menores proporciones puede aparecer caolinita, feldespatos y óxidos de hierro.

### **1.6.2 Cerámica blanca**

Galán y Aparicio (2006) explican que la cerámica blanca se elabora principalmente a partir de arcillas caoliníferas y caolines, materiales que contienen una elevada proporción de minerales del grupo del caolín. Las arcillas caoliníferas, de origen sedimentario o residual, superan el 50% de minerales caoliníticos y, debido a su predominante fracción fina ( $<2 \mu\text{m}$ ), se comportan estrictamente como arcillas.

Este tamaño extremadamente pequeño no permite su enriquecimiento convencional, por lo que suelen utilizarse directamente o después de una simple molienda o tamizado.

Su aporte en las pastas para productos como sanitarios, porcelana artística y de mesa, porcelana electrotécnica, pavimentos, revestimientos y gres puede variar entre el 10% y el 40%, combinándose con cuarzo (20–30%) y feldespatos (hasta 30%). Su valor radica en la blancura y transparencia que otorga al producto final, así como en su excelente plasticidad, lo que facilita los procesos de conformado. Además, las cerámicas basadas en caolín presentan alta resistencia a la cocción ( $>1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), y resultan piezas densas, impermeables, muy duras, blancas y resistentes al ataque químico. Por ello, también se mezcla con otras arcillas caoliníferas para reforzar el color o mejorar el comportamiento en el moldeo de diversos productos cerámicos.

### **1.6.3 Cerámica refractaria**

Los productos refractarios más comunes son los ladrillos refractarios, pero también son cerámicas refractarias ciertos componentes de los cohetes, reactores, automóviles y material de laboratorio. La fabricación de estos materiales requiere procesos de cocción a temperaturas muy elevadas, cercanas a los  $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Para este tipo de refractarios se utilizan principalmente caolines de origen sedimentario o residual, los cuales suelen presentar una plasticidad moderada, una resistencia mecánica limitada en estado crudo y una notable contracción durante la cocción. Por lo general, se trata de caolines considerados de calidad media a baja, debido a la presencia de impurezas como óxidos de hierro, titanio y álcalis, elementos que originan cuerpos cerámicos de alta densidad (Aparicio & Galán, 2006).

**Tabla 3.** *Rocas utilizadas como materia prima cerámica*

Nombre de la roca	Mineralogía esencial	Fórmula mineral
Caolín	Caolinita y metahalloysita Halloysita Feldespato. Cuarzo Illita (mica degradada y de tamaño pequeño)	$Al_2Si_2O_7(OH)_2$ $Al_2Si_2O_7(OH)_2 \cdot 4H_2O$
Arcilla refractaria	Caolinita, cuarzo, illita	
Bauxita	Gibbsita Diásporo Bohemita Cuarzo, caolinita, óxidos de Fe	$Al(OH)_3$ $\alpha-AlO(OH)$ $\gamma-AlO(OH)$
Granito	Cuarzo, feldespatos Moscovita Biotita	$KAl_2Si_2AlO_{10}(OH)_2$ $K(Al,Mg,Fe)_3Si_3AlO_{10}(OH,F)_2$
Pizarra	Cuarzo, feldespatos, illita Clorita	$(Mg,Fe,Al)_6(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$
Caliza	Calcita, aragonito	$CaCO_3$
Dolomía	Dolomita	$(Ca,Mg)(CO_3)_2$
Serpentina	Crisotilo y antigorita	$Mg_6Si_4O_{10}(OH)_8$
Arenisca, cuarcita	Cuarzo	
Arcillas cerámicas	Cuarzo, calcita, dolomita, caolinita, illita, clorita, vermiculita, óxidos de Fe, montmorillonita	$(Al,Mg,Fe)_2(Si,Al)_4(OH)_2O_{10} \cdot X^{+}_{0,7} \cdot nH_2O$

Fuente: Tomado de Aparicio y Galán (2006)

**Tabla 4.** Requisitos granulométricos, mineralógicos y composición química de los caolines para su uso en porcelana de mesa y sanitarios

Uso	Granulometría	Mineralogía	Composición química
Porcelana de mesa	100% <63µm	Caolinita >80% Cuarzo ~ 5% Illita + esmectita + feldespatos <3%	SiO <sub>2</sub> <50% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> >34% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <0,5% TiO <sub>2</sub> <0,1% CaO <3% K <sub>2</sub> O + Na <sub>2</sub> O <3% P.C. >10%
Sanitarios	>53µm: 0,1-0,05 % >10µm: 18-25% <2µm: 38-40%	Caolinita 80-85% Illita: 10-15% Feldespatos: 0-1% Cuarzo: 0-2%	SiO <sub>2</sub> : 46-48% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 37-38% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 0,7-0,8% TiO <sub>2</sub> : 0,06-0,07% MgO: 0,15-0,24% CaO: 0,08-0,10% K <sub>2</sub> O + Na <sub>2</sub> O: 1,5-2%

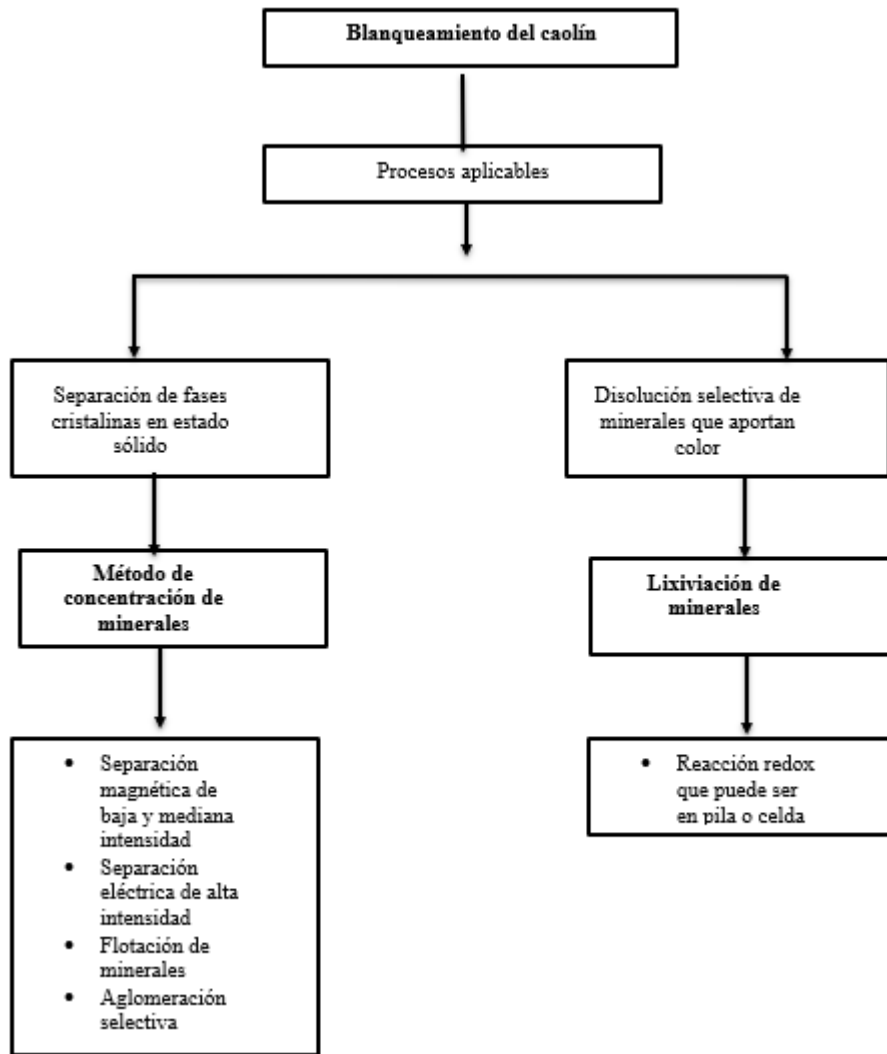
Fuente: Tomado de Aparicio y Galán (2006)

### **1.7 Impurezas presentes en los depósitos de caolín**

La calidad del caolín depende en gran medida de la presencia de impurezas, especialmente del hierro, ya que estos elementos son responsables de alterar su coloración y limitar su uso en aplicaciones que requieren alta blancura. El contenido de hierro suele ser el principal indicador para evaluar la pureza del mineral, puesto que suele encontrarse asociado a distintas especies minerales como hematita, magnetita, goethita, etc. (Bautista, 2020). Estos óxidos e hidróxidos reducen notablemente la blancura natural del caolín, generando tonalidades que varían desde beige hasta café o amarillento, dependiendo de su concentración.

Para reducir el contenido de hierro, la industria emplea diversas técnicas, entre ellas separación magnética de alta intensidad, flotación por espuma, floculación, biolixiviación y lixiviación química. Este último método permite remover eficazmente el hierro presente, aunque puede comprometer la estructura del mineral. La lixiviación consiste en tratar el caolín con ácidos que reducen los óxidos férricos, permitiendo aclarar o blanquear arcillas contaminadas (Muñoz, 2010).

**Figura 7.** Procesos aplicables para el blanqueamiento del caolín



*Fuente:* Elaboración propia, tomado de Muñoz (2010)

### 1.7.1 Alteración del color del caolín por la presencia de impurezas no deseadas

La blancura del caolín es buscada por las industrias, por lo general los objetos fabricados deben tener una norma en blancura y brillo, pero debido a ciertas impurezas que, aunque estén en proporciones muy pequeñas, especialmente de hierro, afectan en la calidad de sus productos. Saikia et al. (2003, como se citó en Torres, 2022) señalan que el hierro particularmente modifica el color del caolín a color amarillento y reduce su blancura.

Los cambios de coloración, especialmente hacia matices grisáceos, se relacionan con la presencia de minerales como la pirita o el carbonato ferroso. Asimismo, numerosos productos

cerámicos elaborados a partir de caolines, bauxitas o lateritas exhiben tonalidades amarillas o rojizas debido a minerales como la limonita o la hematita.

Algunos autores citados en Torres y Villizhañay (2022) mencionan que los óxidos e hidróxidos de hierro modifican significativamente la tonalidad del caolín y pueden clasificarse en tres tipos: amarillos, rojos y azules. Los óxidos férricos ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), ya sea en estado libre o hidratado, pueden producir desde un amarillo tenue hasta un rojo intenso, dependiendo de su concentración, tamaño de partícula y distribución en la matriz mineral. Por otro lado, los compuestos ferrosos, particularmente el óxido ferroso ( $\text{FeO}$ ), generan matices azulados o verdosos.

**Tabla 5.** *Minerales típicos que aportan el color a depósitos de caolín*

Mineral	Estructura
Anatasa	$\text{TiO}_2$
Goethita	$\text{FeO}(\text{OH})$
Hematita	$\text{Fe}_2\text{O}_3$
Ilmenita	$\text{FeTiO}_3$
Magnetita titanífera	$\text{Fe}_{3-x}\text{Ti}_x\text{O}_4$
Biotita	$\text{K}_2[\text{Mg,Fe}^{2+}]_{0-2}[\text{Si}_{6-5}\text{Al}_{2-3}\text{O}_{20}](\text{OH,F})_4$
Esmectita Ferrosa	$([\text{K}_{0.41}\text{Na}_{0.45}\text{Ca}_{0.14}](\text{Fe}_{1.32}\text{Al}_{1.61}\text{Ti}_{0.11}\text{Mg}_{0.33}\text{Si}_{2.21})(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2 \cdot 0.70\text{H}_2\text{O}$

*Fuente:* Tomado de Muñoz (2010)

## 1.8 Caracterización del hierro en materiales arcillosos

La caracterización del hierro en minerales arcillosos es un proceso fundamental para comprender cómo este elemento influye en el color, la estructura y el comportamiento de arcillas y caolines. En general, caracterizar el hierro implica identificar sus formas químicas, determinar su cantidad y analizar su efecto sobre las propiedades físicas del mineral.

En estudios realizados por Lema (2018) y Torres (2022) señala que la caracterización del hierro consiste primero en determinar qué compuestos férricos y ferrosos están presentes, tales como hematita, goethita, magnetita u óxidos o hidróxidos hidratados, todos ellos responsables de cambios significativos en la blancura del caolín, estos compuestos pueden

encontrarse como fases minerales independientes o como hierro coloidal fuertemente adsorbido a las partículas de caolinita, lo cual dificulta su remoción y aumenta la coloración amarillenta o rojiza del material.

Además, la caracterización implica cuantificar el contenido total de hierro y especificar su forma de ocurrencia, es decir, si aparece como parte de la estructura cristalina del mineral, como óxido libre o como recubrimiento superficial. Esta distinción es fundamental porque el hierro estructural puede modificar permanentemente la tonalidad del caolín, mientras que el hierro superficial suele ser más accesible a procesos de purificación como la lixiviación o la separación magnética (Lema, 2018).

Para llevar a cabo la caracterización se mencionan tres técnicas como difracción de rayos X (DRX), fluorescencia de rayos X (FRX) y análisis químicos por vía húmeda. Estas metodologías permiten identificar los minerales portadores de hierro, evaluar la microestructura y relacionar la presencia de impurezas con el índice de blancura y otras propiedades tecnológicas del caolín.

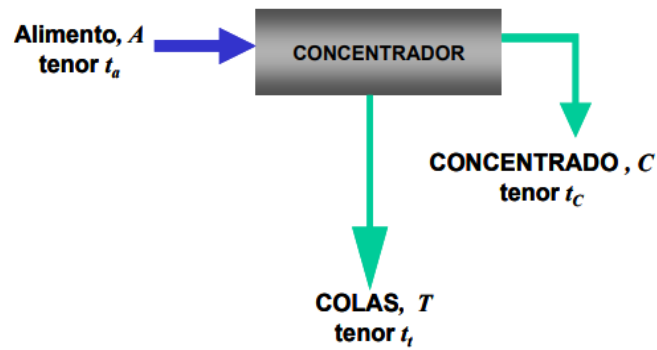
## **1.9 Índices metalúrgicos**

Son números adimensionales que procesan la cantidad de la separación realizada en una o varias etapas de concentración, y también proporcionan información para el escalamiento en el dimensionamiento de laboratorio y plantas de concentración (Bustamante et al. 2008).

Debe existir un balance tanto macroscópico como microscópico, en el primero existe un balance entre flujos masicos, es decir todo lo que entra debe ser igual a lo que sale, por lo que el alimento deber ser igual a la suma del concentrado y el relave; y en el segundo el mineral de interés que entra debe ser igual al mineral de interés que sale, es decir que el alimento multiplicado por el tenor del alimento es igual a la suma de concentrado por tenor

de concentrado más el relave por el tenor de relave (Bustamante et al. 2008).

**Figura 8.** Esquema de un Concentrador



*Fuente:* Tomado de Bustamante et al. (2008)

En las siguientes ecuaciones se muestra una relación entre los balances macroscópica y microscópicamente:

- Balance macroscópico:

$$\left[ \begin{array}{l} \text{Flujo másico de} \\ \text{mineral que entra} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{l} \text{Flujo másico de} \\ \text{mineral que sale} \end{array} \right]$$

$$A = C + T$$

Donde:

A = Alimento

C = Concentrado

T = Relave

- Balance microscópico:

$$\left[ \begin{array}{l} \text{Mineral de interés} \\ \text{que entra} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{l} \text{Mineral de interés} \\ \text{que sale} \end{array} \right]$$

$$A * t_a = C * t_c + T * t_t$$

Donde:

A = Alimento

$t_a$  = tenor de alimento

C = Concentrado

$t_c$  = tenor de concentrado

T = Relave

$t_t$  = tenor de relave

### 1.9.1 Clasificación de índices metalúrgicos

Los índices metalúrgicos se clasifican en dos tipos: índices que relacionan la calidad de concentración e índices que relacionan la capacidad el circuito de concentración.

#### 1.9.1.1 Índices que relacionan calidad

Son los que proporcionan información acerca de la calidad de los productos obtenidos, ya sea en la etapa de concentración o en la planta; Bustamante et al. (2008) enumera tres índices importantes los cuales son:

- **Recuperación:** Es la relación que existe en una operación de concentración entre el peso del material útil o de interés que hay en el concentrado con respecto a la cantidad del mismo mineral que está en el alimento (Bustamante et al. 2008).

$$R = \frac{\text{Peso del mineral de interés en el concentrado}}{\text{Peso del mineral de interés en el alimento}}$$

- **Razón de enriquecimiento:** Es la relación que existe entre el tenor de mineral útil en el concentrado respecto al tenor del mismo mineral en la alimentación (Bustamante et al., 2008).

$$RE = \frac{\text{tenor de concentrado}}{\text{tenor de alimento}}$$

Bustamante et al. (2008) menciona que el valor de la razón de enriquecimiento en un proceso de concentración debe ser superior a uno. En el caso de que se iguale a la unidad, no se produce concentración ya que el tenor del concentrado sería igual al tenor del alimento y no se cumplirá con el objetivo de esta operación unitaria. Y en el caso de que  $R_E$  sea mayor a uno, mejor será la concentración, es decir que se está enriqueciendo aún más el concentrado respecto al tenor de alimento.

- **Índice de selectividad:** Compara la calidad de separación entre dos especies A y B que se desea separar en el proceso de concentración. La fórmula se expresa de la siguiente manera:

$$I.S = \frac{t_a(A) \times t_t(B)}{t_a(B) \times t_t(A)}$$

Donde:

I.S = índice de selectividad

A = especie uno de mineral

B = especie dos de mineral

$t_a$  = tenor de alimento

$t_t$  = tenor de relave

### 1.9.1.2 Índices que relacionan capacidad

Estos índices nos ayudan a recopilar información necesaria para escalar, dimensionar y seleccionar los dispositivos o equipos adecuados de concentración (Bustamante et al., 2008).

- **Razón de concentración:** Relaciona el flujo masico de solidos de entrada, es decir en la alimentación con respecto al flujo másico de sólidos del concentrado (Bustamante et al., 2008).

$$RC = \frac{A}{C}$$

Donde:

RC = razón de concentración

A = alimento

C = concentrado

- **Rendimiento de concentración:** Es la relación entre el flujo másico en el concentrado respecto al flujo másico de sólidos en la alimentación, este índice es lo contrario de la razón de concentración (Bustamante et al., 2008).

$$V = \frac{C}{A} = \frac{1}{RC}$$

Donde:

V = rendimiento de concentración

A = alimento

C = concentrado

RC = razón de concentración

- **Eficiencia de separación:** Relaciona la recuperación del rendimiento de concentración con el rendimiento de concentración ideal (Bustamante et al. 2008).

$$E = \frac{R - V}{1 - V_{ideal}}$$

Donde:

E = eficiencia de separación

R = recuperación

V = rendimiento de concentración

$V_{ideal}$  = rendimiento de concentración ideal

### 1.9.2 Índices metalúrgicos ideales

Los índices metalúrgicos ideales representan una ventaja significativa, ya que permiten establecer objetivos claros para el proceso de separación y sirven como base para implementar estrategias de optimización y control en la etapa de concentración (Bustamante, Gaviria, & Restrepo, 2008).

A continuación, se presenta una tabla de expresiones de índices metalúrgicos en términos de tenores:

**Tabla 6.** Índices metalúrgicos

NOMBRE DEL INDICE METALÚRGICO	EXPRESIÓN DEL INDICE IDEALMENTE	INDICES EN TERMINOS DE TENORES
Recuperación: $R$	$R_{IDEAL} = 1.0$	$R = \frac{t_a - t_l}{t_c - t_l} \frac{t_c}{t_a}$
Razón de Enriquecimiento $R_E$	$R_{EIDEAL} = 1/t_a$	$R_E = \frac{t_c}{t_a}$
Índice de Selectividad $I.S.$	$I.S._{IDEAL} \rightarrow \infty$	$I.S. = \frac{t_a(A) * t_b(B)}{t_b(A) * t_a(B)}$
Razón de Concentración $RC$	$RC_{IDEAL} = 1/t_a$	$RC = \frac{t_c - t_l}{t_a - t_l}$
Rendimiento $V$	$V = t_a$	$V = \frac{t_a - t_l}{t_c - t_l}$
Eficiencia de separación $E$	$E = 1.0$	$E = \frac{(t_a - t_l)(t_c - t_a)}{t_a(t_c - t_l)(1 - t_a)}$

**Fuente:** Tomado Bustamante et al. (2008)

### **1.10 Flotación espumante**

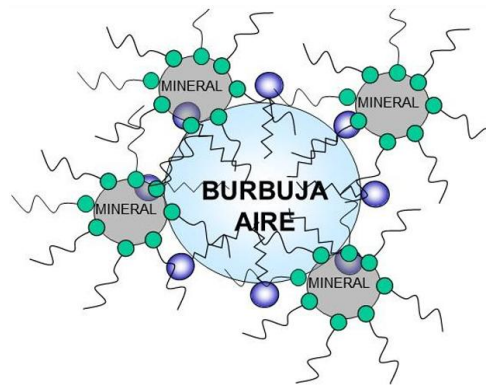
La definición tradicional de flotación como menciona Wokittel (1938) es un proceso fisicoquímico de separación de minerales y carbones el cual se basa en la capacidad de ciertos minerales, principalmente sulfuros, de adherirse a burbujas de aire y ascender en el medio acuoso bajo condiciones adecuadas, mientras que otros minerales principalmente la ganga, que no presenta esta propiedad permanece en el fondo.

De acuerdo con Naranjo (2012) la flotación se produce cuando la naturaleza hidrofóbica del mineral evita la adsorción de agua, facilitando la unión con burbujas y su ascenso mediante espuma. No obstante, en la mayoría de los casos, como ocurre con el oro, los minerales son hidrófilos.

Según App et al. (2004, como se citó en Luna, 2018) la adhesión de partículas sólidas con burbujas de aire durante el proceso de flotación ocurre gracias al encuentro de interfaces, donde la energía interfacial disminuye y permite la adhesión. Este fenómeno está influenciado por diferentes fuerzas, entre ellas hidrodinámicas, gravitacionales y de fricción, que intervienen cuando una partícula se aproxima a una burbuja.

Por otro lado, para generar la hidrofobicidad en las partículas minerales se utilizan reactivos de tipo tensoactivo, cuya función principal es reducir la tensión superficial en la interfase sólido-agua. De esta manera, se facilita la adhesión espontánea de burbujas de aire a las partículas, las cuales ascienden y forman una espuma estable que permite la posterior evacuación del material hacia la superficie (Bustamante, Gaviria, & Restrepo, 2008)

La figura 8 se muestra el complejo estable de partículas y burbujas, asistida con tensoactivos y colectores espumantes.

**Figura 9.** *Partículas y burbujas*

*Fuente:* Bustamante y Gaviria (2002, como se citó en Luna, 2018).

Así mismo, Bustamante y Gaviria (2002, como se citó en Luna, 2018) mencionan que para que ocurra la flotación las condiciones hidrodinámicas en la celda deben permitir la formación de una estructura estable partícula-burbuja para formar un complejo burbuja-partícula y ser transportada hacia la superficie.

Según Mata (2010) los sólidos finos, los liberados y el agua se preparan previamente en forma de pulpa con porcentajes variables de sólidos, normalmente no superiores al 40%. El autor indica que, al ingresar la pulpa al proceso, se inyecta aire para formar burbujas que actúan como centros a los cuales se adhieren las partículas sólidas.

Al igual menciona que para lograr una concentración efectiva, las especies minerales deben estar separadas o liberadas mediante la reducción de tamaño durante la molienda. La mayoría de los minerales obtiene una liberación adecuada al molerse hasta tamaños cercanos a 100 micrones (0.1 mm). El autor advierte que las partículas más grandes tienen menor probabilidad de adherirse a las burbujas, mientras que las demasiado pequeñas carecen del impulso necesario para un contacto eficiente (Torres, 2022).

De acuerdo con Mata (2010) en el presente estudio la materia prima sometida a flotación está compuesta por arcillas, es decir, partículas ultrafinas aproximadamente a 20  $\mu\text{m}$ . Por ello, el enfoque operativo del proceso de flotación difiere del utilizado para sulfuros,

y se realizará una flotación inversa, en la cual las impurezas (ganga o cola) se recogerán como el producto flotante.

### **1.10.1 Factores que interviene en la flotación**

Varios estudios señalan que los principales factores que influyen en una flotación convencional son:

- **Tamaño de partícula:**

Partículas menores a 20  $\mu\text{m}$  presentan problemas en la flotación, debido a su baja inercia y tienden a moverse con el fluido cuando se aproximan a una burbuja. Mientras que las partículas gruesas generan un mayor grado de liberación, menor tiempo de residencia, por ende, menor eficiencia de colección. Siendo el principal problema la ruptura entre burbujas-partícula debido a la turbulencia en la celda (Yianatos, 2005, como se citó en Luna, 2018).

- **Potencial de hidrógeno (pH):**

Pávez (2013) indica que, el pH es el factor de control que más se debe tomar en cuenta en el proceso de flotación, ya que tiene fundamental incidencia en la recuperación y selectividad, así como, en la depresión de minerales. Cuando se trata de flotación selectiva, el pH es sumamente sensible a la flotación. Los reactivos de flotación, principalmente los colectores, operan mejor en ciertos rangos de pH.

- **Aireación**

La aireación permitirá aumentar o retardar la flotación en beneficio de la recuperación o de la ley, respectivamente. El aire es uno de los tres elementos imprescindibles en el proceso de flotación, junto con el mineral y el agua (Naranjo, 2012).

Se debe tener mucha precaución en la cantidad de aire que se inyecta. Ya que, si se inyecta en exceso, se está haciendo una excesiva agitación, provocando que las espumas se revienten o salgan juntamente con la pulpa, rebalsando las celdas, llevándose consigo a la

ganga que no es necesaria. Y, cuando se usa poco aire, la columna de espumas es baja e insuficiente no pudiéndose recuperar los elementos valiosos, que se pierden en el relave general. (Jiménez y Elvis, 2017)

- **Tiempo de acondicionamiento**

La duración del acondicionamiento y el momento en que se añaden los reactivos pueden afectar significativamente los resultados metalúrgicos, sobre todo bajo las condiciones de operación de la planta. En instalaciones que están en funcionamiento, es fundamental respetar los tiempos de acondicionamiento establecidos para las pruebas estándar o de control, aunque modificar estos tiempos podría mejorar la eficiencia metalúrgica y debería considerarse dentro de los ensayos experimentales (Cytec, 2002).

- **Agitación**

Permite la difusión de los reactivos en el medio, además de mantener las partículas en suspensión dentro de la celda de flotación, facilitando la hidrodinámica dentro del tanque y un nivel de turbulencia adecuado para la separación (Naranjo, 2012).

- **Tiempo de residencia**

Este dependerá de la cinética de flotación de los minerales de la cinética de acción de reactivos, del volumen de las celdas, del porcentaje de sólidos de las pulpas en las celdas y de las cargas circulantes (Naranjo, 2012).

### **1.10.2 Reactivos de flotación**

La electrodiálisis es una técnica electroquímica utilizada para la eliminación de iones metálicos, en donde, estos se separan de la solución acuosa mediante un proceso de transporte bajo la influencia de un campo eléctrico. Es una técnica prometedora debido a su alta eficiencia y bajo costo. (Hernández et al., 2023).

La importancia de los reactivos de flotación se debe a que algunos materiales no poseen flotabilidad natural, por lo que se debe introducir la hidrofobicidad, y esto se lo hace

mediante los reactivos que se les denomina colectores.

Bravo (2004) menciona que el rendimiento de los reactivos, sean colectores o espumantes depende mucho de la composición y constitución mineralógica de la mena.

Los reactivos o agentes de flotación se clasifican de la siguiente manera:

### **Espumante**

La producción de una espuma continua y selectiva es indispensable para que las operaciones de flotación sean exitosas. La formación de este reactivo consiste en la introducción de burbujas de aire en la pulpa, una concentración de sólido y líquido generalmente en una relación 1:3 que se flota, para que aquellas burbujas cargadas de mineral en la superficie de la pulpa (Bustamante y Gaviria, 2002, como se citó en Luna, 2018).

Bustamante et al. (2008) mencionan que la química del proceso de flotación es muy compleja y el tipo de espuma que se produce por el espumante va a depender de la naturaleza del colector, tipo de mineral y la presencia de otros organismos orgánicos e inorgánicos en la solución. Estos espumante son el tensoactivo encargado de generar la espuma, son heteropolaes y surfactantes capaces de adsorberse en la interfase aire-agua, su función consiste en reducir la tensión superficial en la interfase generando estabilidad y espuma.

### **Colector**

Son componentes heterogéneos que contienen un grupo inorgánico activo acoplado a una cadena hidrocarburada. El grupo inorgánico constituye la parte del colector que se adsorbe sobre la superficie del mineral, mientras que la cadena hidrocarburada, de naturaleza no iónica, es la responsable de conferir hidrofobicidad a dicha superficie una vez que el colector ha sido adsorbido (Bustamante, Gaviria, & Restrepo, 2008).

Existen dos tipos de colectores, son aniónicos cuando su parte polar posee una carga negativa la cual adsorbe a una superficie con carga positiva, dentro de ellas se les conoce usualmente a los carboxilatos (ácidos grasos), sulfatos y algunos agentes quelantes. Son

catiónicos cuando su parte polar posee una carga positiva, la cual adsorbe una superficie con carga negativa, los más conocidos son las aminas primarias, secundarias, terciarias, cuaternarias (Bustamante, Gaviria, & Restrepo, 2008).

#### **1.10.2.1 Especificación de uso de colectores**

**Colectores de sulfuros o conocidos como tiocolectores**, son esencialmente aniónicos. Bustamante et al. (2008) cita que entre los más importantes se encuentran los xantatos y los ditiofosfatos. Los xantatos son solubles en agua, estables en un amplio rango de pH, sensibles a la oxidación y capaces de formar compuestos insolubles con la mayoría de los iones metálicos pesados. Por su parte, los ditiofosfatos se emplean principalmente en la flotación de sulfuros de cobre y plomo; presentan menor tendencia a la oxidación, aunque su unión a la superficie de los sulfuros es más débil.

**Colectores de óxidos** se pueden usar de tipo aniónicos y catiónicos. Bustamante et al. (2008) indican que los colectores aniónicos son los ácidos grasos y sus sales que se emplean para coleccionar calcáreos como calcita y dolomita. Los Alkyl-sulfonatos (usados para flotar óxidos de hierro a pH neutros o ligeramente ácidos), mientras que los Alkyl-sulfatos (se emplean para flotar barita en minerales con calcita). Los colectores catiónicos son empleados para flotar especialmente cuarzo y silicatos, estos se distinguen según el número de átomos de H que se reemplazan dentro de la molécula  $\text{NH}_3$ , debido a que su costo es muy elevado también se emplea en casos particulares como flotación de óxidos de zinc, y flotación inversa de minerales de hierro (Alkyl Pyridinium Salt).

## **Modificadores**

Estos reactivos son adicionados a la flotación con el objetivo de regular el pH activando la flotación de algunos minerales, haciendo posible la adsorción del colector o caso contrario deprimiendo la flotación de la ganga, impidiendo su adsorción. Se pueden clasificar en agentes depresantes (utilizados tanto en la flotación de óxidos como de sulfuros), en el primer caso se busca eliminar en las colas de flotación la ganga; mientras que en el segundo se busca eliminar a ganga y los sulfuros indeseados, además de los agentes activadores que se usan para flotar minerales que normalmente no es posible flotar empleando solo el colector y el espumante (Bustamante, Gaviria, & Restrepo, 2008).

### **1.11 Equipos de flotación**

La función que cumplen los equipos de flotación es airear la pulpa de una forma completa con la finalidad de asegurar que cada partícula de mineral entre en contacto con una burbuja. Los más conocidos para este proceso son las celdas de flotación a escala laboratorio.

Luna (2016) indica que los elementos básicos que destacan en la celda de flotación son:

1. Vías de entrada y salida de la pulpa.
2. Rebose de espuma con el mineral de interés
3. Mecanismos para la dispersión del flujo de aire y la dispersión del sólido para mantenerlo en suspensión.
4. Los depósitos tradicionales de las celdas de flotación son de forma paralelepípedo.
5. Y durante un proceso de flotación se distinguen 3 zonas importantes.

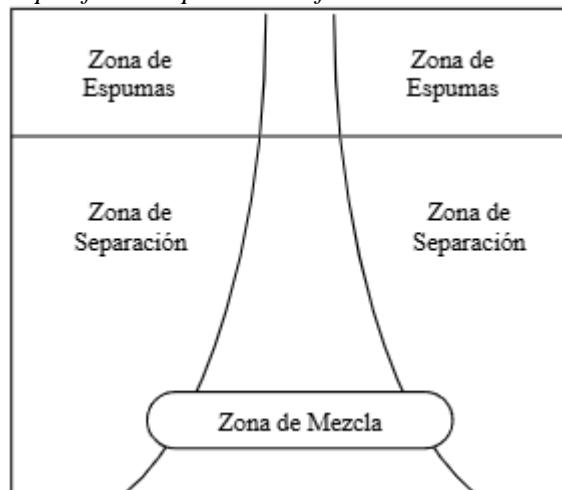
En la siguiente figura 9, se puede observar las tres zonas específicas que cumplen distintos objetivos:

- **Zona de mezcla:** es aquella en la cual las partículas minerales toman contacto con

las burbujas de aire.

- **Zona de separación:** es aquella en la que las burbujas de aire se condensan una con otra y eliminan partículas indeseables que pudieran haber sido arrastradas por atrapamiento.
- **Zona de espumas:** es aquella que las espumas mineralizadas deberán tener estabilidad y ser removidas de la celda conteniendo el concentrado (Bravo, 2004).

**Figura 10.** Zonas específicas en proceso de flotación



*Fuente:* Tomado de Bravo (2004)

### 1.11.1. Tipos de celda de flotación

Estas generalmente pueden ser clasificadas en dos tipos:

#### 1.11.1.1 Celdas de flotación mecánicas

Se utiliza en forma generalizada en nuestro medio; se caracterizan por tener un agitador mecánico que mantiene la pulpa en suspensión y dispersa el aire dentro de ella. A este tipo pertenecen las celdas: Agitair, Denver, Morococha, Outokumpu, Wenco, etc.; pueden operar individualmente como las Morocochas, en bancos de flujo abierto o divididos en varios compartimientos (Bravo, 2004).

**Figura 11.** Celda mecánica Outokumpu



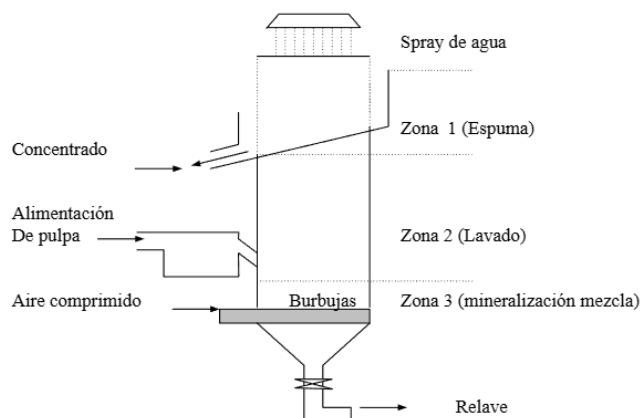
*Fuente:* Tomado de Abarca (2011)

### 1.11.1.2. Celdas de flotación neumáticas

Son máquinas de flotación que no tienen impulsor mecánico; la pulpa es agitada por aire comprimido (Abarca, 2011).

Un tipo de celdas neumáticas con un potencial de aplicación importante son las columnas, utilizadas en Canadá desde 1961. En este tipo de celdas ocurre un proceso en contracorriente; el alimento se introduce en la mitad de la columna y el aire es insuflado por la parte inferior a través de un fondo poroso (Bravo, 2004).

**Figura 12.** Celda neumática de columna



*Fuente:* Tomado de Bravo (2004)

### 1.12 Celda de flotación tipo Denver

La celda de flotación tipo Denver es una celda utilizada por los laboratorios para realizar pruebas de flotación a las menas que serán procesadas en las plantas de beneficio.

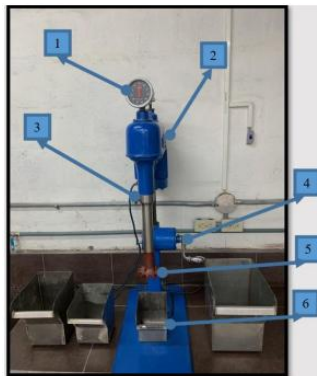
Torres Loayza (2022) en su tesis menciona las partes más importantes en la flotación

Denver:

1. Contador de revoluciones
2. Motor
3. Entrada de aire con tornillo
4. Manija para ajustar el equipo
5. Cámara para salida de aire
6. Mecanismo de ajuste de la muestra
7. Botón de encendido
8. Base del equipo

En las siguientes figuras 12 y 13 se presenta el equipo que posee el laboratorio de Minas de la Universidad del Azuay, el mismo que se utilizó para la parte experimental del proyecto.

**Figura 13.** *Celda de flotación Denver con sus respectivas partes*



**Fuente:** Tomado de Loayza (2022)

**Figura 14.** Celda de flotación Denver con sus respectivas partes



*Fuente:* Tomado de Loayza (2022)

### 1.13 Maquinaria Humboldt

Para la fase de conformación de las muestras, se utiliza la prensa de carga Humboldt, la cual actúa como una unidad de compactación de alta precisión. Según Bautista (2020) el prensado uniaxial es un proceso fundamental en la elaboración de briquetas cerámicas, ya que permite compactar la mezcla dentro de un molde rígido mediante la aplicación de una carga controlada a través de un pistón. En este proyecto, la maquinaria Humboldt facilita la simulación de las condiciones de producción industrial, garantizando que el caolín alcance su homogeneidad requerida antes de su tratamiento térmico. El equipo está integrado por un bastidor estructural de alta rigidez, un actuador hidráulico y platos de carga que distribuyen la presión de manera uniforme sobre el material.

**Figura 15.** Maquinaria Humboldt



*Fuente:* Elaboración propia

## **1.14 Clasificación de los hornos cerámicos**

El horno es una cámara cerrada en la cual los objetos de arcilla son sometidos al tratamiento térmico necesario para hacerlos duros, fuertes e impermeables, y donde se funden los esmaltes. El grado de calor puede regularse, al igual que la atmósfera en el interior del horno (Sánchez & Díaz, 2011).

Al igual el autor menciona que, en lengua inglesa se usan diferentes términos de acuerdo con el uso del horno; por ejemplo, se utiliza “oven” cuando el horno opera a una temperatura lo suficientemente alta para requerir paredes hechas con material refractario. El término “kiln” se refiere a un horno de alta temperatura utilizado para el tratamiento térmico de materiales no metálicos tales como cerámica, cemento y cal; por otra parte, cuando está involucrada la fusión de metales, como en la producción de acero, el término “furnace” es el más apropiado.

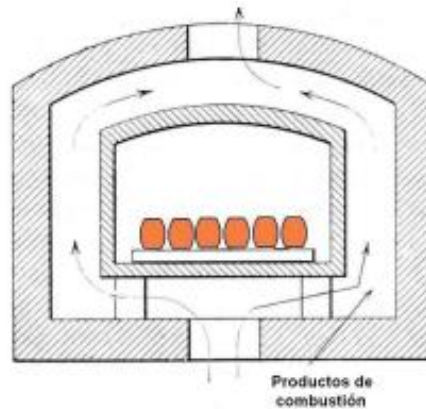
Existe una gran serie de clasificación de hornos para materiales cerámicos, en esta parte detallaremos los hornos según la dirección en que se mueven los gases y según el combustible que se utiliza para su funcionamiento.

### **1.14.1 Hornos según la dirección de los gases**

#### **1.14.1.1 Horno de tiro ascendente**

En este tipo de horno los gases calientes de la combustión entran en la zona principal del horno directamente desde el hogar, para luego salir por la chimenea que se encuentra en su parte superior- Su desventaja es que deja escapar gran cantidad de calor por la chimenea trayendo como consecuencia mayor gasto de combustible (Sánchez & Díaz, 2011).

**Figura 16.** *Horno tipo ascendente tipo mufla*

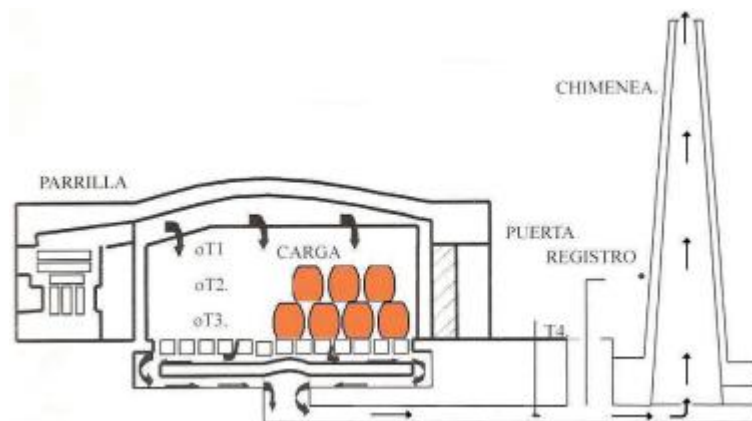


*Fuente:* Tomado de Sánchez y Díaz (2011)

### 1.14.1.2 Horno de tiro descendente

En los hornos de tiro descendente los gases calientes producto de la combustión son obligados a describir recorridos más largos dentro del horno y por lo tanto a transferir más calor a las piezas que se queman. Estos hornos tienen los conductos de salida de los gases en su base, y por ello las piezas superiores se calientan antes que las del fondo (Sánchez & Díaz, 2011).

**Figura 17.** *Horno tipo descendente*



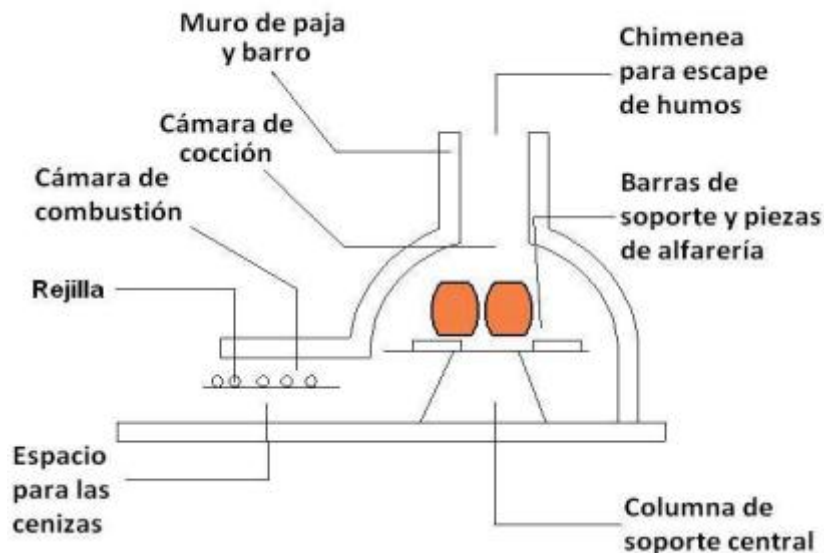
*Fuente:* Tomado de Sánchez y Díaz (2011)

## 1.14.2 Hornos según el combustible utilizado

### 1.14.2.1 Horno de combustibles sólidos

Son hornos que trabajan con madera, carbón, hulla, lignito, antracita u otro combustible sólido disponible. Los combustibles sólidos tienen como ventaja sus gastos mínimos de instalación, la combustión económica y su fácil suministro y transporte. Sus inconvenientes son el ataque químico asociado a los humos en las paredes de las cámaras, la necesidad constante de atizar y de evacuar las escorias, la dificultad en la regulación de la temperatura y control de la atmósfera del horno y, por último, la necesidad de una chimenea de grandes dimensiones para evacuar los gases asociados a la combustión (Sánchez & Díaz, 2011).

**Figura 18.** Esquema de un horno a combustible sólido (madera)



*Fuente:* Tomado de Sánchez y Díaz (2011)

### 1.14.2.2 Horno de combustibles líquidos

El combustible líquido más utilizado es el gasoil, también llamado combustible diesel, petrodiesel o ACPM (aceite combustible para motores) (Sánchez & Díaz, 2011).

Los autores Sánchez y Díaz (2011) mencionan que, la ventaja de estos hornos adica en lo económico del combustible, el fácil y seguro transporte, la alimentación automática del combustible, su alta eficiencia y fácil control de la atmósfera. Entre las desventajas se pueden nombrar la necesidad de atomizar el combustible y en muchos casos, el hecho de que cuando los aceites son muy pesados, se deben calentar para disminuir su viscosidad.

#### **1.14.2.3 Horno de combustibles gaseosos**

Las ventajas de este tipo de hornos tenemos el bajo costo de mantenimiento, alta disponibilidad del equipo (reparaciones escasas), permite la obtención de distintas condiciones atmosféricas en su interior, la mayoría de estos hornos alcanza fácilmente los 1400 °C y pueden resistir condiciones de reducción (atmósfera rica en CO), aunque estas se produzcan en todos los ciclos de quema (Sánchez & Díaz, 2011).

#### **1.14.2.4 Horno eléctrico**

La electricidad es el medio ideal de calentamiento para el tratamiento térmico de los materiales cerámicos, ya que permite un fácil control de la temperatura, no requiere respiraderos (Sánchez & Díaz, 2011).

Los hornos eléctricos están hechos de una hoja metálica dentro de su estructura, el espesor de estas hojas metálicas es función del tamaño del horno, recubiertos con materiales refractarios, incluyendo hojas metálicas, ladrillos o mantas refractarias (Solis & Amanda, 2021).

Existen dos tipos de horno eléctrico que mencionan los autores Sánchez y Díaz (2011):

- **De elementos metálicos:** estos se encuentran en forma de hilos o laminas, y están compuestos de aleaciones que tienen una gran resistencia eléctrica.

- **De elementos no metálicos:** están hechos de carburo de silicio fundido, presentado en varillas de diferentes diámetros.

#### 1.14.2.5 Horno utilizado para la realización de las briquetas

A partir de eso para este proyecto se utilizará el horno eléctrico implementado en el laboratorio de minas de la empresa SAMO THERMAL que tiene las siguientes especificaciones:

El horno es de marca TT de carga frontal que presenta las características de poseer un programador electrónico de procedencia americano con la implementación de un control de velocidad, para obtener las diferentes mesetas o rampas de temperatura.

- **Dimensiones del horno eléctrico:** 52 cm de alto, 38 cm de ancho y 49 cm de profundidad
- **Dimensiones de la cámara del horno eléctrico:** 22 cm de alto, 22 cm de ancho y profundidad de 22 cm. Al obtener estas medidas se puede trabajar con el tamaño de las piezas que son de 10 cm x 5 cm x 1 cm siendo una cámara de cocción adecuada para la quema de las muestras.
- **Temperatura:** tiene una sola lamina de chapa, la misma que está recubierta con pintura electroestática para evitar la oxidación, la plancha posee un espesor de 1.1 milímetros con esto es suficiente para alcanzar la temperatura que se necesita para quemar las muestras llegando a tener una temperatura máxima de 1200 °C.
- **Potencia:** alcanza los 3300 watts.
- **Elementos calefactores del horno eléctrico:** 2 conductores eléctricos (resistencias niqueladas) conectadas en serie para obtener los 15 amperios y alambre espiral de aleación tipo Kanthal que es una aleación estándar de cromo, hierro y aluminio que soporta hasta 1450 °C de temperatura sin sufrir una deformación (Solis & Amanda, 2021).

**Figura 19.** *Horno SAMO THERMAL marca TT*



**Fuente:** Elaboracion propia

## **CAPÍTULO 2**

### **PROCESO EXPERIMENTAL**

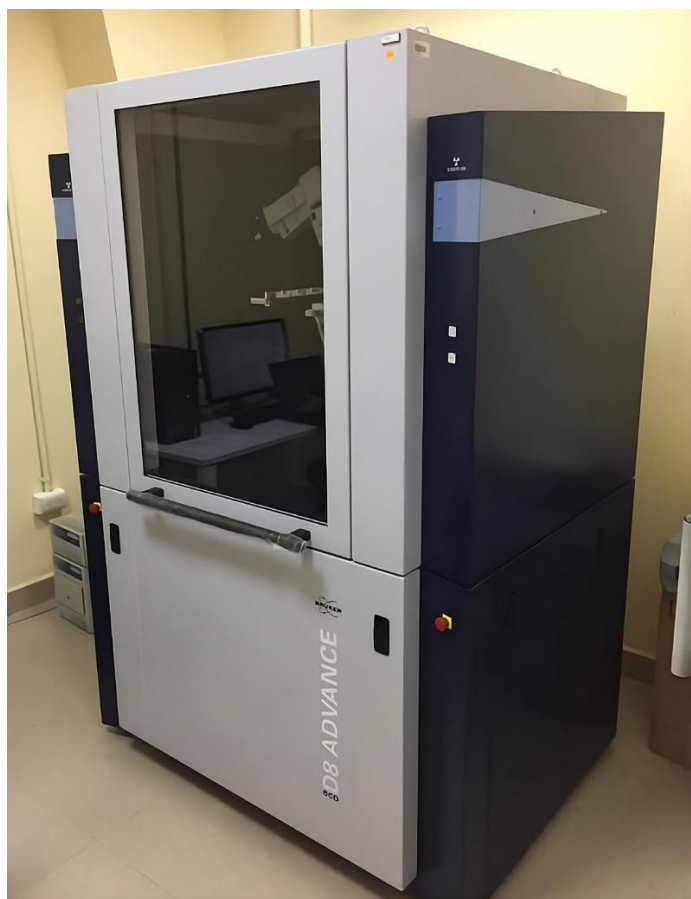
Este capítulo describe la metodología empleada en este estudio para el desarrollo experimental, cuyo objetivo general es reducir la concentración de óxidos de hierro presente en la muestra de caolín. Para ello se estableció una secuencia de actividades que comprende, en primer lugar, caracterizar la materia prima; posteriormente, definir las condiciones del proceso de flotación; y, finalmente evaluar las propiedades del material obtenido después del tratamiento.

#### **2.1 Caracterización de la muestra mediante difracción de rayos X**

##### **2.1.1. Composición mineralógica**

Con el fin de determinar la composición mineralógica de la muestra de caolín, se realizó el análisis mediante el equipo de difracción de rayos equis (DRX), proporcionada por el laboratorio de beneficio de minerales del Departamento de Geociencias de la Universidad Técnica Particular de Loja.

La difracción de rayos X es un fenómeno físico que ocurre cuando un haz de rayos X de una longitud de onda específica interactúa con una sustancia cristalina. La difracción de rayos X es un método no destructivo de alta tecnología utilizado para el análisis de una amplia gama de materiales. La aplicación fundamental de la difracción de rayos X es la identificación cualitativa y cuantitativa de la composición mineralógica de una muestra, lo que permite obtener valiosa información sobre la estructura cristalina de los materiales y sus propiedades físicas y químicas (Universidad Técnica Particular de Loja, 2022).

**Figura 20.** Equipo de difracción de rayos X (DRX) Bruker D8 ADVANCE

*Fuente:* Proporcionada por el Mgtr. Renato González Z, laboratorista de la UTPL

**Tabla 7.** Composición mineralógica de la muestra de caolín mediante DRX

Fases minerales	Semicuantificación (%)
Cuarzo	36.9
Caolinita	57.2
Oligoclasa (Plagioclasa)	2.9
Gibbsita	3.0

*Fuente:* Elaboración propia, autores (2026) con datos obtenidos del informe de análisis mineralógico

DRX

De acuerdo con los resultados obtenidos, la fase mineral predominante es la caolinita, seguida del cuarzo y pequeñas proporciones de oligoclasa y gibbsita. No se identificaron fases de minerales de hierro, y se puede deber que la presencia de estos compuestos se

encuentra en concentraciones muy bajas o en formas amorfas lo cual limita la detección mediante DRX. Sin embargo, la muestra presenta una coloración anaranjada, lo que sugiere la presencia de hierro como impureza.

### 2.1.2. Preparación inicial del material

Como se observa en la figura 10, la muestra contenía fragmentos de tamaños variable juntos con el material pulverulento, lo cual es característico de depósitos arcillosos que han sido extraídos y almacenados sin un procesamiento previo.

Debido a que los fragmentos eran de fácil disgregación no fue necesario un proceso de trituración primaria o secundaria. En su lugar, se procedió a separar manualmente los fragmentos de mayor tamaño y posteriormente el material se sometió a un proceso de molienda con el objetivo de reducir el tamaño de partícula y obtener una granulometría más adecuada.

**Figura 21.** *Muestra del caolín en su estado inicial*



**Fuente:** Elaboración propia

### 2.1.3. Secado del material

Inicialmente, el material recolectado fue sometido a un proceso de secado con el fin de eliminar la humedad presente en la muestra de caolín y garantizar condiciones adecuadas para los análisis posteriores. Para ello, la muestra fue colocada en un horno de secado a una temperatura de 105 °C durante un período de 12 horas, hasta asegurar la eliminación de la humedad contenida en el material. Una vez finalizado el proceso de secado, la muestra fue retirada del horno y dejada enfriar a temperatura ambiente por 5 horas antes de continuar con las etapas posteriores de caracterización.

**Figura 22.** *Secado del material dentro del horno*



*Fuente:* Elaboración propia

### 2.1.4. Molienda del material

Posteriormente al proceso de secado, se realizó la molienda utilizando un recipiente de molienda de material cerámico, en donde se colocaron medios moledores compuestas de alúmina que son utilizadas debido a su alta resistencia al desgaste y minimizan la contaminación del material durante el proceso.

Se empleó una carga de bolas con una proporción aproximada del 70% de bolas de 40 mm de diámetro y 30% de bolas de 25 mm, el recipiente fue colocado entre rodillos revestidos de caucho, los cuales permitieron sostener y hacer girar al recipiente, el material fue sometido al proceso de molienda durante 15 minutos, tiempo suficiente para obtener un tamaño de partícula más fina y homogénea.

**Figura 23.** Molino de bolas de cerámica utilizado en el proceso de molienda



*Fuente:* Elaboración propia

### **2.1.5. Análisis de textura y color**

Se realizó un análisis visual de la muestra de caolín con el fin de identificar características físicas como textura y color que permiten hacer una evaluación del material.

En cuanto a su textura, el material presenta una consistencia granular fina con presencia de pequeños aglomerados, que se forman por la presencia de la humedad en los materiales arcillosos.

Respecto al color, la muestra presenta un tono crema con coloraciones anaranjadas, que está asociada a la presencia de impurezas de hierro, los cuales influyen en la tonalidad del material.

Por esta razón, posteriormente se evaluará el color mediante la elaboración de briquetas y su comparación con la carta de colores de Munsell.

**Figura 24.** *Muestra de caolín secado utilizada durante el análisis visual de textura y color*



*Fuente:* Elaboración propia

### **2.1.6. Medición del pH**

Se realizó la medición del pH inicial de la muestra de caolín, debido a que influye directamente en el proceso de flotación.

Para la determinación del pH, se preparó una suspensión del material en agua destilada, la cual posteriormente fue analizada utilizando papel indicador universal de pH, que permite estimar el nivel de acidez o alcalinidad del medio mediante el cambio de color del indicador cuando entra en contacto con la solución.

El valor obtenido para la muestra se encontró en un rango aproximado de pH 6.5 a 7, lo que indica que el material presenta un comportamiento cercano a la neutralidad, este resultado como referencia para el ajuste de pH en las pulpas utilizadas en los ensayos de flotación.

**Figura 25.** *pH inicial de la muestra de caolín*



*Fuente:* Elaboración propia

### **2.1.7. Determinación de densidad**

Con el propósito de determinar la densidad de la muestra de caolín, se realizaron ensayos utilizando dos métodos experimentales: el método de la probeta y el método del picnómetro. Estos permiten estimar la relación entre la masa del material y el volumen que ocupa.

En el método de la probeta graduada, en los dos ensayos experimentales se colocaron 150 ml de agua destilada, a la cual se le adicionaron 40 g del material del caolín y posteriormente las probetas fueron agitadas con una varilla de vidrio con el fin de favorecer a la dispersión del material.

Las muestras se dejaron en reposo 24 horas, permitiendo la sedimentación del material y la estabilización del volumen desplazado, una vez transcurrido el tiempo se procedió a registrar el volumen final ocupado, con los valores de la masa del material y el volumen desplazado en la probeta se procedió al cálculo de la densidad del material mediante la siguiente fórmula:

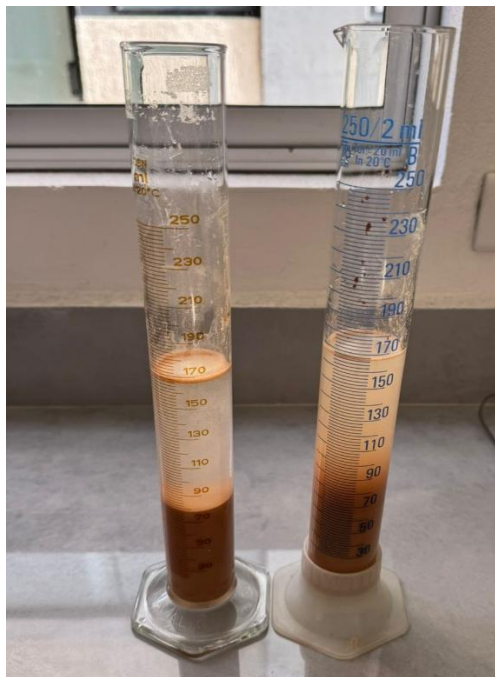
$$\rho = \frac{m}{v}$$

Donde:

m = peso de la muestra

v = volumen desplazado

**Figura 26.** *Ensayo de determinación de densidad mediante el método de probeta después de 24 horas de sedimentación.*



*Fuente:* Elaboración propia

**Tabla 8.** *Resultado de densidad por el método de la probeta*

Ensayo	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )
1	2
2	2

*Fuente:* Elaboración propia

De igual manera para el método del picnómetro, se realizaron tres ensayos

experimentales, empleando diferentes masas de muestra con el objetivo de verificar los resultados. Las masas utilizadas fueron 1.5g, 2.5g y 3.5 g de material de caolín.

En cada ensayo se registró inicialmente la masa del picnómetro de 10 ml que dio como resultado 20 gramos, posteriormente la masa del picnómetro lleno con agua destilada de 29.8 gramos y finalmente la masa del picnómetro que contenía la muestra del caolín y agua.

A partir de los valores obtenidos en cada ensayo, se calculó la densidad del material a partir de la siguiente fórmula:

$$\rho = \frac{m_1}{m_1 + m_2 - m_3}$$

Donde:

$m_1$  = peso muestra

$m_2$  = peso picnómetro + agua

$m_3$  = peso muestra + peso picnómetro + agua

**Figura 27.** Ensayo de determinación de densidad mediante el método del picnómetro



**Fuente:** Elaboración propia

**Tabla 9.** Resultado de densidad mediante picnómetro

Ensayo	Masa de muestra (g)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )
1	1.5	2.5
2	2.5	2.27
3	3.5	2.19

*Fuente:* Elaboración propia

Posteriormente se calculó el promedio de los valores obtenidos en los cinco ensayos realizados, correspondientes a dos ensayos por el método de probeta y tres ensayos por el método del picnómetro, con el fin de lograr un valor de densidad representativa del material de caolín. A partir de ese cálculo se obtuvo una densidad promedio de 2.2 (g/cm<sup>3</sup>).

### 2.1.8. Tamizado de la materia prima

Con el fin de determinar la distribución del tamaño de partículas del material de caolín, se realizó un análisis granulométrico mediante el método del tamizado. Este método permite separar las partículas mediante el uso de una serie de tamices normalizados con diferentes aberturas conforme a lo establecido en la norma ASTM E11.

El ensayo se realizó considerando que el material de caolín fue sometido previamente a un proceso de molienda, por lo que el análisis granulométrico se enfocó en partículas finas características de los materiales arcillosos.

Para su desarrollo se empleó una serie de tamices normalizados con aberturas correspondientes a los números 10, 20, 40, 50, 80, y 100 los cuales fueron colocados de forma ordenada desde la abertura mayor hasta la menor.

Posteriormente, se colocó una masa de 500 g de material de caolín en el tamiz superior, y fueron colocados en una maquina agitadora de tamices, donde se sometió a un proceso de agitación durante 20 minutos.

**Figura 28.** Conjunto de tamices normalizados utilizados en la máquina Ro-Top



*Fuente:* Elaboración propia

A partir de los datos obtenidos en el ensayo de tamizado, se procedió a determinar la distribución granulométría del material del caolín que se presenta en la tabla 11 Para ello se calcularon los porcentajes retenidos y pasantes correspondientes a cada tamiz utilizado. Una vez con los resultados obtenidos se construyó la curva granulométrica que se presenta en la figura 18, que permite representar la distribución de las partículas analizadas mediante diferentes modelos entre el de Rosin Rammler y el modelo de Schuhmann.

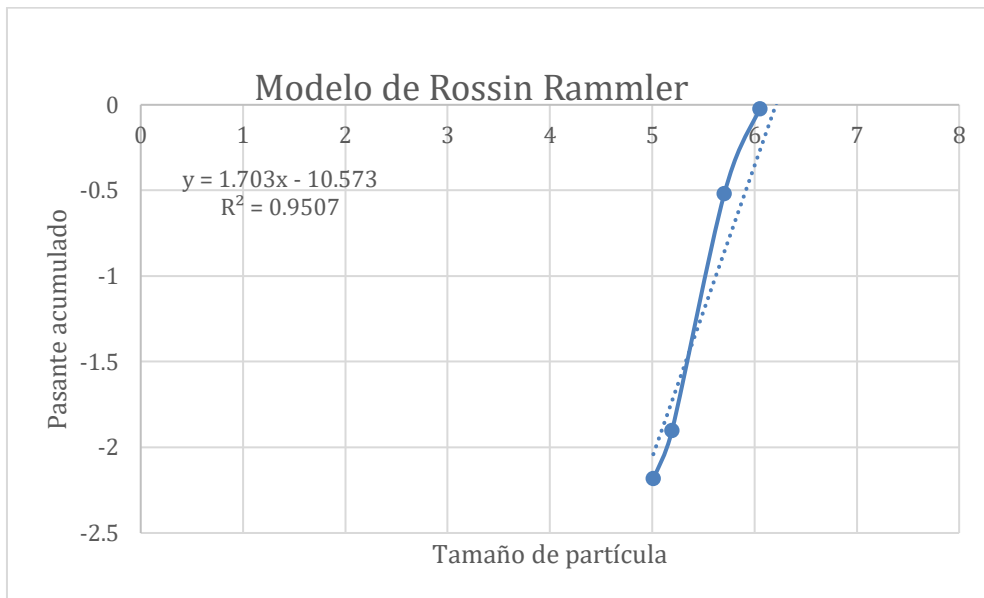
Para la selección de la curva que mejor representa la distribución granulométrica se evaluó el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) que se obtiene a partir del modelo, y finalmente se seleccionó el modelo de Rosin Rammler debido a que presentó el valor de  $R^2$  más cercano a uno, indicando un mejor ajuste entre los datos obtenidos.

**Tabla 10.** Valores correspondientes al análisis granulométrico del material de caolín

Malla	Tamaño malla ( $\mu\text{m}$ ) $x_i$	Peso Retenido (g)	Fracción Retenida $f(x)$	Fracción pasante acumulada $F(x)$	$X$	Schumhann	Rosin Rammler		
						$Y$	$x$	$y$	
					$\text{Log}(x)$	$\text{LOG}(F_x)$	$\ln(x)$	$\ln(\ln(1/1-F(x)))$	
+10	2000	0	0	1	3,30103	0	7,6009025	#¡DIV/0!	
-10 + 20	2000	73	0,146586345	1	3,30103	0	7,6009025	#¡DIV/0!	
-20 +40	850	115	0,230923695	0,853413655	2,92941893	-0,068840413	6,7452363	0,652398431	
-40 +50	425	87	0,174698795	0,62248996	2,62838893	-0,205867649	6,0520892	-0,026181654	
-50 + 80	300	154	0,309236948	0,447791165	2,47712125	-0,34892448	5,7037825	-0,521163915	
-80 +100	180	16	0,032128514	0,138554217	2,25527251	-0,858380252	5,1929569	-1,902848642	
-100 + Base	150	53	0,106425703	0,106425703	2,17609126	-0,972953473	5,0106353	-2,184572796	
Base		498	1	0					

*Fuente:* Elaboración propia

**Figura 29.** Curva granulométrica del material de caolín por el método de Rosin Rammler



**Fuente:** Elaboración propia

Finalmente, se seleccionó la fracción de material pasante por la malla número 100, la cual fue utilizada para la preparación en los ensayos de flotación, ya que el tamaño de partículas influye en la eficiencia de la separación de las impurezas de caolín

### 2.1.9. Límites de Atterberg

Posteriormente se determinaron los límites de Atterberg, con el objetivo de evaluar el comportamiento del material y establecer las condiciones del límite líquido y límite plástico, a partir de las cuales se obtiene el índice de plasticidad (IP), que indica el contenido de humedad en el que el material se mantiene en estado plástico y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$IP = LL - LP$$

Donde:

LL=límite líquido

LP = límite plástico

### 2.1.9.1. Limite plástico

Para la determinación del límite plástico, se prepararon 200 g el material tamizado por la malla número 40 se mezcló con agua destilada hasta obtener una mezcla homogénea. Posteriormente se formaron rollos de aproximadamente 3.2 mm de diámetro sobre una superficie lisa hasta obtener la aparición de grietas, lo cual indica que se ha alcanzado el límite plástico. La muestra obtenida se colocó en un plato evaporador previamente pesado, se registró su masa y luego se llevó al horno para su secado a una temperatura de 150 °C durante 12 horas. Este procedimiento se repitió tres veces más, y el promedio de los valores obtenidos fue considerado como el límite plástico del material.

**Tabla 11.** Resultados del ensayo de límite plástico

<b>LÍMITE PLÁSTICO</b>						
Ensayo (#)	Recipiente (g)	Peso húmedo (g)	Peso seco (g)	Contenido de agua (g)	Contenido de humedad (%)	Promedio (%)
1	22.8	13.9	11	2.9	26.36	26.62
2	44.3	15.1	11.9	3.2	26.89	
3	44.3	12.9	10.2	2.7	26.47	
4	16.6	18	14.2	3.8	26.76	

*Fuente:* Elaboración propia

### 2.1.9.2. Limite líquido

Para realizar el ensayo del límite líquido, se prepararon aproximadamente 200 g de muestra, la cual fue pulverizada y posteriormente tamizada por la malla N.º 40. El material se colocó en un tazón y se mezcló con agua destilada hasta obtener una pasta homogénea. Luego, la mezcla se extendió uniformemente en la copa de Casagrande y se realizó una ranura en el centro utilizando el ranurador. Posteriormente, se giró el mango del equipo aplicando aproximadamente dos golpes por segundo.

Una vez registrado el número de golpes, se tomó una porción de la muestra, se colocó en un plato evaporador previamente pesado y se determinó su masa. Posteriormente, la

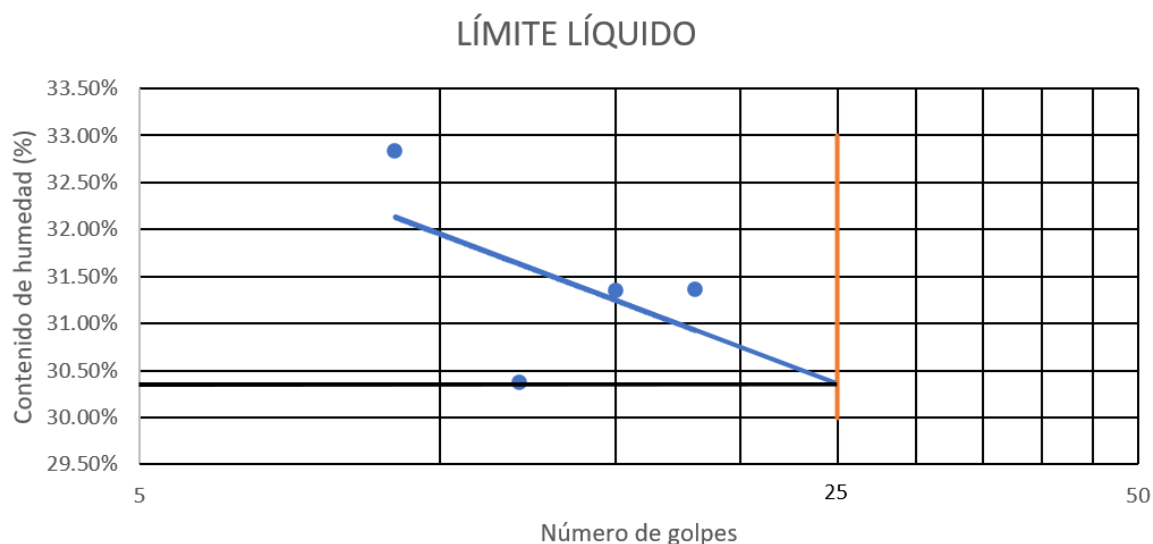
muestra se secó en horno a 150 °C durante 12 horas, para luego volver a pesarla y calcular su contenido de humedad. Este procedimiento se repitió tres veces con el fin de obtener resultados confiables para la determinación del límite líquido del material.

**Tabla 12.** Resultados del ensayo de límite líquido

LÍMITE LÍQUIDO							
Ensayo (#)	Recipiente (g)	# golpes	Peso húmedo (g)	Peso seco (g)	Contenido de agua (g)	Contenido de humedad (%)	Promedio (%)
1	43	15	11	18.5	5.8	31.35	31.48
2	42	9	11.9	13.4	4.4	32.84	
3	44.4	12	10.2	13.5	4.1	30.37	
4	43	18	14.2	15.3	4.8	31.37	

*Fuente:* Elaboración propia

**Figura 30.** Limite Líquido



*Fuente:* Elaboración propia

La figura 30 presentada corresponde a la determinación del Límite Líquido mediante el método de Casagrande.

El valor del límite líquido se determina utilizando el punto estándar de 25 golpes. En

la gráfica, se traza una línea vertical en ese número de golpes y su intersección con la línea de tendencia permite estimar el contenido de humedad correspondiente. De acuerdo con la interpretación de la gráfica, el contenido de humedad para 25 golpes es aproximadamente 30.4%, valor que se considera como el límite líquido del suelo analizado.

El límite de plasticidad se calculó de la siguiente manera:

$$IP = 30.4 \% - 26.62 \%$$

$$IP = 3.78 \%$$

Por lo tanto, considerando que  $LL < 50 \%$  y que el IP es bajo, el suelo puede clasificarse dentro de los suelos finos de baja plasticidad, típicamente cercano a la clasificación ML, que corresponde a limo inorgánico de baja plasticidad según la norma ASTM D-2487.

## 2.2 Flotación espumante del material

### 2.2.1. Densidad de la pulpa

La densidad de la pulpa fue calculada en función de la fracción de sólidos establecidos en el diseño experimental, correspondientes a 15%, 25%, y 35% en peso.

Se calculó a partir de la siguiente fórmula:

$$\rho_p = \frac{1}{\phi_p + \left(\frac{1}{\rho_s} - 1\right) + 1}$$

Dónde:

$\rho_p$  = Densidad de la pulpa ( $\text{g/cm}^3$ )

$\phi_p$  = Porcentaje de sólidos (%)

$\rho_s$  = Densidad del sólido ( $\text{g/cm}^3$ )

Reemplazando los valores para una fracción de sólidos al 15% se obtuvo lo siguiente:

$$\rho_p = \frac{1}{0.15 + \left(\frac{1}{2.2} - 1\right) + 1}$$

$$\rho_p = 1.09 \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right)$$

Lo mismo se realizó para fracción de sólidos al 25% y 35%

$$\rho_p = \frac{1}{0.25 + \left(\frac{1}{2.2} - 1\right) + 1}$$

$$\rho_p = 1.16 \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right)$$

$$\rho_p = \frac{1}{0.35 + \left(\frac{1}{2.2} - 1\right) + 1}$$

$$\rho_p = 1.24 \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right)$$

Con la densidad de la pulpa determinamos la masa de sólidos en la pulpa mediante la siguiente ecuación:

$$\rho_p = \frac{m_p}{V_p}$$

Dónde:

$m_p$  = Masa de sólidos en la pulpa (g)

$\rho_p$  = Densidad de la pulpa ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )

$V_p$  = Volumen de la pulpa ( $\text{cm}^3$ )

Las pruebas de flotación se realizaron en la celda de 1 litro, por lo tanto, el volumen de la pulpa fue de 1000 cm<sup>3</sup>, despejando la formula y reemplazando los valores se obtuvo lo siguiente:

$$mp = \rho p * Vp$$

Al 15 %:

$$mp = 1.09 * 1000$$

$$mp = 1090 \text{ g}$$

Al 25 %:

$$mp = 1.16 * 1000$$

$$mp = 1160 \text{ g}$$

Al 35 %:

$$mp = 1.24 * 1000$$

$$mp = 1240 \text{ g}$$

A partir de esto, se calcula la masa de partículas sólidas en la pulpa mediante la siguiente ecuación:

$$\varphi p = \frac{ms}{mp}$$

Dónde:

$\varphi p$  = Porcentaje de sólidos (%)

$mp$  = Masa de sólidos en la pulpa (g)

$ms$  = Masa de sólidos en la pulpa (g)

Despejando la formula y reemplazando los valores se obtuvo lo siguiente:

$$ms = \varphi p * mp$$

Al 15 %:

$$mp = 0.15 * 1090$$

$$mp = 163 \text{ g}$$

Al 25 %:

$$mp = 0.25 * 1160$$

$$mp = 290 \text{ g}$$

Al 35 %:

$$mp = 0.35 * 1160$$

$$mp = 434 \text{ g}$$

### **2.2.2. Reactivos químicos utilizados**

A continuación, se describen los diferentes reactivos empleados:

#### **Xantato amílico de potasio (Z-6)**

Este colector es más conocido como Z-6., y se lo consigue en estado sólido, por lo que es recomendable diluirlo en agua.

Chica y Salinas (2017) en su tesis mencionan que su aplicación más común se encuentra en la flotación de minerales sulfurados, pero diversos estudios indican que también pueden interactuar con minerales metálicos parcialmente oxidados generalmente en pH neutro y alcalino, ya que en medios ácidos sufren procesos de descomposición.

#### **Espumante XF-250**

El espumante ayuda a la generación de burbujas las cuales encapsulan el mineral de interés, el espumante se lo consigue en estado líquido. El espumante que se utilizó en la flotación fue facilitado por la marca de FIBESA el cual ya estuvo ya preparado y listo para su

uso.

### **Regulador de pH**

El pH de la pulpa es uno de los parámetros más importantes en los procesos de flotación, ya que influye en la química superficial de los minerales y en la interacción entre las partículas y los reactivos utilizados. En estos ensayos se utilizó:

#### **Cal:**

La cal (carbonato de calcio u óxido de calcio) regula el pH aumentando la alcalinidad en suelos y procesos industriales. Neutraliza la acidez al reaccionar con iones de hidrógeno ( $H^+$ ), elevando el pH y haciendo los medios más neutros (Elsevier, 2019).

#### **Ácido sulfúrico**

Es un ácido fuerte que al disolverse en agua libera iones hidrógeno ( $H^+$ ), disminuyendo el pH de la solución y generando un medio ácido (911Metallurgist, s.f.).

### **2.2.3. Preparación y dosificación de los reactivos químicos**

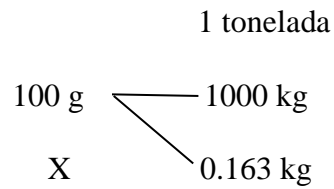
La cantidad exacta para emplear se calculó en base a dosificaciones de cada reactivo empleado:

#### **2.2.3.1. Dosificación de reactivos en el ensayo 1**

En este estudio se evaluaron condiciones de pH 4, 7 y 9, con el fin de analizar la influencia del pH en la eliminación de impurezas de hierro presentes en el caolín.

**pH:** El primer experimento corresponde a la condición de pH 4, empleando ácido sulfúrico a una concentración 1N (normal) o 0.5 M (molar). Durante un ensayo preliminar se determinó que la adicción de 30 gotas del ácido permite alcanzar el valor de pH deseado.

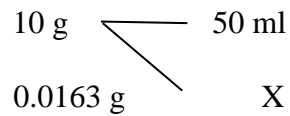
**Colector:** según la ficha técnica brindada por la marca FIBESA, se debe preparar a una solución del 20% y la dosificación recomendada es de 20 a 150 g/tn. El cálculo se presenta a continuación:



$$X = \frac{100 \text{ g}}{1000 \text{ kg}} * 0.163$$

$$X = 0.0163 \text{ g}$$

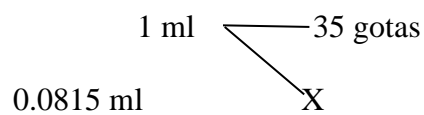
Sabemos que la solución es al 20%, se calcula la cantidad en mililitros:



$$X = \frac{0.0163 \text{ g}}{10 \text{ g}} * 50 \text{ ml}$$

$$X = 0.0815 \text{ ml}$$

Calculamos en un envase que 1 ml de reactivo es igual a 35 gotas, se calculó el número de gotas necesarios para el ensayo:



$$X = \frac{0.0815 \text{ ml}}{1 \text{ ml}} * 35$$

$$X = 3 \text{ gotas}$$



ensayo preliminar se determinó que 0.4 gramos de este compuesto permiten elevar al pH deseado. Las cantidades de colector y espumante es el mismo que en el ensayo 1.

#### 2.2.3.4. Dosificación de reactivos en el ensayo 4 - 5 y 6

De igual manera, los ensayos fueron desarrollados a pH 4, 7 y 9 que anteriormente se explica como alcanzar el pH deseado y también se mantuvo la fracción de sólidos constantes.

##### Colector:

$$\begin{array}{rcl}
 & & 1 \text{ tonelada} \\
 100 \text{ g} & \longleftarrow & 1000 \text{ kg} \\
 X & & 0.290 \text{ kg}
 \end{array}$$

$$X = \frac{100 \text{ g}}{1000 \text{ kg}} * 0.290 \text{ kg}$$

$$X = 0.0290 \text{ g}$$

Para calcular el número de gotas:

$$\begin{array}{rcl}
 & & 10 \text{ g} \quad \longleftarrow \quad 50 \text{ ml} \\
 0.0290 \text{ g} & X &
 \end{array}$$

$$X = \frac{0.0290 \text{ g}}{10 \text{ g}} * 50 \text{ ml}$$

$$X = 0.145 \text{ ml}$$

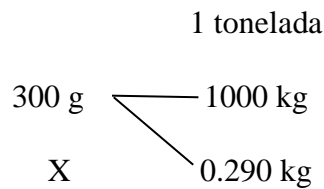
Y sabemos que:

$$\begin{array}{rcl}
 & & 1 \text{ ml} \quad \longleftarrow \quad 35 \text{ gotas} \\
 0.145 \text{ ml} & X &
 \end{array}$$

$$X = \frac{0.145 \text{ ml}}{1 \text{ ml}} * 35$$

$$X = 5 \text{ gotas}$$

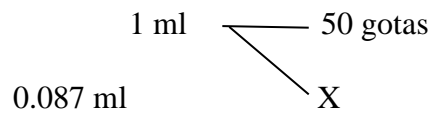
**Espumante:**



$$X = \frac{0.290 \text{ kg}}{1000 \text{ kg}} * 300 \text{ g}$$

$$X = 0.087 \text{ g}$$

De igual forma sabemos que:



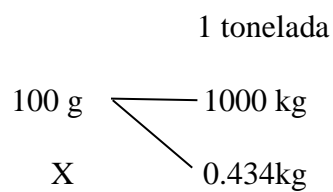
$$X = \frac{0.087 \text{ ml}}{1 \text{ ml}} * 50$$

$$X = 4 \text{ gotas}$$

**2.2.3.5. Dosificación de reactivos en el ensayo 7 – 8 y 9**

De igual manera, los ensayos fueron desarrollados a pH 4, 7 y 9 y se mantuvo la fracción de solidos constantes.

**Colector:**



$$X = \frac{100 \text{ g}}{1000 \text{ kg}} * 0.434 \text{ kg}$$

$$X = 0.0434 \text{ g}$$

Para calcular el número de gotas:

$$\begin{array}{ccc} 10 \text{ g} & \text{---} & 50 \text{ ml} \\ & \diagdown & \\ 0.0434 \text{ g} & & X \end{array}$$

$$X = \frac{0.0434 \text{ g}}{10 \text{ g}} * 50 \text{ ml}$$

$$X = 0.217 \text{ ml}$$

Y sabemos que:

$$\begin{array}{ccc} 1 \text{ ml} & \text{---} & 35 \text{ gotas} \\ & \diagdown & \\ 0.217 \text{ ml} & & X \end{array}$$

$$X = \frac{0.217 \text{ ml}}{1 \text{ ml}} * 35$$

$$X = 8 \text{ gotas}$$

**Espumante:**

$$\begin{array}{ccc} & & 1 \text{ tonelada} \\ & & \text{---} \\ 300 \text{ g} & \text{---} & 1000 \text{ kg} \\ & \diagdown & \\ & X & 0.434 \text{ kg} \end{array}$$

$$X = \frac{0.434 \text{ kg}}{1000 \text{ kg}} * 300 \text{ g}$$

$$X = 0.13 \text{ g}$$

De igual forma sabemos que:

$$\begin{array}{ccc} & 1 \text{ ml} & \text{---} & 50 \text{ gotas} \\ & & \diagdown & \\ 0.13 \text{ ml} & & & X \end{array}$$

$$X = \frac{0.13 \text{ ml}}{1 \text{ ml}} * 50$$

$$X = 6 \text{ gotas}$$

### 2.2.3.6. Parámetros de cada experimento

La presente investigación contempla la ejecución de nueve ensayos experimentales, estructurados a partir de un diseño factorial  $3 \times 3$ , en el cual se evalúa la influencia de dos variables principales: el pH del sistema y la fracción de sólidos en la pulpa. Este tipo de diseño experimental permite estudiar de manera sistemática los efectos de múltiples factores sobre una variable de respuesta, siendo ampliamente utilizado en la optimización de procesos de flotación de minerales.

Los ensayos corresponden a valores de pH de 4, 7 y 9, y fracciones de sólidos de 15%, 25% y 35%, generando así nueve combinaciones experimentales diferentes. La selección de estos niveles se fundamenta en la necesidad de evaluar condiciones ácidas, neutras y alcalinas, así como diferentes densidades de pulpa que representan escenarios operativos típicos en procesos de flotación.

En cada uno de los ensayos se mantuvieron constantes los demás parámetros operativos, tales como la dosificación de reactivos (colector y espumante), el tiempo de acondicionamiento, la velocidad de agitación y el tiempo de flotación, con el fin de evaluar de manera aislada el efecto de las variables en estudio sobre la eficiencia de remoción de impurezas de óxidos de hierro. Este control de variables permite establecer relaciones causa-efecto más precisas y determinar las condiciones para mejor desempeño del proceso.

A continuación, se describen los parámetros y condiciones operativas aplicadas en cada uno de los experimentos:

**Tabla 13.** *Parámetros operativos de los ensayos de flotación a diferentes valores del pH con una fracción de sólidos al 15%*

Ensayo	pH	Ajuste pH	Acondicionamiento (minutos)	Colector (Z-6)	Acondicionamiento (minutos)	Espumante (XF-250)	Acondicionamiento (minutos)	Aireación (minutos)	Tiempo total (minutos)
1	4	30 gotas de ácido sulfúrico	5	3 gotas	10	3 gotas	3	1.5	19.5
2	7	0.2 gramos de cal	5	3 gotas	10	4 gotas	3	1.5	19.5
3	9	0.4 gramos de cal	5	3 gotas	10	6 gotas	3	1.5	19.5

*Fuente:* Elaboración propia

**Tabla 14.** *Parámetros operativos de los ensayos de flotación a diferentes valores del pH con una fracción de sólidos al 25%*

Ensayo	pH	Ajuste pH	Acondicionamiento (minutos)	Colector (Z-6)	Acondicionamiento (minutos)	Espumante (XF-250)	Acondicionamiento (minutos)	Aireación (minutos)	Tiempo total (minutos)
4	4	30 gotas de ácido sulfúrico	5	5 gotas	10	3 gotas	3	1.5	19.5
5	7	0.2 gramos de cal	5	5 gotas	10	4 gotas	3	1.5	19.5
6	9	0.4 gramos de cal	5	5 gotas	10	6 gotas	3	1.5	19.5

*Fuente:* Elaboración propia

**Tabla 15.** *Parámetros operativos de los ensayos de flotación a diferentes valores de) pH con una fracción de sólidos al 35%.*

Ensayo	pH	Ajuste pH	Acondicionamiento (minutos)	Colector (Z-6)	Acondicionamiento (minutos)	Espumante (XF-250)	Acondicionamiento (minutos)	Aireación (minutos)	Tiempo total (minutos)
7	4	30 gotas de ácido sulfúrico	5	8 gotas	10	3 gotas	3	1.5	19.5
8	7	0.2 gramos de cal	5	8 gotas	10	4 gotas	3	1.5	19.5
9	9	0.4 gramos de cal	5	8 gotas	10	6 gotas	3	1.5	19.5

*Fuente:* Elaboración propia

### 2.2.3.7 Procedimiento

Una vez definidos los parámetros operativos y establecidas las dosificaciones de reactivos para cada fracción de sólidos, se procedió a la ejecución de los ensayos de flotación en el laboratorio de la Universidad del Azuay.

Previo a la ejecución de los ensayos, el material de caolín previamente molido y clasificado a una granulometría inferior a malla 100 fue pesado, separándolo en porciones individuales de acuerdo con la masa de sólidos requerida para cada condición experimental. Estas muestras fueron almacenadas en recipientes independientes, correspondientes a las fracciones de sólidos establecidas (15%, 25% y 35%), con el fin de garantizar una adecuada preparación de las pulpas.

**Figura 31.** *Preparación del material de caolín a distintas fracciones de sólidos empleadas en la elaboración de pulpas para los ensayos de flotación.*



*Fuente:* Elaboración propia

Para cada ensayo, se inició el procedimiento vaciando la cantidad de muestra mineral previamente pesada en la celda de flotación, junto con el volumen de agua correspondiente, de acuerdo con la fracción de sólidos establecida. Esto se realizó en cada una de las pruebas experimentales.

**Figura 32.** *Incorporación de la muestra de caolín y agua en la celda de flotación para la preparación de la pulpa.*



*Fuente:* Elaboración propia

Posteriormente, se realizó el ajuste del pH de la pulpa a los valores establecidos (4, 7 y 9), empleando reactivos reguladores según el caso, y manteniendo un tiempo de acondicionamiento de 5 minutos para asegurar la estabilización del sistema.

**Figura 33.** *Ajuste del pH con caolín*



*Fuente:* Elaboración propia

Una vez ajustado el pH, se adicionó el colector xantato amílico de potasio en la dosificación correspondiente a cada ensayo, permitiendo un tiempo de acondicionamiento de 10 minutos, con el fin de favorecer la adsorción del reactivo sobre la superficie de las partículas de óxidos de hierro.

**Figura 34.** *Adición del colector mediante un gotero*



*Fuente:* Elaboración propia

A continuación, se incorporó el espumante, manteniendo un tiempo de acondicionamiento de 3 minutos para asegurar la adecuada formación de la espuma.

**Figura 35.** Adición del espumante por medio de gotero



*Fuente:* Elaboración propia

Finalizado el acondicionamiento, se inició la etapa de flotación mediante la inyección de aire, con un tiempo de aireación de 1.5 minutos, durante el cual se promovió la separación de las partículas hidrofóbicas hacia la espuma. El material flotado fue retirado manualmente, separándolo del material no flotado.

**Figura 36.** *Recolección de la espuma con los óxidos de hierro*



*Fuente:* Elaboración propia

Este procedimiento se repitió para cada uno de los ensayos experimentales definidos en el diseño factorial, manteniendo constantes los parámetros operativos y variando únicamente la fracción de sólidos y el pH, con el fin de evaluar su influencia en la eficiencia del proceso.

#### **2.2.3.8. Secado del material**

En el proceso de flotación, el material flotado (concentrado) corresponde principalmente a las partículas portadoras de óxidos de hierro, las cuales no son de interés para el presente estudio. Por el contrario, el material que permanece en la celda de flotación (relave) constituye el producto de interés, ya que corresponde al caolín con menor contenido de impurezas.

Una vez finalizados los ensayos de flotación, se procedió a la recuperación de ambos productos: el concentrado (material flotado) y el relave (material no flotado). Posteriormente, ambos fueron sometidos a un proceso de secado en el horno a temperatura de 100 grados centígrados por 24 horas en la Universidad del Azuay, con el objetivo de eliminar la humedad

y facilitar su posterior conformado de briquetas, las cuales fueron utilizadas para la evaluación de propiedades como color, contracción, absorción, y resistencia.

**Figura 37.** *Secado del material flotado*



*Fuente:* Elaboración propia

#### 2.2.3.9. Elaboración de briquetas

El material seco obtenido de cada ensayo fue enviado al laboratorio de la empresa Itaipis, en la ciudad de Cuenca, para la elaboración de briquetas bajo condiciones controladas.

Las probetas fueron conformadas inicialmente con dimensiones aproximadas de  $500 \times 100 \times 10$  mm, mediante un proceso de prensado que aplicó una presión de 250 bar, garantizando una adecuada compactación del material.

Con el fin de facilitar la identificación y organización de las briquetas elaboradas durante el desarrollo experimental, se estableció un sistema de codificación para cada una de las muestras obtenidas.

La nomenclatura empleada se basó en las iniciales de las autoras del presente trabajo, asignando las letras C, J y A para representar los diferentes grupos de briquetas correspondientes a las fracciones de sólidos evaluadas del 15 %, 25 % y 35 %,

respectivamente. Adicionalmente, los subíndices 1, 2 y 3 fueron utilizados para identificar las condiciones de pH aplicadas en cada ensayo (pH 4, 7 y 9).

De esta manera:

C1, C2 y C3 corresponden a briquetas elaboradas con una fracción de sólidos del 15 %, evaluadas a pH 4, 7 y 9.

J1, J2 y J3 corresponden a briquetas elaboradas con una fracción de sólidos del 25 %, evaluadas a pH 4, 7 y 9.

A1, A2 y A3 corresponden a briquetas elaboradas con una fracción de sólidos del 35 %, evaluadas a pH 4, 7 y 9.

Además, se elaboraron briquetas de referencia:

CJ1: correspondiente al material de alimentación sin tratamiento.

JC1: correspondiente al concentrado obtenido durante la flotación, compuesto principalmente por los óxidos de hierro removidos.

Las briquetas son compactadas y utilizadas para evaluar el comportamiento del caolín antes de su cocción o sinterización. Se utilizaron 90 gramos de caolín por cada unidad, cantidad calculada para garantizar el llenado óptimo y la adecuada según el volumen del molde.

Dimensiones del molde: Se empleó un molde metálico con las siguientes especificaciones:

- Largo: 10 cm
- Ancho: 5 cm
- Espesor: 1 cm

**Figura 38.** Molde para la elaboración de briqueta



*Fuente:* Elaboración propia

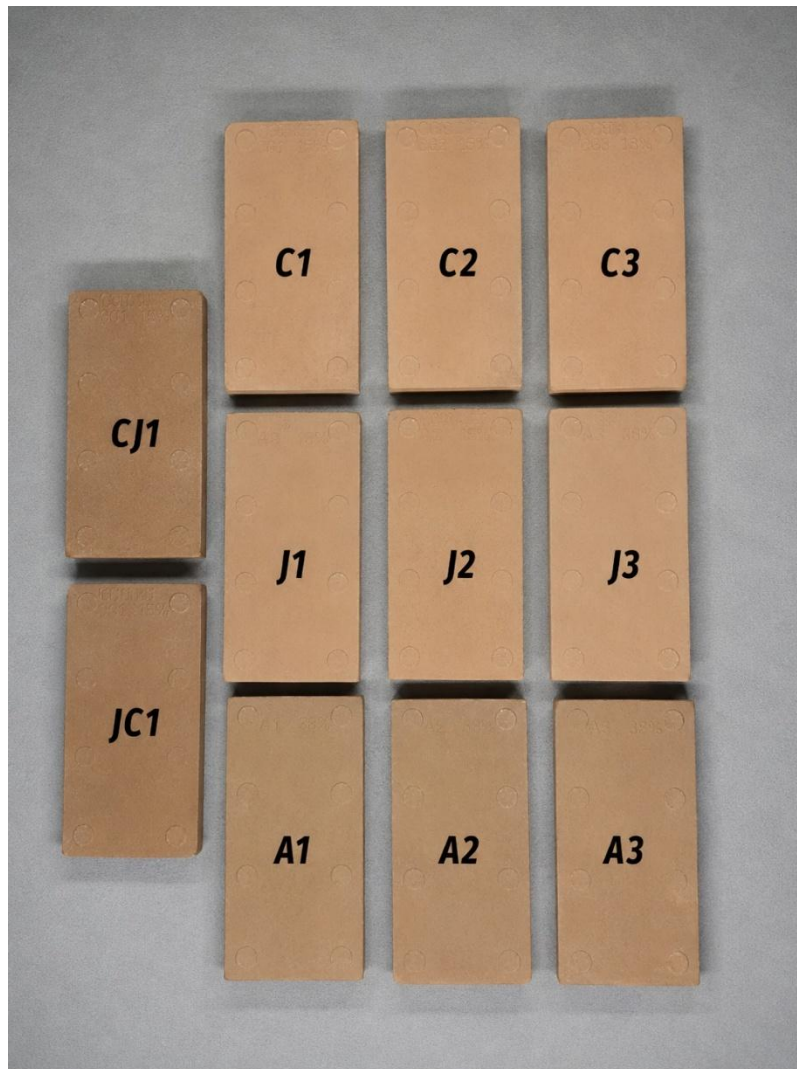
Posteriormente, las briquetas fueron sometidas a un proceso de sinterización en horno industrial, mediante un ciclo térmico con incremento progresivo de temperatura hasta alcanzar los 1172 °C.

El proceso de sinterización del caolín fue desarrollado en varias etapas: una fase inicial de secado y eliminación de humedad entre 100 y 200 °C; seguida por la deshidroxilación, es decir que el material de caolín pierde hidroxilo entre aproximadamente 500 y 700 °C; posteriormente, transformaciones estructurales y formación de fases como la metacaolinita y espinelas entre 800 y 1000 °C; y finalmente, la etapa de sinterización entre 1000 y 1200 °C, donde se reduce la porosidad y se incrementa la resistencia mecánica del material.

Estas etapas se llevan a cabo en condiciones controladas, típicamente en el rango de 3 a 10 °C por minuto, con posibles tiempos de mantenimiento en la temperatura máxima para asegurar la consolidación del material.

Finalmente, las briquetas sinterizadas fueron empleadas para la evaluación de sus propiedades físicas y tecnológicas, tales como color, absorción de agua, contracción y resistencia mecánica.

**Figura 39.** *Briquetas sinterizadas con sus respectivos*



*Fuente:* Elaboración propia

## CAPÍTULO 3

### ANÁLISIS Y RESULTADOS

#### 3.1 Análisis de resultados de quema de briquetas

##### 3.1.1. Color

Las briquetas fueron analizadas según el código de Munsell, un sistema de clasificación cromática que permite especificar los colores de manera objetiva y estandarizada.

El sistema de color Munsell fue desarrollado por el profesor Albert H. Munsell a principios del siglo XX y adoptado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) como sistema oficial para la investigación de suelos en la década de 1930 (Olvera & Hernández, 2014). Este sistema representa un avance significativo en la descripción del color, ya que se basa en mediciones rigurosas de respuestas visuales humanas, colocándolo sobre una firme base científica experimental.

El sistema Munsell organiza los colores en un espacio tridimensional mediante tres atributos independientes:

- **Matiz (Hue o H):** Representa el tono básico del color (rojo, amarillo, verde, azul, púrpura). El círculo de matices se divide en cinco tonos principales: R (rojo), Y (amarillo), G (verde), B (azul) y P (púrpura), junto con cinco tonos intermedios situados a medio camino entre los principales (YR, GY, BG, PB, RP). Cada uno de estos 10 pasos se subdivide en 10 más, permitiendo identificar 100 tonos con valores enteros.
- **Valor (Value o V):** Indica el grado de claridad u oscuridad del color, medido en una escala vertical de 0 (negro absoluto) a 10 (blanco absoluto). Los grises neutrales se ubican en el eje central y se denotan con la letra N seguida del valor numérico (por ejemplo, N 5/ representa un gris medio).

- Croma (Chroma o C): Representa la intensidad o saturación del color, medido radialmente desde el eje central neutro hacia el exterior. Los valores de croma van desde 0 (colores acromáticos o grises) hasta valores que pueden alcanzar 26 en algunos matices altamente saturados.

La notación estándar de Munsell se expresa como H V/C (Matiz Valor/Croma). Este sistema permite obtener descripciones precisas y reproducibles del color, siendo ampliamente utilizado en diversas industrias como cerámica, edafología, geología y control de calidad de materiales. En el caso específico de materiales cerámicos, el análisis mediante el código Munsell permite evaluar objetivamente las variaciones cromáticas producidas por la cocción a diferentes temperaturas y la presencia de impurezas minerales, especialmente óxidos metálicos como los de hierro que afectan significativamente la coloración final del producto.

**Tabla 16. Color**

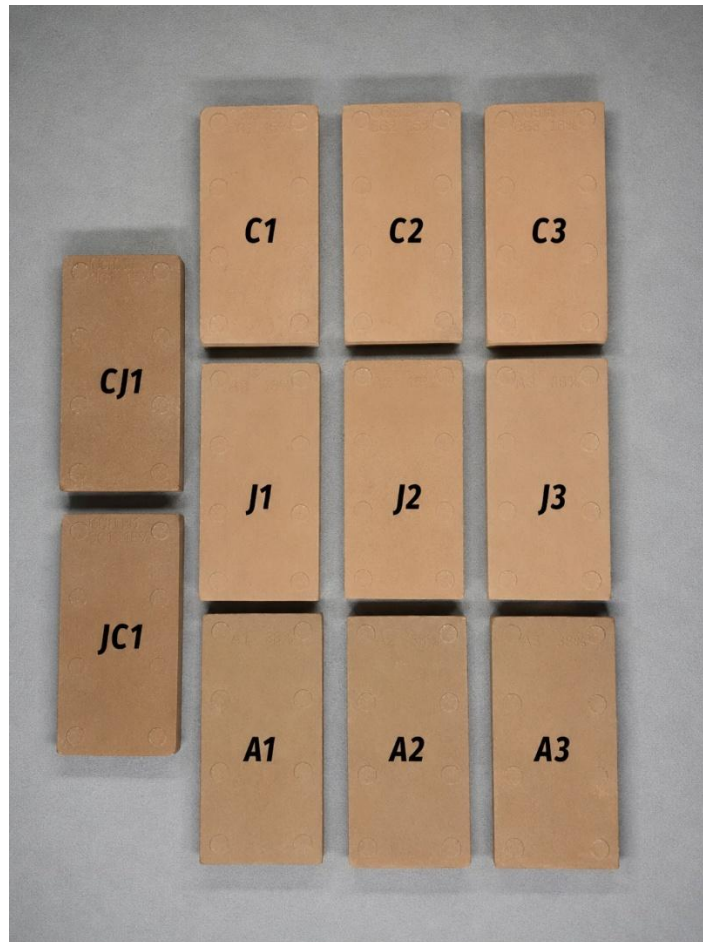
<b>Número de muestras</b>	<b>Código</b>	<b>Color (Munsell)</b>
1	C1	7.5YR 8/3
2	C2	7.5YR 8/3
3	C3	7.5YR 8/3
4	J1	7.5YR 8/4
5	J2	7.5YR 8/4
6	J3	7.5YR 8/4
7	A1	7.5YR 8/3
8	A2	7.5YR 8/3
9	A3	7.5YR 8/3
10	CJ1	5YR 7/6
11	JC1	5YR 7/8

*Fuente:* Elaboración propia.

La determinación del color se realizó mediante comparación visual con la carta de colores Munsell bajo condiciones de iluminación estandarizada.

Las tonalidades más claras (7.5YR) se asocian a materiales con menor contenido de hierro, mientras que las tonalidades más rojizas (5YR) indican mayor presencia de óxidos, lo cual influye directamente en las propiedades estéticas del producto cerámico.

**Figura 40.** *Color de las Briquetas*



*Fuente:* Elaboración propia

### **3.1.2. Contracción**

El ensayo de contracción post-quema se realizó con el objetivo de evaluar la variación dimensional de las briquetas después del proceso de sinterización. Para ello, se midieron las dimensiones iniciales (antes de la quema) y finales (después de la quema), considerando principalmente la longitud de las muestras.

Para calcular la contracción de cocción se utilizó la siguiente fórmula:

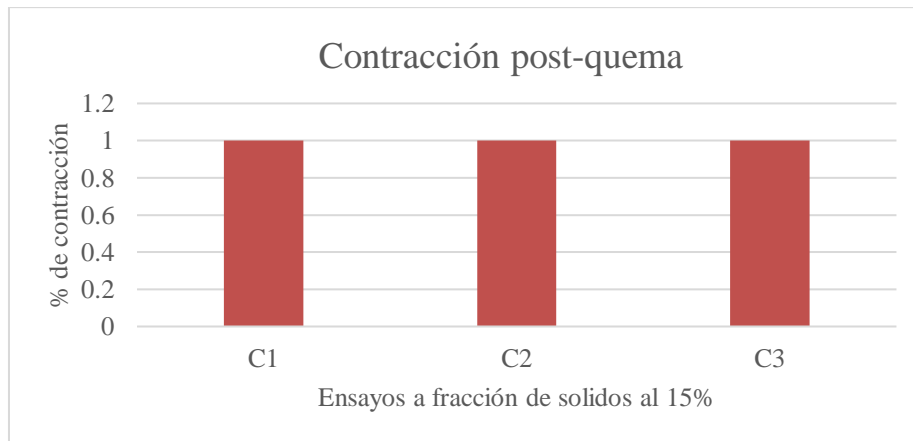
$$\% Clc = \frac{\text{longitud inicial} - \text{longitud final}}{\text{longitud inicial}} * 100$$

**Tabla 17.** Resultados antes y después de la quema

Código	Antes de la quema			Después de la quema			Clc (%)
	A (mm)	L <sub>i</sub> (mm)	E (mm)	L <sub>f</sub> (mm)	A(mm)	E(mm)	
C1	50	100	10	99	49	10	1
C2	50	100	10	99	49	10	1
C3	50	100	10	99	49	10	1
J1	50	100	10	98	49	10	2
J2	50	100	10	98	49	10	2
J3	50	100	10	98	49	10	2
A1	50	100	10	99	49	10	1
A2	50	100	10	99	49	10	1
A3	50	100	10	99	49	10	1
CJ1	50	100	10	99	49	10	1
JC1	50	100	10	97	49	10	3

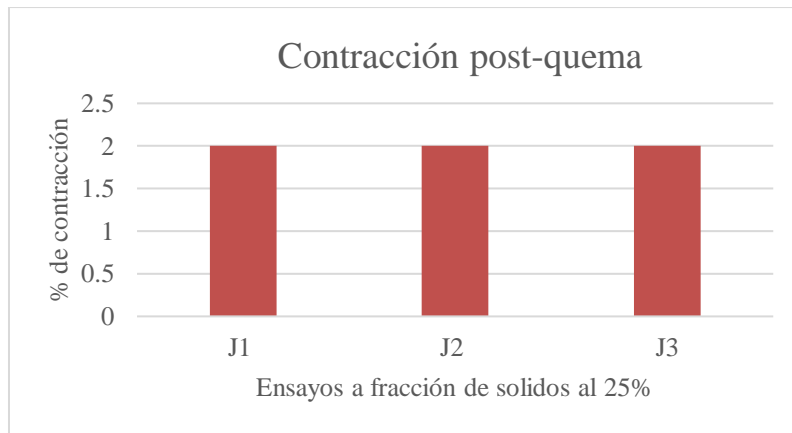
Fuente: Elaboración propia

**Figura 41.** Contracción post-quema de las briquetas obtenidas a una fracción de sólidos al 15 %



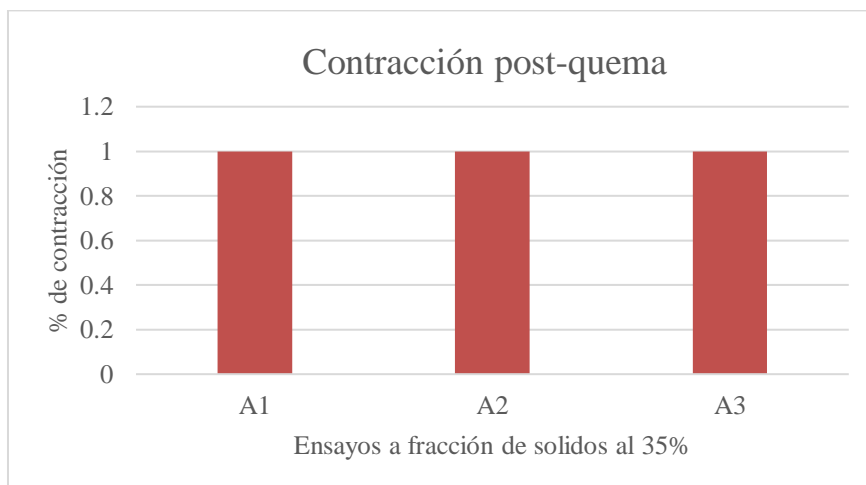
Fuente: Elaboración propia

**Figura 42.** Contracción post-quema de las briquetas obtenidas a una fracción de sólidos al 25 %



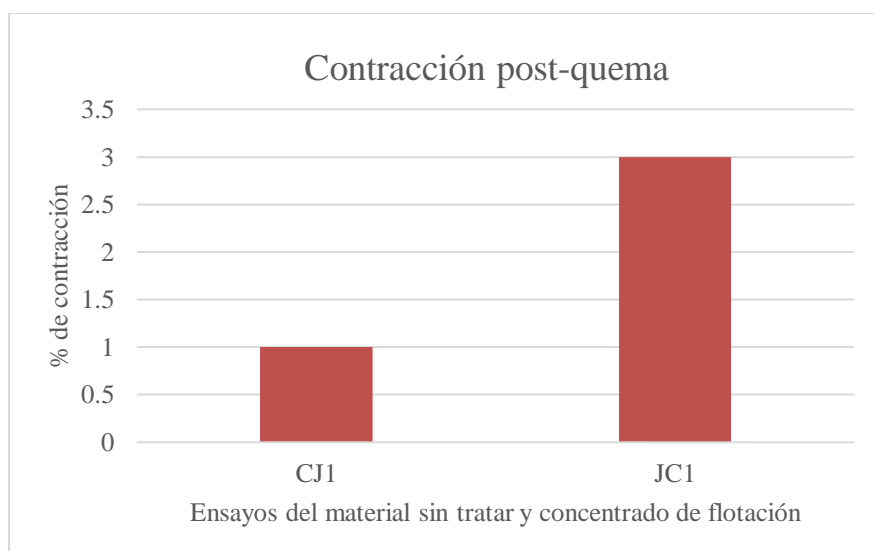
*Fuente:* Elaboración propia

**Figura 43.** *Contracción post-quema de las briquetas obtenidas a una fracción de sólidos al 35 %*



*Fuente:* Elaboración propia

**Figura 44.** *Contracción post-quema de las briquetas del material sin tratar y concentrado de flotación*



*Fuente:* Elaboración propia

Los resultados de contracción post-quema evidencian que las briquetas elaboradas a partir del material tratado (ensayos C1–C2–C3, J1–J2–J3 y A1–A2–A3) presentan valores comprendidos entre 1 % y 2 %, mostrando un comportamiento uniforme independientemente de la fracción de sólidos y del pH empleado durante la flotación. Esto indica que dichas variables no ejercen una influencia significativa sobre la contracción del material durante el proceso de sinterización.

Por otro lado, el material correspondiente al concentrado de flotación, caracterizado por su alto contenido de óxidos de hierro y considerado no apto para el objetivo del estudio, presenta una contracción superior al 3 %. Este comportamiento se da por la presencia de los óxidos de hierro, los cuales actúan como fundentes durante la sinterización, favoreciendo la formación de fase vítrea y promoviendo una mayor reducción del producto final.

A diferencia, el material de interés (caolín blanqueado) presenta una contracción más baja y controlada, lo cual resulta deseable en la industria cerámica, ya que contribuye a la estabilidad dimensional de las piezas y reduce el riesgo de deformaciones o defectos durante la cocción. De acuerdo con la literatura especializada, valores de contracción en el rango de 1

% a 5 % se consideran adecuados, por lo que los resultados obtenidos confirman la idoneidad del material tratado para su aplicación en productos cerámicos.

### **3.1.3. Absorción**

El ensayo de absorción de agua se realizó para determinar la porosidad abierta de las briquetas sinterizadas. Este parámetro es fundamental para evaluar la calidad del material cerámico, ya que la porosidad influye directamente en propiedades como resistencia mecánica, durabilidad y permeabilidad. Se utilizó el método de saturación por ebullición dispuesto en la norma NTE INEN-ISO 10545-3, registrando el peso seco y el peso saturado de cada muestra.

El procedimiento experimental se llevó a cabo siguiendo los siguientes pasos:

- Secado de las muestras: Las briquetas se colocaron en una estufa a  $110 \pm 5$  °C durante 24 horas hasta alcanzar peso constante. Posteriormente, se enfriaron en un desecador y se registró la masa seca ( $m_1$ ).
- Saturación por ebullición: Las muestras secas se sumergieron completamente en agua destilada y se sometieron a ebullición durante 2 horas. Este método permite la impregnación de los poros abiertos que se pueden llenar fácilmente.
- Enfriamiento: Tras la ebullición, las muestras se dejaron enfriar en el mismo recipiente con agua hasta temperatura ambiente durante aproximadamente 4 a 24 horas.
- Pesada saturada: Se retiraron las briquetas del agua, se eliminó el exceso de agua superficial con un paño húmedo, y se registró inmediatamente la masa saturada ( $m_2$ ).

El porcentaje de absorción de agua se calculó mediante:

$$E_w = \frac{m_2 - m_1}{m_1} * 100\%$$

$E_w$  = % de absorción de agua

$m_1$  = masa de la briqueta seca (g)

$m_2$  = masa de la briqueta saturada con agua

$$E_w = \frac{m_2 - m_1}{m_1} * 100\%$$

$E_w$  = % de absorción de agua

$m_1$  = masa de la briqueta seca (g)

$m_2$  = masa de la briqueta saturada con agua

Estos datos se obtienen mediante el método de ebullición dispuesta de la norma NTE INEN-ISO 10545-3.

La norma NTE INEN-ISO 10545-3 establece los métodos de ensayo para determinar la absorción de agua, la porosidad abierta, la densidad relativa aparente y la densidad aparente de materiales cerámicos. El método de ebullición permite la impregnación de los poros abiertos accesibles al agua y se utiliza principalmente para la caracterización y clasificación de productos cerámicos.

La absorción de agua es una medida de la mayor o menor porosidad interna del soporte cerámico y se expresa como el porcentaje de agua absorbida respecto a la masa en seco de las piezas. Valores bajos de absorción indican una mayor densificación del material y, en consecuencia, mejores propiedades mecánicas y mayor durabilidad.

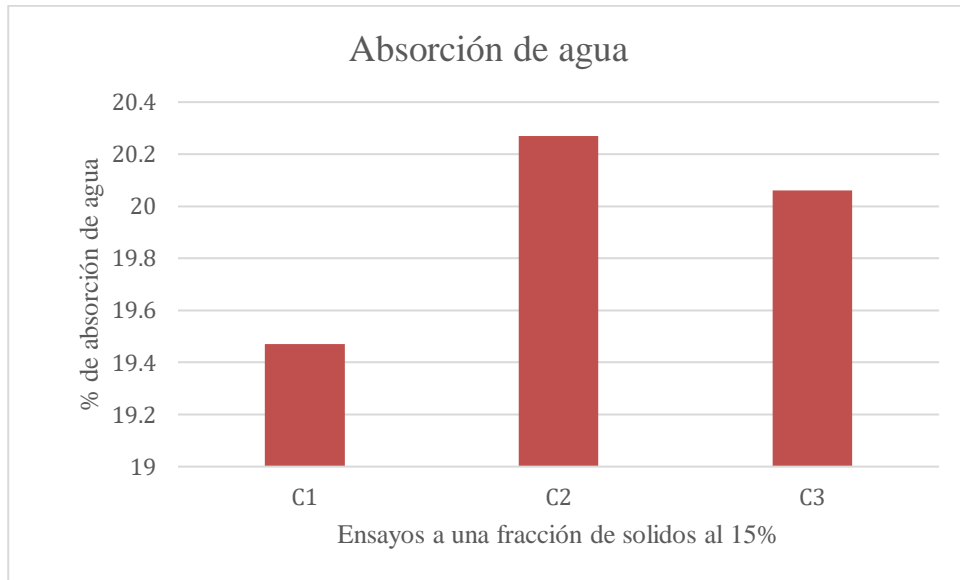
**Tabla 18.** *Resultados de la absorción de agua*

Número de muestras	Código	$m_1$ (g)	$m_2$ (g)	$E_w$ (%)
1	C1	81.1899	97	19.47
2	C2	80.6514	97	20.27
3	C3	80.7905	97	20.06
4	J1	78.2320	96	22.71
5	J2	78.1103	96	22.90
6	J3	78.0049	96	23.06
7	A1	81.0964	96	18.37
8	A2	78.7462	96	21.91

9	A3	79.5970	96	20.60
10	CJ1	80.6926	96	18.97
11	JC1	77.6505	94	21.05

*Fuente:* Elaboración propia

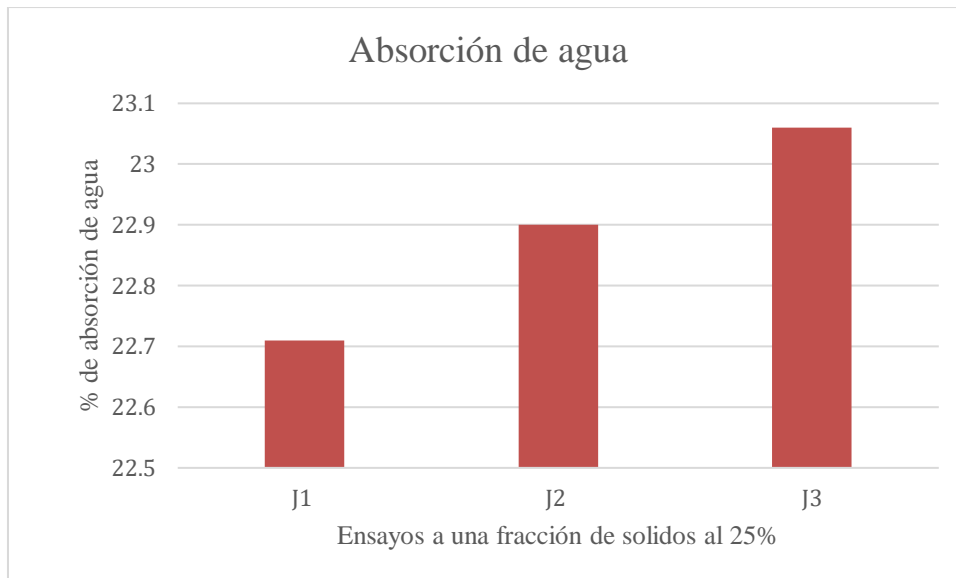
**Figura 45.** Absorción de agua de las briquetas obtenidas a una fracción de sólidos al 15 %



*Fuente:* Elaboración propia

En la figura 45 se observa que a una fracción de sólidos del 15 %, los valores de absorción de agua se mantienen alrededor del 20 %, evidenciando una porosidad moderada y un comportamiento relativamente uniforme entre los ensayos.

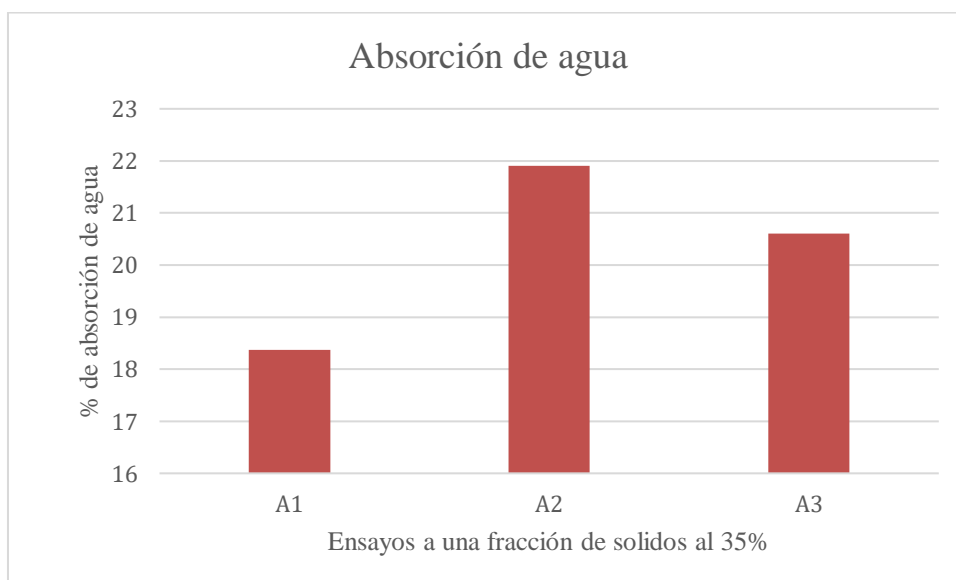
**Figura 46.** Absorción de agua de las briquetas obtenidas a una fracción de sólidos all 25 %



**Fuente:** Elaboración propia

En la figura 46 se observa que a una fracción de sólidos del 25 %, se registran los valores más altos de absorción de agua, alcanzando aproximadamente el 23 %. Este resultado indica una mayor porosidad en comparación con los otros grupos, lo cual podría asociarse a una estructura interna menos compacta.

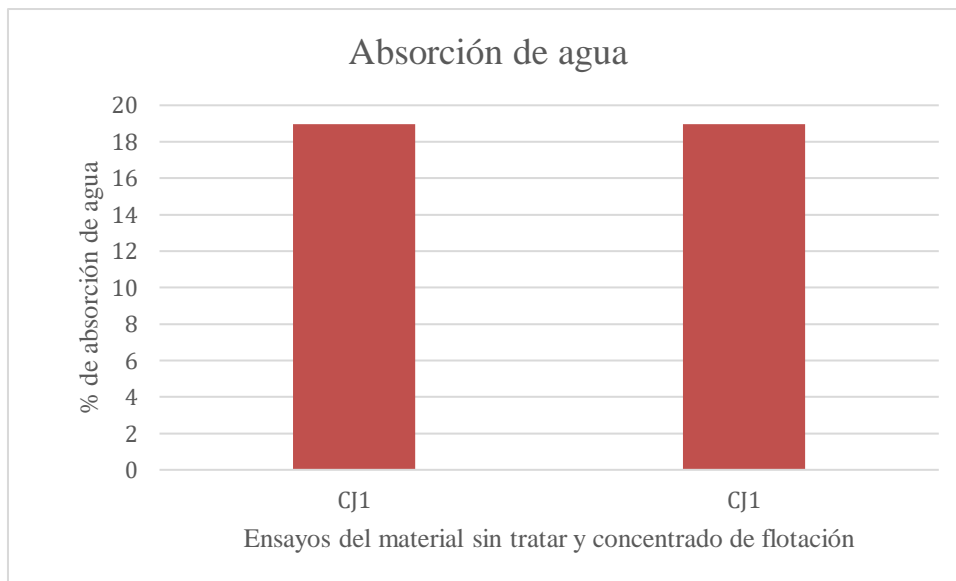
**Figura 47.** Absorción de agua de las briquetas obtenidas a una fracción de sólidos al 35 %



**Fuente:** Elaboración propia

En la figura 47 se observa que a una fracción de sólidos del 35 %, los valores de absorción de agua presentan una variación significativa en función del pH. Se observa que el mayor valor de absorción se obtiene a pH 7, lo que indica una mayor porosidad del material bajo condiciones neutras. A diferencia, el menor valor se registra a pH 4, evidenciando una mejor densificación relativa del material sinterizado en condiciones cercanas a la neutralidad.

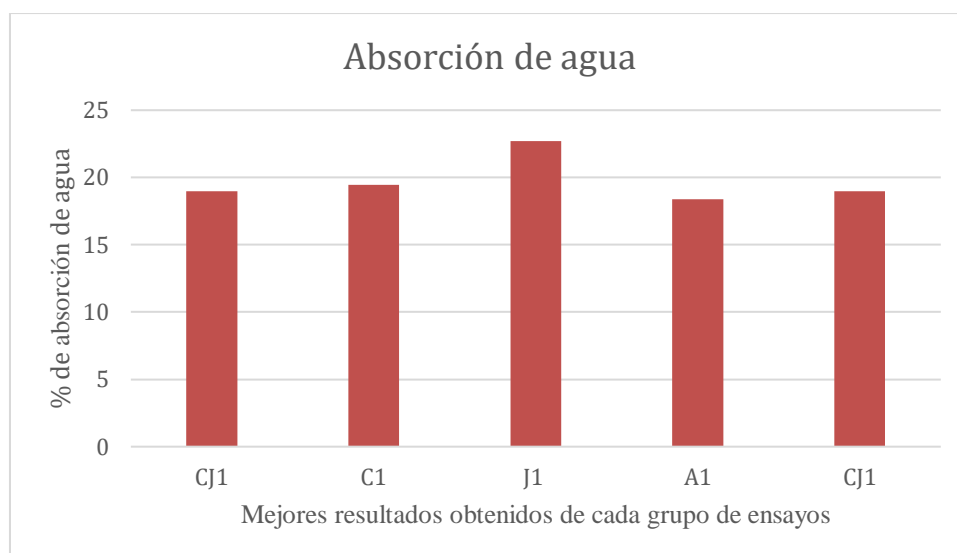
**Figura 48.** *Absorción de agua de las briquetas del material sin tratar y concentrado de flotación*



**Fuente:** Elaboración propia

En la figura 48 se observa la comparación de los resultados obtenidos con el material sin tratar y el concentrado proveniente del proceso de flotación. El material sin tratamiento presenta una absorción de agua del 19 %, mientras que el concentrado de óxidos alcanza un valor de 21 %, evidenciando una mayor porosidad en este último.

**Figura 49.** *Comparación de absorción de agua entre el material sin tratar, los ensayos de flotación (C, J y A) con los mejores resultados y el concentrado de óxidos.*



**Fuente:** Elaboración propia

En la figura 49 los resultados muestran que el ensayo A1 (35 % de sólidos) presenta la menor absorción de agua con un valor de 18,37 %, incluso inferior al material sin tratar (18,37 %), lo que evidencia una mejora en la densificación del material. Por otro lado, el ensayo C1 (15 %) presenta un valor ligeramente superior (19,47 %), mientras que J1 (25 %) alcanza la mayor absorción (22,71 %), indicando un comportamiento menos favorable en esta condición.

En general, se observa que el pH 4 constituye la condición más favorable para la reducción de la absorción de agua, mientras que la fracción de sólidos influye significativamente en el resultado final, siendo el 35 % la condición que presenta el mejor comportamiento.

### 3.1.4. Resistencia a la flexión

El ensayo de resistencia a la flexión se realizó con el fin de determinar la capacidad mecánica de las briquetas sinterizadas. Se empleó el método de tres puntos, conforme a la normativa correspondiente, registrando la carga de rotura aplicada a cada muestra.

Se registra la presión en psi de la maquina y se le multiplica por el área del contacto de la briqueta para calcular la fuerza

$$F = P * Area\ de\ contacto$$

$P$  = presión (psi)

Los datos de obtiene mediante el ensayo a la resistencia a la flexión dispuesta por la norma NTE-ENEN-ISO-4. Se empleó el método de tres puntos conforme a la norma NTE ENEN-ISO 10545-4, la cual establece los procedimientos para la determinación del módulo de rotura y la resistencia a la flexión en baldosas cerámicas y materiales similares. Este método es ampliamente utilizado en la caracterización de materiales cerámicos debido a su simplicidad y reproducibilidad.

El procedimiento experimental se llevó a cabo siguiendo los siguientes pasos:

- Preparación de las muestras: Las briquetas sinterizadas se inspeccionaron visualmente para verificar la ausencia de defectos superficiales evidentes como grietas, fisuras o irregularidades que pudieran afectar los resultados. Se registraron las dimensiones de cada muestra: longitud (L), ancho (b) y espesor (h) utilizando un calibrador digital con precisión de  $\pm 0.01$  mm.
- Configuración del equipo: Se utilizó una máquina universal de ensayos equipada con un dispositivo de carga de tres puntos. La configuración consistió en:  
Dos apoyos inferiores separados a una distancia (l) correspondiente a la luz de ensayo.  
Un punto de aplicación de carga ubicado en el centro de la muestra, equidistante de los apoyos  
La velocidad de aplicación de carga se estableció en un rango constante según la norma (generalmente  $1 \pm 0.5$  N/s)

- Colocación de la muestra: Cada briqueta se colocó cuidadosamente sobre los apoyos inferiores, asegurando que la superficie de ensayo quedara perpendicular al punzón de carga. Se verificó el alineamiento correcto para garantizar que la carga se aplicara de manera uniforme.
- Aplicación de la carga: Se aplicó una carga gradual y continua en el centro de la muestra mediante el punzón superior hasta que ocurrió la rotura. El sistema registró automáticamente la carga máxima de rotura (F) en el momento de la falla del material.
- Registro de datos: Se registró la presión máxima alcanzada en la máquina de ensayos (expresada en psi) y el área de contacto del punzón con la briqueta. La fuerza de rotura (F) se calculó multiplicando la presión registrada por el área de contacto.

La resistencia a la flexión se calculó mediante la siguiente ecuación

$$R = \frac{3FL}{2b(h^2)}$$

F= carga de rotura (N)

L = distancia entre las barras de soporte (mm)

b = ancho de la baldosa (mm)

h = espesor mínimo de la baldosa (mm)

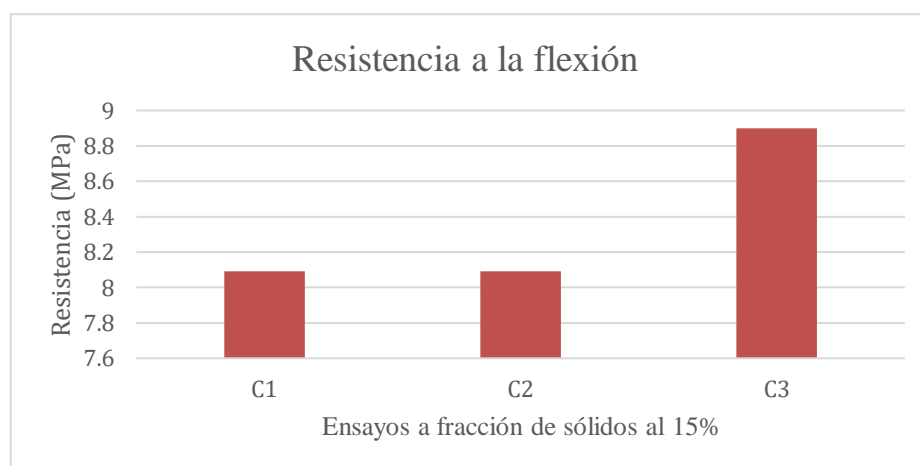
**Tabla 19.** Resultados de la resistencia a la flexión

Número de muestras	Código	Largo (mm)	b (mm)	Presión (psi)	F (N)	h (mm)	L (mm)	R (Mpa)
1	C1	99	49	10	334.46	10	79	8.09
2	C2	99	49	10	334.46	10	79	8.09
3	C3	99	49	11	367.91	10	79	8.90
4	J1	98	49	45	1489.89	10	78	35.57
5	J2	98	49	45	1489.89	10	78	35.57
6	J3	98	49	40	1324.35	10	78	31.62

7	A1	99	49	11	367.91	10	79	8.88
8	A2	99	49	25	836.16	10	79	20.22
9	A3	99	49	17	568.60	10	79	13.75
10	CJ1	99	49	20	668.93	10	79	16.18
11	JC1	97	49	40	1310.83	10	77	30.88

*Fuente:* Elaboración propia

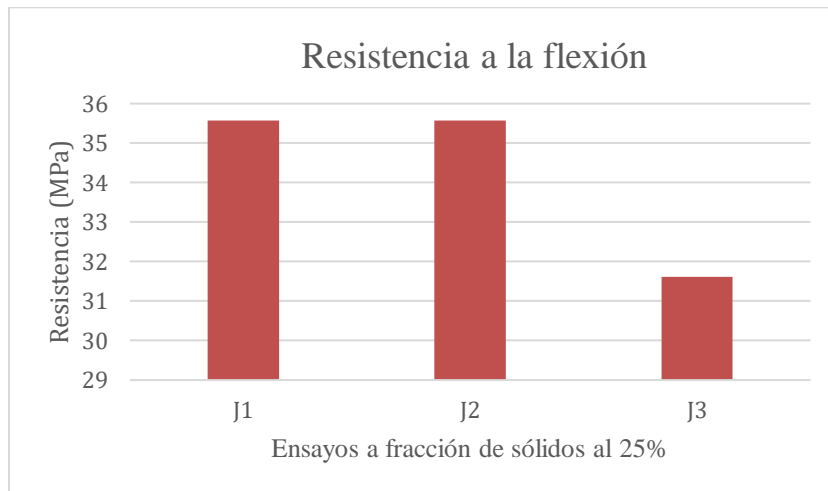
**Figura 50.** Resistencia a la flexión de las briquetas obtenidas para una fracción de sólidos al 15%



*Fuente:* Elaboración propia

En la figura 50 se observa que a una fracción de sólidos del 15 %, se observa que la resistencia a la flexión varía en función del pH, evidenciándose mejores resultados en condiciones alcalinas, particularmente alrededor de pH 9. Este comportamiento se atribuye a una mayor eficiencia del proceso de flotación en dicho rango, donde el colector actúa de manera más efectiva, permitiendo una mejor remoción de óxidos de hierro. Como consecuencia, el material obtenido presenta una mayor pureza, favoreciendo su densificación durante la sinterización y aumentando su resistencia mecánica.

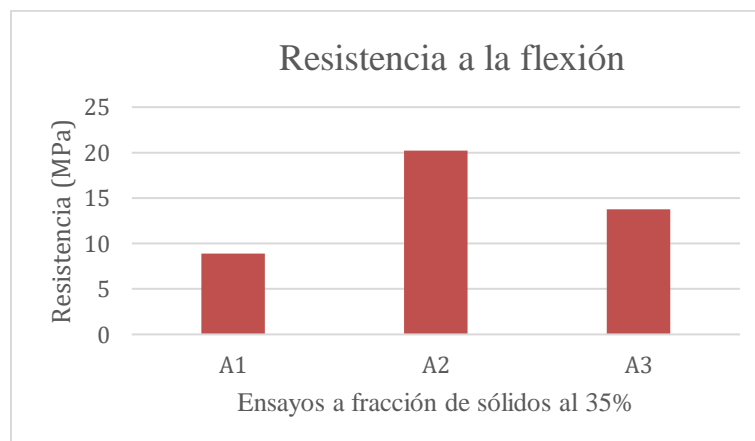
**Figura 51.** Resistencia a la flexión de las briquetas para una fracción de sólidos al 25 %



**Fuente:** Elaboración propia

En la figura 51 se observa que a una fracción de sólidos del 25 %, se obtienen los mayores valores de resistencia a la flexión en condiciones de pH ácido a neutro (pH 4 y 7), mientras que a pH 9 se evidencia una ligera disminución en la resistencia. Este comportamiento sugiere que, si bien el medio alcalino favorece la acción del colector, un pH excesivamente alto puede reducir la selectividad del proceso de flotación, afectando la adecuada separación de impurezas.

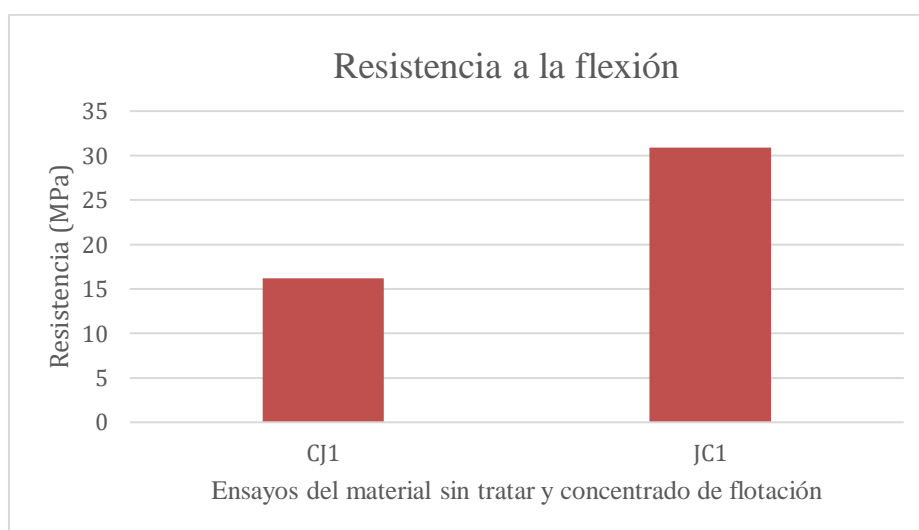
**Figura 52.** Resistencia a la flexión de las briquetas obtenidas para una fracción de sólidos al 35%



**Fuente:** Elaboración propia

En la figura 52 se observa que a una fracción de sólidos del 35 %, se observa que los mejores valores de resistencia se alcanzan a pH 7, seguidos por pH 9. En este caso, la alta concentración de sólidos genera una pulpa más viscosa, lo que dificulta la dispersión de los reactivos y la interacción con las burbujas. Bajo estas condiciones, un pH neutro permite un mejor equilibrio entre la actividad del colector y la selectividad del proceso, mientras que a pH 9.

**Figura 53.** Resistencia a la flexión de las briquetas del material sin tratar y concentrado de flotación.



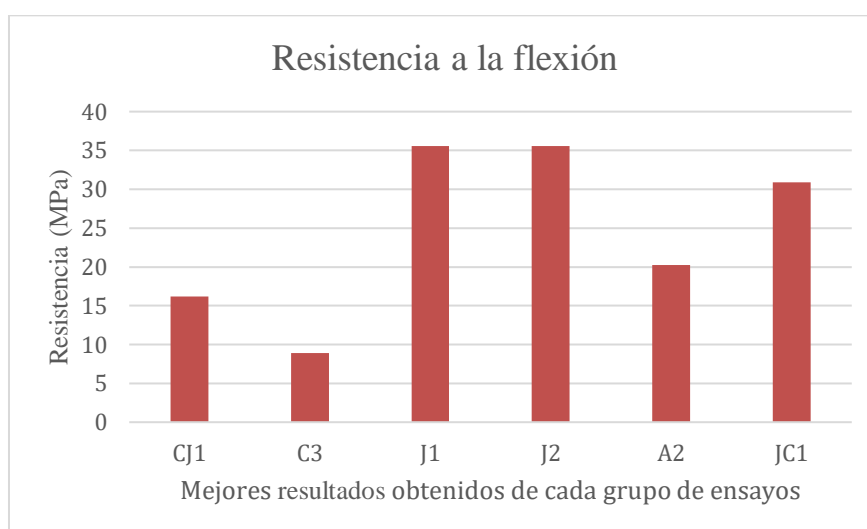
*Fuente:* Elaboración propia

El material original sin tratamiento presentó una resistencia a la flexión de aproximadamente 16.18 MPa, lo que refleja la presencia significativa de óxidos de hierro y otras impurezas que afectan la sinterización y la cohesión interna del material cerámico. Este valor sirve como referencia para evaluar la eficiencia del proceso de flotación en la mejora de las propiedades mecánicas.

Por otro lado, el concentrado que corresponde al material eliminado durante la flotación y que contiene principalmente óxidos de hierro presentó una resistencia de 30.88

MPa, superior a la del material sin tratar. Aunque el concentrado presenta una resistencia mayor, este material no es adecuado para aplicaciones cerámicas, ya que su composición impide la obtención de tonalidades claras.

**Figura 54.** Comparación de la resistencia a la flexión entre el material sin tratar, los ensayos de flotación (C, J y A) con los mejores resultados y el concentrado de óxidos.



**Fuente:** Elaboración propia

La Figura 54 muestra la comparación de la resistencia a la flexión entre el material sin tratar, los mejores resultados obtenidos en cada grupo de ensayos (C, J y A) y el concentrado de óxidos. Se observa que el material sin tratamiento presenta la menor resistencia a comparación de los ensayos con el material tratado, lo que evidencia el efecto negativo de las impurezas, principalmente óxidos de hierro, sobre las propiedades mecánicas del caolín.

A diferencia, los ensayos sometidos a flotación presentan una mejora significativa en la resistencia, destacándose especialmente la fracción de sólidos del 25 %, la cual alcanza los valores más altos, en condiciones de pH entre 4 y 7. Este comportamiento confirma que la optimización conjunta de la fracción de sólidos y el pH permite obtener un material más

limpio, con mejor densificación durante la sinterización y, por tanto, mejores propiedades mecánicas.

Por otro lado, el concentrado de óxidos presenta una resistencia alta de 30.88 MPa; sin embargo, este material no es apto para aplicaciones cerámicas debido a su alto contenido de hierro, el cual afecta negativamente propiedades como el color y el comportamiento del producto final.

En conjunto, los resultados demuestran que el proceso de flotación inversa es efectivo para mejorar la calidad del caolín, siendo la condición de 25 % de sólidos y pH de 4 y 7 la más favorable para obtener un material con propiedades mecánicas superiores y adecuado para su uso en la industria cerámica.

## CONCLUSIONES

La caracterización mineralógica de la muestra de caolín mediante difracción de rayos X evidenció una composición dominada por caolinita (57,2 %) y cuarzo (36,9 %), con menores proporciones de oligoclasa (2,9 %) y gibbsita (3,0 %). Esta composición confirma que el material posee potencial de aprovechamiento cerámico, aunque requiere procesos de purificación para reducir el efecto negativo de las impurezas asociadas, particularmente los óxidos de hierro.

Los ensayos de caracterización física permitieron clasificar el material como un limo inorgánico de baja plasticidad, a partir de un límite líquido de 30,4 %, límite plástico de 26,62 % e índice de plasticidad de 3,78 %. Estos resultados proporcionan una base técnica para comprender su comportamiento durante el conformado, prensado y sinterización de briquetas cerámicas.

El diseño experimental factorial 3×3, aplicado a nueve ensayos de flotación espumante, permitió evaluar de manera sistemática la influencia del pH de la pulpa (4, 7 y 9) y de la fracción de sólidos (15 %, 25 % y 35 %) sobre la calidad del caolín tratado. El uso de xantato amílico de potasio (Z-6) como colector y XF-250 como espumante permitió desarrollar un proceso de separación orientado a remover las impurezas férricas presentes en el material.

Los resultados de resistencia a la flexión demostraron que el tratamiento por flotación mejoró el comportamiento mecánico del caolín respecto al material sin tratar, cuya resistencia fue de aproximadamente 16,18 MPa. Las mayores resistencias se registraron en los ensayos correspondientes a 25 % de sólidos, especialmente en condiciones de pH 4 y 7, evidenciando que esta combinación favorece una mejor purificación del material y una mayor densificación durante la sinterización.

El análisis de absorción de agua mostró que el ensayo A1, realizado con 35 % de sólidos y pH 4, presentó el valor más bajo de absorción, con 18,37 %, incluso inferior al material sin tratar. Este resultado indica una mejora en la densificación y una reducción de la porosidad abierta del producto cerámico obtenido bajo dicha condición. En contraste, los ensayos con 25 % de sólidos presentaron absorciones próximas al 23 %, reflejando un comportamiento menos favorable desde el punto de vista de la porosidad.

La contracción post-quema de las briquetas elaboradas con caolín tratado se mantuvo en un rango relativamente uniforme de 1 % a 2 %, independientemente de la condición experimental aplicada. Este comportamiento es favorable para aplicaciones cerámicas, ya que contribuye a conservar la estabilidad dimensional de las piezas durante la cocción. Por el contrario, el concentrado de óxidos presentó una contracción superior al 3 %, asociada a su mayor contenido de impurezas y a su posible acción fundente durante la sinterización.

El concentrado de óxidos separado durante el proceso de flotación alcanzó una resistencia elevada, cercana a 30,88 MPa; sin embargo, su alto contenido de hierro limita su uso en aplicaciones cerámicas blancas o de alta exigencia estética, debido al efecto desfavorable sobre el color final del producto. Este resultado confirma que la flotación logró separar una fracción enriquecida en impurezas metálicas del caolín purificado.

En términos generales, la flotación espumante demostró ser una alternativa técnicamente viable para mejorar la calidad del caolín destinado a la industria cerámica. Los resultados indican que el proceso contribuye a disminuir el efecto de los óxidos de hierro y a mejorar propiedades tecnológicas relevantes, como la resistencia mecánica, la estabilidad dimensional y, bajo determinadas condiciones, la reducción de la absorción de agua.

La investigación permite concluir que no existe una única condición experimental óptima para todos los parámetros evaluados. Mientras que la condición de 25 % de sólidos y pH 4–7 presenta el mejor desempeño en términos de resistencia mecánica, la condición de 35

% de sólidos y pH 4 resulta más favorable para disminuir la absorción de agua. Por ello, la selección de la condición operativa debe depender del objetivo industrial prioritario del producto cerámico a desarrollar.

## RECOMENDACIONES

Incorporar análisis químicos cuantitativos del contenido de hierro antes y después de la flotación, mediante técnicas como fluorescencia de rayos X (FRX), absorción atómica (AAS) o métodos equivalentes. Esto permitiría demostrar de manera directa el grado real de remoción de impurezas férricas y respaldar con mayor solidez el objetivo central de la investigación.

Calcular indicadores metalúrgicos específicos del proceso, tales como recuperación de hierro en el concentrado, eficiencia de separación, razón de concentración y balance de masa. Estos parámetros permitirían evaluar objetivamente la eficiencia de la flotación y comparar el desempeño de cada condición experimental.

Complementar la evaluación visual del color de las briquetas con mediciones instrumentales de blancura o colorimetría, por ejemplo, mediante parámetros  $L^*a^*b^*$ . Esta recomendación es especialmente pertinente, considerando que la principal justificación del estudio es la reducción de impurezas que afectan la tonalidad del caolín para usos cerámicos.

Ampliar el diseño experimental incorporando variables adicionales que pueden influir en la flotación, tales como tiempo de acondicionamiento, velocidad de agitación, tiempo de aireación, dosificación del colector, dosificación del espumante y tipo de regulador de pH. El uso de un diseño estadístico ampliado permitiría identificar interacciones entre variables y optimizar con mayor precisión el proceso.

Realizar réplicas experimentales de los ensayos más representativos y aplicar análisis estadístico de los resultados, con el fin de verificar la reproducibilidad de las tendencias observadas y fortalecer la confiabilidad de las conclusiones obtenidas. Esta recomendación es especialmente relevante en estudios donde pequeñas variaciones de pH o porcentaje de sólidos pueden modificar la respuesta del proceso.

Desarrollar pruebas de sinterización a diferentes temperaturas, dentro de rangos técnicamente adecuados para productos cerámicos, a fin de determinar la influencia conjunta de la flotación y la temperatura de cocción sobre la absorción, contracción y resistencia a la flexión. Esto permitiría definir con mayor precisión la aptitud del caolín purificado para aplicaciones específicas como porcelana, gres o revestimientos.

Evaluar el posible aprovechamiento del concentrado de óxidos de hierro generado como subproducto, considerando aplicaciones alternativas tales como pigmentos minerales, aditivos para materiales de construcción o materias primas en procesos industriales compatibles. Esta línea contribuiría a un enfoque de economía circular y valorización integral de los productos generados durante el tratamiento.

Ejecutar estudios de escalamiento a nivel piloto, tomando como referencia las condiciones que presentaron mejor desempeño según el parámetro de interés. Este paso permitiría analizar la viabilidad técnica y económica de implementar la flotación espumante como alternativa de purificación de caolines en el contexto de la industria cerámica nacional.

## REFERENCIAS

(s.f.).

911Metallurgist. (s.f.). *Flotation Reagents: Uses and Advantages in Ore Processing*. Obtenido de 911Metallurgist: <https://www.911metallurgist.com/blog/flotation-reagents-in-ore-processing/>

Abarca, J. (2011). *Flotación de Minerales*. Obtenido de scribd: <https://es.scribd.com/document/955129048/Flotacion-Concentracion-de-Minerales-Flo>

Aparicio, P., & Galán, E. (2006). MATERIAS PRIMAS PARA LA INDUSTRIA CERÁMICA. Obtenido de [https://www.researchgate.net/publication/233911019\\_Materias\\_primas\\_para\\_la\\_industria\\_ceramica](https://www.researchgate.net/publication/233911019_Materias_primas_para_la_industria_ceramica)

Bartolomé, J. (1997). El Caolín: composición, estructura, génesis y aplicaciones. (S. e. vidrio, Ed.) *Boletín de la sociedad española de cerámica y vidrio*. Obtenido de <https://studylib.es/doc/5996355/el-cao1%C3%ADn--composici%C3%B3n--estructura--g%C3%A9nesis-y-aplicaciones?p=5>

Bautista Domínguez, P. (2020). *Dosificación de materias primas locales para la elaboración de ladrillos refractarios*. Cuenca : Universidad del Azuay.

Bravo, A. (2004). *Man. de Flotación M*. Obtenido de academia.edu: [https://www.academia.edu/11361321/Man\\_de\\_Flotaci%C3%B3n\\_M\\_2004](https://www.academia.edu/11361321/Man_de_Flotaci%C3%B3n_M_2004)

Bustamante, O., Gaviria, A. C., & Restrepo, O. (2008). *Concentración de mineral*. Medellín: Instituto de Minerales CIMEX, Facultad de Minas, Escuela de Materiales, Universidad Nacional de Colombia. Obtenido de <https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/doc13.pdf>

Carmiña, V. Z., Karen, M. S., Emilse, G. S., Alvaro, G. S., Diana, M. S., Sergio, C. R., & Fredy, G. S. (2018). Propiedades fisicoquímicas del Zinc y funciones catalíticas, estructurales y reguladoras, inmunológicas, celulares y neurológicas. (U. d. Atlántico, Ed.) *Repositorio Uniatlántico*, 11. Obtenido de <https://repositorio.uniatlantico.edu.co/bitstream/handle/20.500.12834/1078/Generalidades+del+zinc+y+su+importancia+en+la+gestaci%C3%B3n+.pdf?sequence=1>

Curi, A., Lima, H., & Sousa, W. (2016). Las Zeolitas y su Aplicación en la Descontaminación de Efluentes Mineros. *Scielo*, 17(Nº6-2006), 111-118. Obtenido de [https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-07642006000600017](https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642006000600017)

Cytec. (2002). Manual de productos químicos para minería.

Díaz, J., Guillén, J. L., Moisés, M., Martínez, J. A., & Moraño, A. (2011). EL CAOLIN Y LA ARENA SILICEA COMO MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN. UNIVERSIDAD

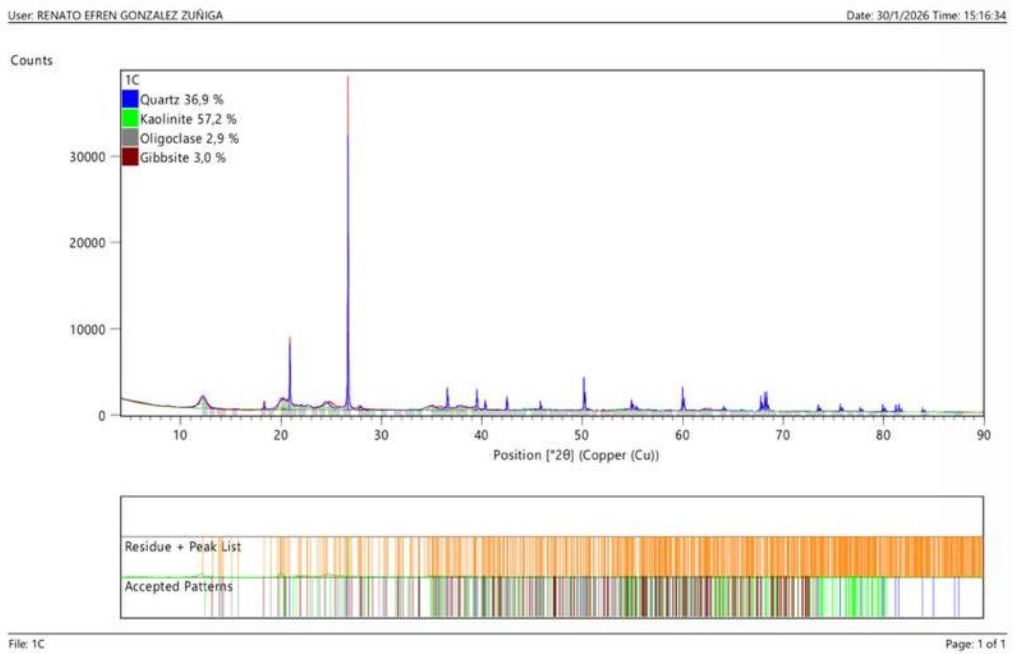
- POLITÉCNICA DE MADRID. Obtenido de [https://oa.upm.es/13103/1/INVE\\_MEM\\_2011\\_109435.pdf](https://oa.upm.es/13103/1/INVE_MEM_2011_109435.pdf)
- Díaz, L., & Torrecillas, R. (2002). Arcillas cerámicas: una revisión de sus distintos tipos, significados y aplicaciones. (S. E. Vidrio, Ed.) *Bolín de la SOCIEDAD ESPAÑOLA de Cerámica y Vidrio*, 4, 459. Obtenido de <https://digital.csic.es/handle/10261/4676>
- Elsevier Ltd. (2019). *Uso y funcionalidad de la cal en la flotación sulfurados: una revisión*.
- Elzea, J., Trivedi, N., Barker, J., & Krukowski, S. (2009). *Industrial Minerals & Rocks* (Vol. 7). Metallurgy, and Exploration. All rights reserved. Electronic edition published.
- Lema, G. (2018). *Estudio del aprovechamiento de minerales arcillosos del Ecuador en la elaboración de barbonitas para uso en el sector cerámico artesanal*. Quito.
- Loayza, J. (2022). *Selección de tamaño de partícula y colector para maximizar la recuperación metalúrgica de oro en flotación espumante en la veta San Alfonso de la mina Promine, Camilo Ponce Enríquez-Azuay*. Obtenido de <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/12513/1/18040.pdf>
- Mata, P. (2010). *Reducción de impurezas en el mineral caolín del municipio de agua blanca de Iturbide, Hidalgo; por flotación inversa y asentamiento*. Obtenido de <http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/jspui/bitstream/231104/4163/1/AT15200.pdf>
- Medinaceli, R. (2016). ESTUDIO TÉCNICO Y ECONÓMICO DE LA EXPLOTACIÓN DEL YACIMIENTO DE CAOLÍN PERTENECIENTE A LA CARRERA DE INGENIERIA EN MINAS, PETRÓLEOS Y GEOTECNIA DE LA U.T.O. Obtenido de [http://www.scielo.org.bo/pdf/mamym/n1/n1\\_a05.pdf](http://www.scielo.org.bo/pdf/mamym/n1/n1_a05.pdf)
- Meijuan Chen, T. Y., Zhang, Y., Zhao, L., Jinghan, Z., Li, R., Huang, Y. G., & Wu, J. (2023). The Application of Mineral Kaolinite for Environment Decontamination: A Review. *Catalysts*, 12(1). Obtenido de <https://www.mdpi.com/2073-4344/13/1/123>
- Muñoz, A. (2010). *Blanqueo de caolines de la unión de Antioquia usando métodos hidro-electrometalúrgicos*. Medellin. Obtenido de <https://bffrepositorio.unal.edu.co/server/api/core/bitstreams/245d82a9-b4a7-4679-98df-8f9be0a1ba8f/content>
- Naranjo, D. (2012). *FLOTACION DIRECTA DE ORO NATIVO GRUESO, COMO SUBSTITUTO DE LA AMALGAMACIÓN TRADICIONAL*. Obtenido de <https://bffrepositorio.unal.edu.co/server/api/core/bitstreams/9834fd42-6a8d-417f-beb7-652b79ecd9f9/content>
- Ningbo Inno Pharmchem Co., Ltd. (s.f.). *Comprender el Ajuste de pH con Hidróxido de Sodio: Beneficios Industriales y Oportunidades de Suministro*. Obtenido de <https://www.nbinno.com/es/ARTICULO/agentes-para-tratamiento-de-agua/compreesion-ajuste-ph-hidroxido-sodio-beneficios-industriales-proveedor-chino>

- Olvera, P., & Hernández, L. (2014). El caolín y sus aplicaciones industriales. *Pädi, Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingeniería*. Obtenido de <https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/icbi/n2/e1.html>
- Pavez, O. (2013). *Apuntes-Concentración de minerales 1*. Obtenido de studocu: <https://www.studocu.com/pe/document/universidad-nacional-daniel-alcides-carrion/ingenieria-metalurgica/apuntes-de-concentracion-de-minerales-i-opavez-11ago13/66004419>
- QuimiNet. (24 de Septiembre de 2012). Obtenido de QuimiNet: <https://www.quiminet.com/articulos/los-usos-y-aplicaciones-mas-comunes-del-caolin-2851561.htm>
- Sánchez, J., & Díaz, J. (2011). *Introducción a los Hornos utilizados en la industria cerámica tradicional*. Universidad Francisco De Paula Santander. Obtenido de <https://repositorio.ufps.edu.co/entities/publication/80217457-0c67-4778-8b11-eebe66e2198e>
- Solis, R., & Amanda, Y. (2021). Obtenido de <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/11246/1/16783.pdf>
- Torres, M. (2022). *Blanqueo de caolín por medio de lixiviación*. Obtenido de <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/11871/1/17398.pdf>
- Ulloa, J. (1996). El tratamiento de las aguas residuales. Necesidades, objetivos y sistemas. *In Curso sobre reutilización de aguas residuales y salinas en*. Madrid.
- Universidad Técnica Particular de Loja. (2022). Obtenido de Repositorio de datos UTPL: <https://data.utpl.edu.ec/resource/1446e0bc-1574-0688-a71d-35238f1d61fc>
- Uribe, R., Francesco, C., & Luis, L. (2019). MINERALES ARCILLOSOS DEL ECUADOR. PROTOCOLO DE CATEGORIZACIÓN CERÁMICA: UNA REVISIÓN. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8270036>

**ANEXOS**

**Anexo A. Resultados de análisis difracción de rayos X**

Muestra	Fases minerales	Semicuantificación (%)
CM_01	Cuarzo	36.9
	Caolinita	57.2
	Oligoclase (Plagioclase)	2.9
	Gibbsita	3.0



*Difractograma análisis mineralógico de la muestra analizada*

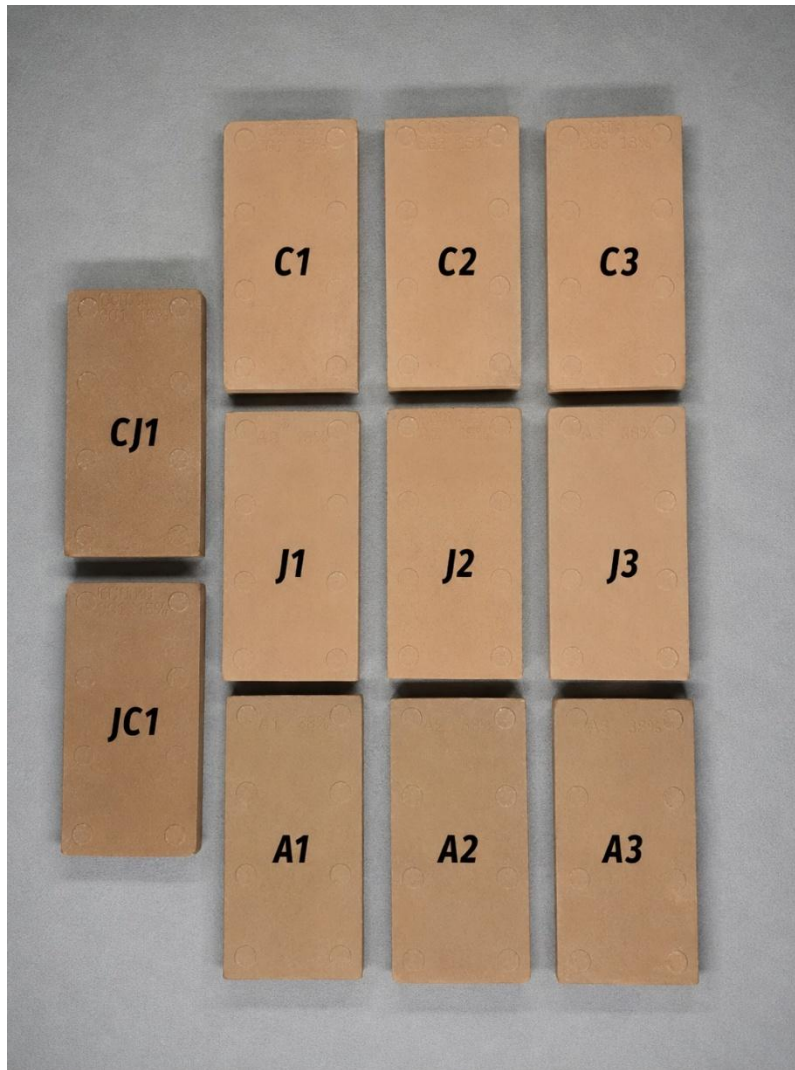
**Anexo B. Ensayo de límite líquido**



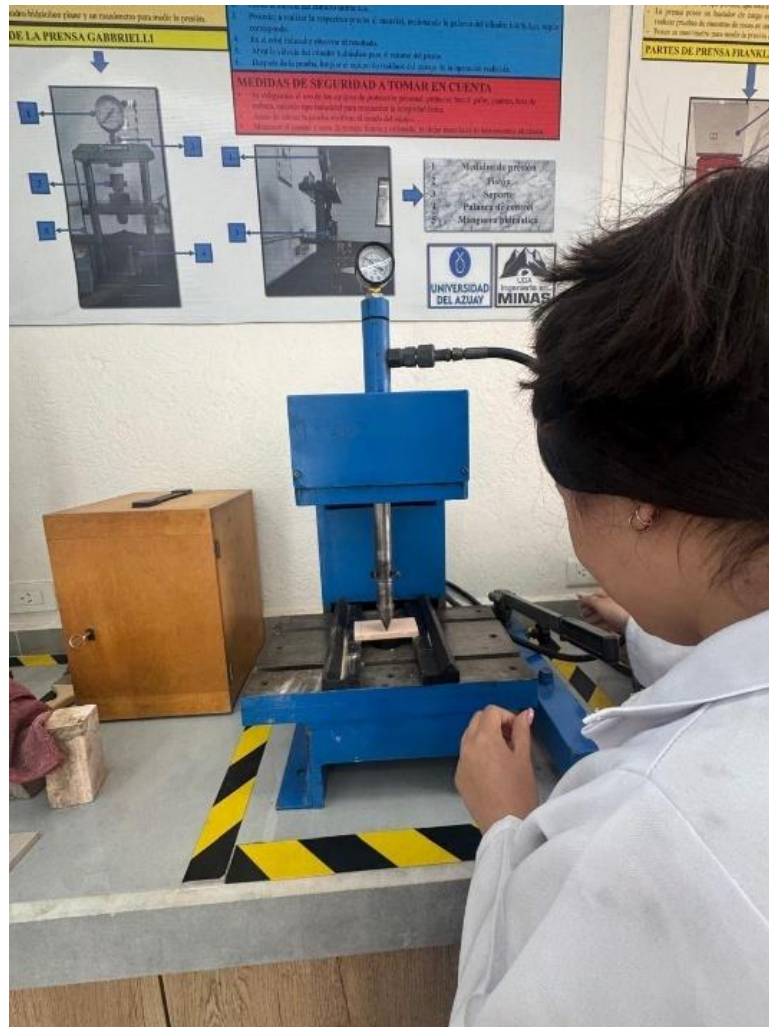
**Anexo C. Ensayo de límite plástico**



**Anexo D.** Briquetas con sus respectivos códigos después de la quema



**Anexo E.** Ensayo de resistencia a la flexión



**Anexo F.** Ensayo de absorción de agua

