

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL



REVISTA INDUSTRIAL 4.0

ISSN-L 2958-0188
JUNIO 2026

Nro.
13
EDICIÓN
DIGITAL

INDEXADA AL DIALNET



UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

Maria Eugenia García Moreno Ph. D.
Dr. Tito V. Estevez Martini
M.Sc. Ing. Miguel Angel Calla Carrasco
M.Sc. Ing. Marcelo Ramirez Molina
Mg. Ing. Aldo Felipe Vargas Pacheco

Rector
Vicerrector
Decano Facultad de Ingeniería
ViceDecano Facultad de Ingeniería
Director de Carrera Ingeniería Industrial

Revista Industrial 4.0
Edición impresa N°13 Junio 2026

Comite Editor:

M.Sc. Ing. Fernando Sanabria Camacho
Ing. Mario Zenteno Benitez PhD.
Ing. Oswaldo Terán Modragón PhD.
Ing. Mónica Lino Humerez PhD.
Ing. Franz Zenteno Benitez PhD.

Diseño Versión Impresa & Web:
Ing. Enrique Orosco Crespo

Imagen Tapa:
unsplash.com/es

Imprenta:
ITM Latinoamericana

Deposito Legal:
4 - 3 - 68 - 2020

Web:
<http://industrial.umsa.bo/revistaindustrial-40>
Email:
revistaindustrial4.0@umsa.bo

Direccion:
Av. Mcal. Santa Cruz, Plaza Del Obelisco.
Mezzanine, Edificio Facultad de Ingeniería.
Tel. 2205000 - 2205067 Int. 1402

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL**



REVISTA INDUSTRIAL 4.0

**EDICIÓN DIGITAL N° 13
JUNIO - 2026**

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

Maria Eugenia Garcia Moreno Ph. D.	Rectora
Dr. Tito V. Estevez Martini	Vicerrector
M.Sc. Ing. Miguel Angel Calla Carrasco	Decano Facultad de Ingeniería
M.Sc. Ing. Marcelo Ramirez Molina	ViceDecano. Facultad de Ingeniería
Mg. Aldo Felipe Vargas Pacheco	Director de Carrera Ingeniería Industrial

Revista Industrial 4.0
Edición Digital N°. 13 - Junio 2026

Comite Editor:

M.Sc. Ing. Fernando Floren Sanabria Camacho
Ing. Mario Fermín Zenteno Benítez Ph.D.
Ing. Oswaldo Fernando Terán Modregón Ph.D.
Ing. Paula Mónica Lino Humerez Ph.D.
Ing. Franz Zenteno Benítez Ph.D.

Diseño Tapa Versión Impresa & Web:
Ing. Enrique Orosco Crespo

Imagen Tapa:
unsplash.com/es

Imprenta:
ITM LATINOAMÉRICA

Deposito Legal:
4 - 3 - 68 - 2020

Web:
<https://industrial.umsa.bo/revistaindustrial-40>
Email:
revistaindustrial4.0@umsa.bo

Av. Mcal. Santa Cruz N° 1175, Plaza del Obelisco
Mezzanine, Edificio Facultad de Ingeniería
Telf. 2205000-2205067, Int. 1402
Campus Universitario, Cota Cota - calle 30

PROLOGO

Revista "Industrial 4.0"

Frente a la volatilidad social y económica actual, la 13ª edición de la Revista Científica INDUSTRIAL 4.0 demuestra cómo la ingeniería industrial actúa como un flujo sinérgico que transfiere innovación integral a las organizaciones. Este ecosistema unificado inicia en la transformación digital, donde el Control basado en eventos para la eficiencia energética optimiza el flujo de datos industriales en procesos complejos. Dicha eficiencia se traslada al ámbito de la salud con el Monitoreo inteligente mediante IoT en Farmacéutica, asegurando estricta trazabilidad térmica regulatoria, y se acopla a las decisiones comerciales y de inventarios con el Pronóstico de la demanda mediante el modelo Prophet, reduciendo drásticamente la incertidumbre logística.



Esta resiliencia operativa converge directamente con la sustentabilidad y el aprovechamiento de recursos. La autonomía energética industrial se impulsa con el Generador asíncrono en generación distribuida, mientras que el modelo de Inventario de Gases de Efecto Invernadero aplicado en la Facultad de Ingeniería de la UMSA audita consumos para viabilizar la reducción de costos operativos, mismo que puede ser replicado en cualquier tipo de organización. Asimismo, la Modelación matemática de los niveles de presión sonora vehicular redefine el diseño de centros logísticos urbanos. En ingeniería de procesos y economía circular, el modelado térmico de Liofilización del Copoazú y de la Liofilización del Mango añade alto valor comercial a recursos amazónicos con bajo consumo energético, sincronizándose con el uso estratégico de Chamota en pastas cerámicas estructurales para reducir costos de materias primas en la construcción.

Finalmente, se abarcan temas de la gobernanza del entorno donde se consolidan estos analizando la Dinámica de exportaciones no tradicionales, los riesgos del Ciclo inmobiliario y las estructuras para Emprendimientos industriales. Para garantizar la

confiabilidad operativa en planta, el estudio contra el P-hacking previene decisiones erróneas por falsos positivos en el control de calidad. Este despliegue de valor es articulado y sostenido por el talento humano validado por la Acreditación ARCU-SUR en la Carrera de Ingeniería Industrial de la UMSA. Así, esta edición reafirma que la frontera científica no es un esfuerzo aislado, sino un engranaje integrado de alta eficiencia y productividad que potencia la sostenibilidad socioeconómica de las organizaciones, empresas, actores normativos a nivel local y regional.

Mg. Aldo Felipe Vargas Pacheco
DIRECTOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS

<https://doi.org/10.53287/jueo4897mh67q>

INFLUENCIA DEL CONTENIDO DE CHAMOTA EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE PASTAS CERÁMICAS PARA USO ESTRUCTURAL

Ing. Lizet Frida Alipaz Carrion

ORCID: 0009-0003-2804-0098

alipazc.lizetfrida@gmail.com

Teléfono: 69739719

Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Ingeniería, Carrera Ingeniería
Metalúrgica y de Materiales

RESUMEN

El presente estudio evalúa la influencia de la incorporación de chamota (residuo cerámico previamente cocido y molido) en las propiedades mecánicas de pastas cerámicas destinadas a aplicaciones estructurales. La investigación se enmarca en la optimización de recursos industriales y la valorización de subproductos, bajo un enfoque de economía circular.

Se formularon 14 composiciones experimentales variando el contenido de chamota entre 0% y 26% en peso, utilizando arcillas Mamani, Roja y Sekejahuira proporcionadas por la empresa INCERPAZ. Las probetas fueron conformadas mediante extrusión y prensado, y posteriormente cocidas a 930 °C en condiciones industriales.

Los resultados muestran un comportamiento no lineal de la resistencia mecánica, alcanzando un valor máximo de 30,43 MPa en compresión y un desempeño óptimo en flexión con un 8% de chamota. Este comportamiento se atribuye al efecto de refuerzo inicial asociado al mejor empaquetamiento de partículas. Sin embargo, a mayores contenidos, la resistencia disminuye debido a la formación de microfisuras originadas por el desajuste térmico entre la matriz y la fase inerte.

Se concluye que es técnicamente viable incorporar hasta un 18% de chamota sin comprometer los requisitos mecánicos establecidos por la normativa boliviana. Estos resultados permiten establecer criterios de diseño para la formulación de pastas cerámicas más eficientes y sostenibles.

Palabras clave: Chamota, pastas cerámicas, resistencia mecánica, materiales estructurales, agente desgrasante, economía circular.

ABSTRACT

This study evaluates the effect of chamotte incorporation (a fired and ground ceramic residue) on the mechanical properties of ceramic pastes for structural applications. The research is framed within resource optimization and industrial waste valorization, following a circular economy approach.

Fourteen experimental compositions were prepared with chamotte contents ranging from 0% to 26% by weight, using Mamani, Red, and Sekejahuira clays supplied by INCERPAZ. Specimens were shaped by extrusion and pressing, and fired at 930 °C under industrial conditions.

The results reveal a non-linear behavior of mechanical strength, with a maximum compressive strength of 30.43 MPa and optimal flexural performance at 8% chamotte content. This trend is attributed to an initial reinforcement effect due to improved particle packing. However, at higher contents, strength decreases due to microcrack formation caused by thermal mismatch between phases.

It is concluded that up to 18% chamotte incorporation is technically feasible without compromising regulatory requirements. These findings provide technical criteria for the design of more efficient and sustainable ceramic pastes.

Keywords: Chamotte, ceramic pastes, mechanical strength, structural materials, degreasing agent, circular economy.

1. INTRODUCCIÓN

La industria cerámica estructural en Bolivia constituye un sector clave para el desarrollo de infraestructura, donde la optimización de recursos y la sostenibilidad han impulsado el aprovechamiento de subproductos industriales. En este contexto, la chamota — residuo cerámico previamente cocido y posteriormente triturado— representa una alternativa viable para su reincorporación en matrices arcillosas (Vieira et al., 2005).

Desde el punto de vista técnico, la fabricación de materiales cerámicos estructurales requiere un equilibrio entre fases plásticas y no plásticas. Las arcillas, aunque esenciales para el conformado, presentan limitaciones durante el secado y la cocción, como contracciones elevadas y generación de fisuras por tensiones internas (Callister & Rethwisch, 2012; Reed, 1995). En este sentido, la chamota actúa como un agente desgrasante inerte, reduciendo la plasticidad, mejorando la estabilidad dimensional y facilitando la evacuación de gases durante el procesamiento térmico (Rahaman, 2003).

No obstante, su incorporación modifica la microestructura del material. En bajas proporciones, puede generar un efecto de refuerzo asociado a un mejor empaquetamiento de partículas; sin embargo, a mayores contenidos, el desajuste en los coeficientes de expansión térmica entre la matriz y la chamota induce tensiones residuales y microfisuras, afectando la resistencia mecánica (Evans, 1978; Lawn, 1993). Por ello, diversos estudios reportan la existencia de un contenido óptimo que equilibra la mejora de propiedades y la generación de defectos (Vieira et al., 2005).

En este contexto, el presente trabajo, desarrollado bajo condiciones industriales reales en la planta INCERPAZ, tiene como objetivo evaluar la influencia del contenido de chamota (0%–26%) en las propiedades mecánicas de pastas cerámicas estructurales. Se busca identificar el porcentaje óptimo de incorporación y establecer un rango de viabilidad técnica que permita maximizar el aprovechamiento del residuo sin comprometer los requisitos normativos, contribuyendo así a la implementación de estrategias de economía circular en la industria cerámica boliviana.

2. METODOLOGÍA

El presente estudio se desarrolló bajo un enfoque experimental, mediante la formulación y evaluación de pastas cerámicas con contenido variable de chamota, manteniendo constantes las condiciones de procesamiento industrial.

Materiales

Se emplearon materias primas proporcionadas por la empresa INCERPAZ, consistentes en tres tipos de arcillas: Mamani, Roja y Sekejahuira, además de chamota obtenida a partir de residuos cerámicos previamente cocidos y posteriormente triturados.

Las arcillas fueron utilizadas en una proporción constante de 45% Mamani, 10%

Roja y 45% Sekejahuira, mientras que la chamota fue incorporada como material desgrasante en proporciones variables.

2.1. Caracterización de Materias Primas

Como fase fundamental para garantizar la reproducibilidad del estudio, se procedió a la caracterización física y tecnológica de las arcillas base (Mamani, Roja y Sekejahuira) y de la chamota (residuo cerámico pre-cocido).

Se determinaron los Límites de Atterberg (Límite Líquido y Límite Plástico) bajo la norma UNE 103-103-94, permitiendo clasificar la plasticidad de las muestras. Además del porcentaje de sílice, fracción arenosa, pérdidas por calcinación, humedad adherente, densidad aparente, y porcentaje de contracción lineal de cada materia prima (Tabla 1).

Asimismo, se realizó el análisis granulométrico por tamizado en húmedo (Norma UNE 7 050-2).

Tabla 1. Resumen de la caracterización de las Materias Primas

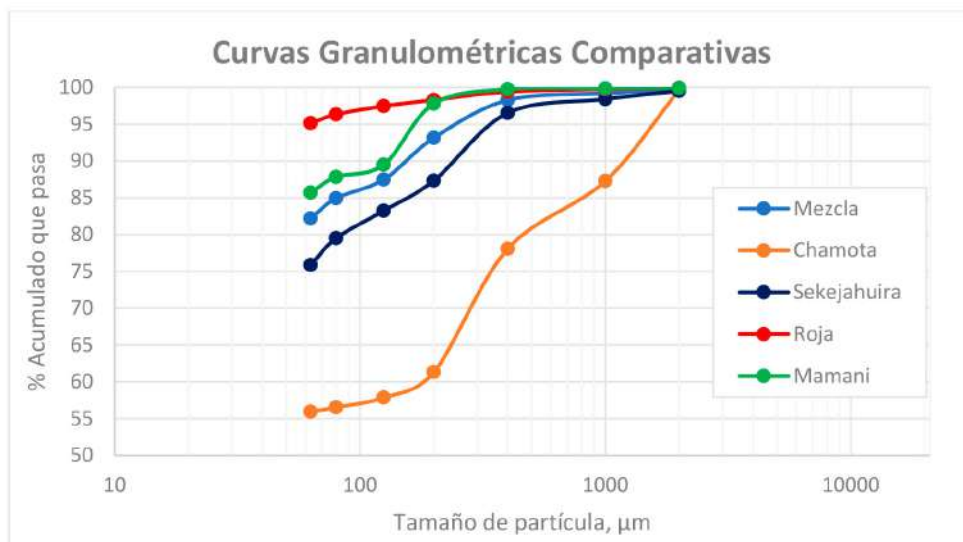
Muestra de arcilla	% Sílice	% Fracción arenosa	Límite líquido	Límite Plástico	Índice de plasticidad (%)	% Pérdida por calcinación	% Humedad Adherente	Densidad Aparente (g/cm ³)	% Contracción
Mamani	49.87	14.31	32	16.79	15.21	9.30	3.96	1.04	6.10
Roja	46.39	4.86	44	15.14	28.86	10.77	4.90	1.05	9.20
Sekejahuira	60.03	24.14	27.2	17.42	9.78	7.77	2.35	1.04	2.34
Chamota	-	-	-	-	-	-	-	1.39	-

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de la caracterización física (Tabla 1) evidencian un comportamiento diferenciado entre las materias primas. Mientras la arcilla Roja posee el mayor índice de plasticidad (28.86%) y la mayor contracción lineal (9.20%), la arcilla Mamani presenta valores intermedios con un índice de plasticidad de 15.21% y una contracción de 6.10%, lo que la posiciona como un componente de cohesión moderada en la mezcla base.

En contraste, la arcilla Sekejahuira presenta el comportamiento más estable debido a su alto contenido de sílice (60.03%) y fracción arenosa (24.14%), registrando la menor contracción (2.34%). La combinación de estas tres arcillas, junto con la incorporación de chamota (densidad de 1.39 g/cm³) como agente desgrasante, resulta fundamental para equilibrar la plasticidad total y controlar la contracción lineal, garantizando así la estabilidad dimensional y la respuesta mecánica de las pastas durante el procesamiento industrial.

Figura 1. Distribución granulométrica de las arcillas, mezcla y chamota



Fuente: Elaboración propia.

En el gráfico 1, el análisis granulométrico evidencia una clara diferenciación entre las arcillas, caracterizadas por una mayor proporción de partículas finas, y la chamota, que presenta una distribución de tamaño de partícula más gruesa. Esta diferencia granulométrica favorece el empaquetamiento de partículas dentro de la matriz cerámica, reduciendo la porosidad y mejorando la resistencia mecánica en bajos contenidos de chamota.

Sin embargo, a medida que aumenta la fracción de partículas gruesas, se generan discontinuidades en la estructura del material, las cuales pueden actuar como concentradores de esfuerzo y favorecer la iniciación de microfisuras, afectando

negativamente las propiedades mecánicas.

2.1.3 Implicaciones en el comportamiento del material

La combinación de propiedades plásticas y granulométricas permite establecer que las arcillas constituyen la fase activa responsable de la cohesión y conformabilidad, mientras que la chamota actúa como una fase inerte que regula la plasticidad y controla la contracción durante el secado y la cocción.

Esta interacción entre fases resulta determinante en el comportamiento final del material, ya que influye directamente en la microestructura, la porosidad y, en consecuencia, en la resistencia mecánica de las piezas cerámicas.

2.2. Definición de Variables y Diseño de Mezclas

El estudio consideró como variable independiente el porcentaje de chamota en la mezcla, mientras que las variables dependientes fueron la resistencia a la compresión (σ_c), la resistencia a la flexión (σ_f), la contracción lineal y la absorción de agua.

Se formularon 14 pastas experimentales manteniendo una relación constante de arcillas (45% Mamani, 10% Roja, 45% Sekejahuira) y variando el contenido de chamota desde un 0% (muestra patrón) hasta un 26% en peso.

Tabla 2. Dosificación y composición de las 14 pastas cerámicas experimentales

PORCENTAJE [%] EN MASA DE LAS MATERIAS PRIMAS					
NÚMERO DE PASTA	% ARCILLA MAMANI	% ARCILLA ROJA	% ARCILLA SEKEJAHUIRA	% CHAMOTA	% TOTAL
P -1	45	10	45	0	100
P -2	44,1	9,8	44,1	2	100
P -3	43,2	9,6	43,2	4	100
P -4	42,3	9,4	42,3	6	100
P -5	41,4	9,2	41,4	8	100
P -6	40,5	9	40,5	10	100
P -7	39,6	8,8	39,6	12	100
P -8	38,7	8,6	38,7	14	100
P -9	37,8	8,4	37,8	16	100
P -10	36,9	8,2	36,9	18	100
P -11	36	8	36	20	100
P -12	35,1	7,8	35,1	22	100
P -13	34,2	7,6	34,2	24	100
P -14	33,3	7,4	33,3	26	100

Fuente: Elaboración propia

2.3. Procedimiento y Evaluación Mecánica

El proceso de fabricación de las probetas se llevó a cabo siguiendo rigurosamente la línea de producción industrial de la planta INCERPAZ, con el fin de reproducir condiciones reales de manufactura.

Las materias primas fueron inicialmente sometidas a un proceso de molienda para garantizar una adecuada homogeneización granulométrica. Posteriormente, se realizó la dosificación de los componentes conforme a las proporciones establecidas en el diseño experimental, seguida de la incorporación de agua hasta alcanzar la humedad óptima de conformado.

La mezcla obtenida fue conformada mediante procesos de extrusión y prensado, obteniéndose probetas con geometría controlada. Estas fueron sometidas a un proceso de secado bajo condiciones controladas, con el objetivo de evitar la

formación de fisuras por evaporación brusca del agua.

Finalmente, las probetas secas fueron cocidas en un horno túnel a una temperatura de 930 °C, seguido de un enfriamiento a temperatura ambiente, obteniéndose así las muestras cerámicas finales para su posterior evaluación (ver Gráfico 2).

Para la evaluación de las propiedades mecánicas, se empleó una máquina universal de ensayos mecánicos computarizada, equipada con una prensa hidráulica al aceite y conectada a una consola con el software Max Test para el control de parámetros. El equipo fue calibrado por IBMETRO para asegurar la precisión de los datos obtenidos. La resistencia a la compresión se determinó utilizando probetas cilíndricas (35 mm de diámetro y 70 mm de altura) bajo la norma ASTM C 773–88, aplicando una velocidad de carga constante de 0,5 KN/s y una velocidad de desplazamiento de 0,1 mm/s. Por su parte, la resistencia a la flexión se midió mediante el ensayo de carga en tres puntos en probetas rectangulares, siguiendo la norma ASTM C 674–88, con una velocidad de carga de 0,075 KN/s y una distancia entre apoyos de 90 mm. Finalmente, la determinación de la absorción de agua se realizó bajo la norma ASTM C 373–88, mientras que el porcentaje de contracción lineal se evaluó siguiendo la norma ASTM C 326-03, midiendo la variación dimensional entre los estados plástico, seco y cocido.

Figura 2. Diagrama de flujo del proceso de preparación de probetas



Fuente: Elaboración propia

En el Gráfico 2, se presenta el esquema experimental seguido para el desarrollo del estudio. El proceso se divide en tres etapas críticas: primero, la adecuación de las materias primas (arcilla y chamota); segundo, el proceso de conformado diferenciado (prensado para compresión y extrusión para flexión y absorción); y finalmente, la fase de post-procesamiento y ensayos mecánicos. Este flujo garantiza que las muestras evaluadas mantengan las condiciones operativas de una planta industrial, permitiendo una correlación directa entre los resultados de laboratorio y la producción a escala.

3. ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

3.1. Análisis de la Resistencia a la Compresión

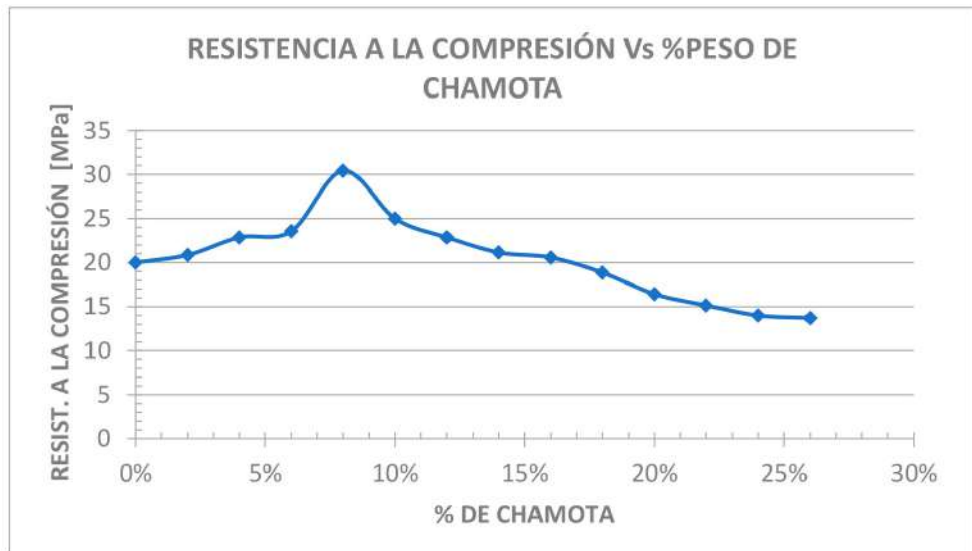
Los ensayos mecánicos revelaron que la incorporación de chamota tiene un efecto

positivo inicial en la matriz, alcanzando un pico de resistencia de 30.43 MPa.

Tabla 3. Resistencia a la Compresión promedio con respecto al porcentaje en peso de Chamota

Nº DE PASTA	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	P-6	P-7	P-8	P-9	P-10	P-11	P-12	P-13	P-14
% DE CHAMOTA	0%	2%	4%	6%	8%	10%	12%	14%	16%	18%	20%	22%	24%	26%
PROMEDIO DE RESIST. A LA COMPRESIÓN [Mpa]	20	20,86	22,86	23,57	30,43	25	22,86	21,14	20,57	18,86	16,43	15,14	14	13,71

Figura 3. Influencia del contenido de chamota en la resistencia a la compresión



Fuente: Elaboración propia

Los resultados de resistencia a la compresión muestran una clara dependencia con el contenido de chamota, evidenciando un comportamiento no lineal típico de materiales cerámicos frágiles (Lawn, 1993). Como se observa en la Tabla 3 y el Gráfico 3, la resistencia incrementa progresivamente hasta alcanzar un valor máximo de 30,43 MPa con un 8% de chamota, seguido de una disminución a mayores contenidos.

Este incremento inicial se atribuye a que, en bajas proporciones, la chamota actúa como una fase rígida que mejora el empaquetamiento granular y favorece una distribución más uniforme de esfuerzos, reduciendo la formación de defectos durante el secado y la cocción.

Sin embargo, al superar el contenido óptimo, la incorporación excesiva de partículas inertes genera discontinuidades en la matriz cerámica, promoviendo la formación de microfisuras debido al desajuste térmico entre fases durante el enfriamiento (Evans, 1978). Estos defectos actúan como concentradores de esfuerzo, facilitando la propagación de grietas en materiales frágiles (Lawn, 1993), y reduciendo la resistencia mecánica del material.

En consecuencia, se establece un contenido óptimo cercano al 8% de chamota, donde se logra un equilibrio entre el efecto de refuerzo y la generación de defectos. No obstante, desde un enfoque industrial, es viable su incorporación hasta un 18% sin comprometer los requisitos mecánicos establecidos.

Figura 4. Esquema del mecanismo de fractura Hertziana observado en los ensayos



Fuente: Registro fotográfico del autor

El patrón de falla observado corresponde a una fractura Hertziana, típica de materiales cerámicos frágiles (Lawn, 1993), donde las grietas se inician en las zonas de contacto debido a la alta concentración de tensiones. La presencia de

defectos microestructurales, como poros o interfaces débiles con la chamota, facilita la nucleación y propagación de grietas cónicas, controlando así la resistencia del material.

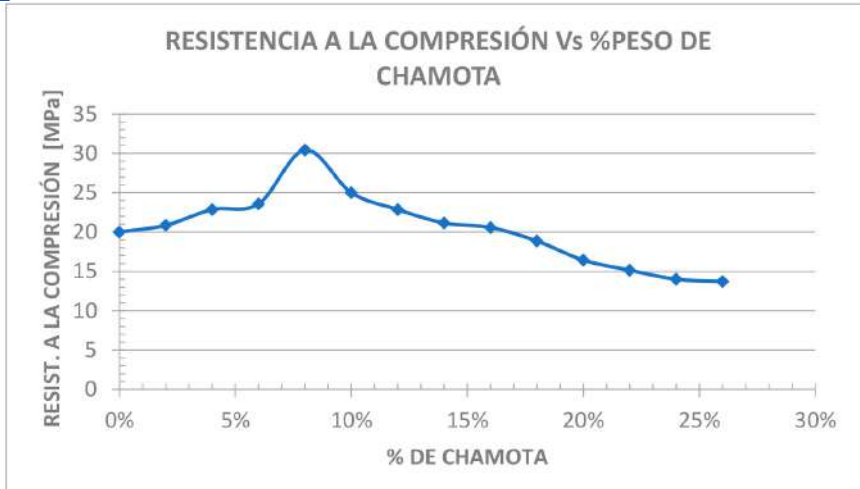
3.2 Análisis de la Resistencia a la Flexión

La resistencia a la flexión presenta una tendencia similar a la observada en compresión, con un incremento inicial hasta alcanzar un valor máximo en torno al 8% de chamota, seguido de una disminución progresiva a mayores contenidos.

Tabla 4. Resistencia a la Flexión promedio con respecto al porcentaje en peso de Chamota

Nº DE PASTA	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	P-6	P-7	P-8	P-9	P-10	P-11	P-12	P-13	P-14
% DE CHAMOTA	0%	2%	4%	6%	8%	10%	12%	14%	16%	18%	20%	22%	24%	26%
PROMEDIO DE RESIST. A LA FLEXIÓN [Mpa]	16,30	16,72	16,88	17,43	19,30	18,14	16,46	15,45	15,14	14,74	14,38	14,18	13,43	12,90

Figura 5. Influencia del contenido de chamota en la resistencia a la flexión



Fuente: Elaboración propia

Este comportamiento se explica porque, en bajas proporciones, la chamota mejora el empaquetamiento de partículas y contribuye a una distribución más homogénea de tensiones, generando un efecto de refuerzo en la matriz cerámica. Sin embargo,

al incrementarse su contenido, se introducen discontinuidades estructurales que actúan como puntos de inicio de grietas.

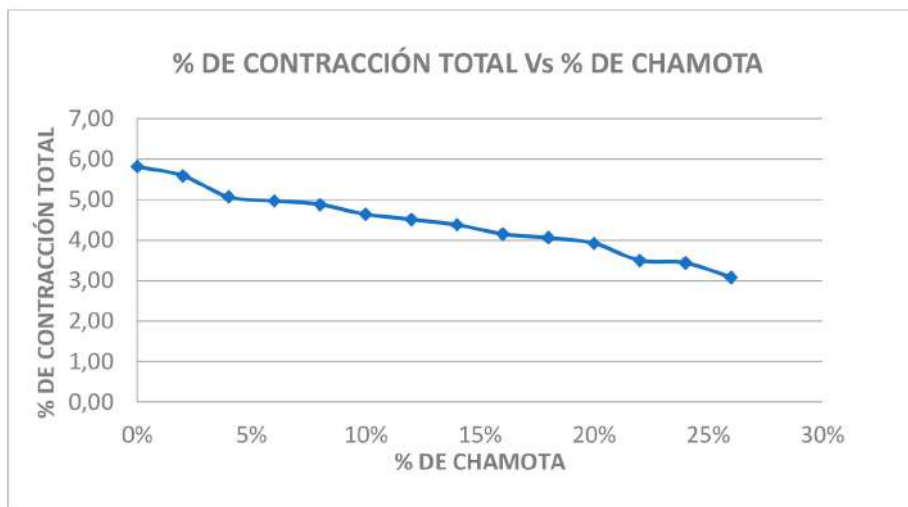
A diferencia de la compresión, el ensayo de flexión es más sensible a defectos superficiales y microfisuras (Lawn, 1993), ya que la falla ocurre bajo esfuerzos de tracción en la fibra inferior de la probeta. En este sentido, la presencia de poros, interfaces débiles y microfisuras generadas por el desajuste térmico entre la matriz y la chamota favorece la propagación de grietas, reduciendo significativamente la resistencia a la flexión.

Estos resultados confirman que el comportamiento mecánico del material está controlado por la distribución de defectos en la microestructura, siendo la resistencia a la flexión un parámetro más crítico para evaluar la integridad estructural de las pastas cerámicas.

3.3. Comportamiento Dimensional y de Absorción

La adición de chamota demostró ser efectiva para la estabilidad dimensional, reduciendo la contracción lineal total conforme aumentaba su porcentaje en la mezcla.

Figura 6. Contracción lineal en función del porcentaje de chamota



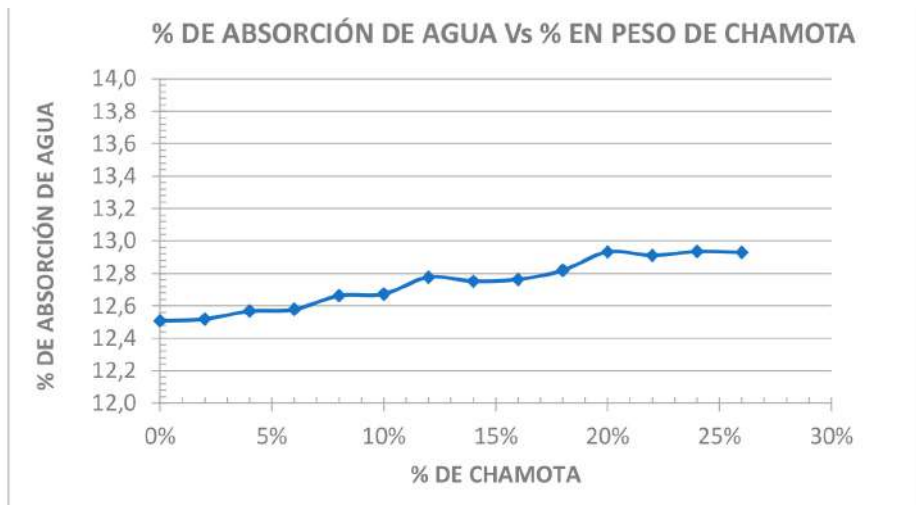
Fuente: Elaboración propia

La contracción lineal disminuye progresivamente con el incremento del contenido de chamota. Este comportamiento se debe a que la chamota, al ser un material previamente cocido, actúa como fase inerte, limitando los cambios volumétricos asociados a la pérdida de humedad y a la sinterización de la matriz arcillosa (Rahaman, 2003).

A medida que aumenta su proporción, la chamota funciona como un esqueleto rígido que restringe la deformación de la matriz, mejorando la estabilidad dimensional. Sin embargo, contenidos elevados pueden generar discontinuidades internas que afectan negativamente la integridad mecánica del material.

La absorción de agua no presenta variaciones significativas con la incorporación de chamota, lo que indica que no se producen variaciones significativas en la porosidad abierta del sistema.

Figura 7. Porcentaje de Absorción de Agua con respecto al porcentaje de chamota



Fuente: Elaboración propia

Si bien la chamota introduce partículas más gruesas en la matriz, su efecto sobre la absorción es limitado, debido a que el empaquetamiento granular (Reed, 1995), y la sinterización compensan parcialmente la generación de vacíos. Sin embargo,

a mayores contenidos, la presencia de discontinuidades e interfaces débiles puede favorecer una ligera tendencia al incremento de la porosidad, afectando indirectamente las propiedades mecánicas.

3.4 Discusión general

Los resultados experimentales evidencian un comportamiento no lineal de la resistencia mecánica en función del contenido de chamota, caracterizado por un incremento inicial hasta un valor máximo y una posterior disminución a mayores porcentajes.

El máximo de resistencia, tanto a la compresión (~30,43 MPa) como a la flexión, se alcanza con un 8% de chamota, lo que indica la existencia de un contenido óptimo asociado a un equilibrio entre el efecto de refuerzo y la generación de defectos, comportamiento reportado en sistemas cerámicos con adición de chamota (Vieira et al., 2005). En este rango, la chamota actúa como una fase rígida que mejora el empaquetamiento granular, favoreciendo una distribución más homogénea de esfuerzos y reduciendo la contracción durante el procesamiento.

Sin embargo, al incrementarse su contenido, la presencia de partículas inertes introduce discontinuidades en la matriz cerámica, generando interfaces débiles y promoviendo la formación de microfisuras inducidas por desajuste térmico (Evans, 1978). Estos defectos actúan como concentradores de esfuerzo, controlando la resistencia efectiva del material y provocando su disminución.

El modo de falla observado corresponde predominantemente a fractura de tipo Hertziana, característica de materiales cerámicos frágiles (Lawn, 1993), lo que confirma que el comportamiento mecánico está gobernado por la nucleación y propagación de grietas a partir de defectos microestructurales.

Este comportamiento es consistente con lo reportado en sistemas cerámicos con adición de chamota (Vieira et al., 2005).

4. CONCLUSIONES

- 1) La incorporación de chamota en pastas cerámicas estructurales mejora la estabilidad dimensional del material, evidenciada por la reducción de la contracción durante el secado y la cocción, debido a su comportamiento como fase inerte.

- 2) La resistencia mecánica presenta un comportamiento no lineal en función del contenido de chamota, identificándose un valor óptimo cercano al 8%, donde se maximiza la resistencia a la compresión y a la flexión como resultado de un equilibrio entre el efecto de refuerzo y la generación de defectos.
- 3) Contenidos superiores al valor óptimo provocan una disminución de la resistencia mecánica, atribuida a la formación de microfisuras y a la presencia de interfaces débiles, asociadas al desajuste térmico entre la matriz arcillosa y la chamota, lo que favorece la concentración de tensiones y la propagación de grietas.
- 4) El modo de falla observado, correspondiente a fractura de tipo Hertziana, confirma el carácter frágil del material y el papel determinante de los defectos microestructurales en el control de su comportamiento mecánico.
- 5) Desde un enfoque industrial, la incorporación controlada de chamota constituye una estrategia técnicamente viable para optimizar el desempeño mecánico y la estabilidad dimensional de pastas cerámicas estructurales. Se identifica un rango óptimo entre 6% y 15%, con una viabilidad máxima de hasta 18% sin comprometer los requisitos de calidad, favoreciendo simultáneamente la valorización de residuos cerámicos bajo un enfoque de economía circular.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2012). *Materials science and engineering: An introduction* (8th ed.). John Wiley & Sons.
- Chiang, Y. M., Birnie, D. P., & Kingery, W. D. (1997). *Physical ceramics: Principles for ceramic science and engineering*. John Wiley & Sons.
- Kingery, W. D., Bowen, H. K., & Uhlmann, D. R. (1976). *Introduction to ceramics* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Reed, J. S. (1995). *Principles of ceramics processing* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Barsoum, M. W. (2003). *Fundamentals of ceramics*. Institute of Physics Publishing.
- Evans, A. G. (1978). Microfracture from thermal expansion anisotropy—I. Single phase systems. *Acta Metallurgica*, 26(12), 1845–1853.
- Lawn, B. (1993). *Fracture of brittle solids* (2nd ed.). Cambridge University Press.

- Demir, I. (2008). Effect of organic residues addition on the technological properties of clay bricks. *Waste Management*, 28(3), 622–627.
- Vieira, C. M. F., Monteiro, S. N., & Pinheiro, R. M. (2005). Effect of grog addition on the properties and microstructure of a red ceramic. *Construction and Building Materials*, 19(3), 185–191.
- Monteiro, S. N., & Vieira, C. M. F. (2004). Influence of firing temperature on the ceramic properties of clays from Campos dos Goytacazes, Brazil. *Applied Clay Science*, 27(3–4), 229–234.
- Rahaman, M. N. (2003). *Ceramic processing and sintering* (2nd ed.). Marcel Dekker.
- Instituto Boliviano de Normalización y Calidad. (2010). *Ladrillos cerámicos – Requisitos* (NB 121001). La Paz, Bolivia: IBNORCA.
- Industria Cerámica Paz Ltda. (s.f.). *Norma interna de control de calidad para productos cerámicos estructurales*. Documento interno no publicado.



Estado Plurinacional de Bolivia
Ministerio de Educación
Yach'a Kamani
Yachay Kanachiq
Moroshoerenduhetso Arakuarupi

N° 000011

**COMISIÓN NACIONAL DE ACREDITACIÓN
DE CARRERAS UNIVERSITARIAS - CNACU**

En sujeción y al amparo de la Ley de Educación N° 070
"Avelino Siñani - Elizardo Pérez" del 20 de diciembre de 2010



CERTIFICA

Que la carrera de

INGENIERÍA INDUSTRIAL

de la

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS

con sede académica en la ciudad de La Paz, cumple con los criterios definidos para la

ACREDITACIÓN

del Sistema ARCU-SUR
del SECTOR EDUCATIVO DEL MERCOSUR

La Comisión Nacional de Acreditación de la Carreras Universitarias (CNACU), en uso de sus atribuciones conferidas por la Ley de la Educación N° 070 "Avelino Siñani - Elizardo Pérez", reconoce la calidad académica universitaria con alcance regional en el MERCOSUR por un periodo de (6) seis años, a partir de la fecha de su emisión.

La Paz, marzo de 2026.


MARÍA YVONNE PACHECO ANGULO
PRESIDENTA
COMISIÓN NACIONAL DE ACREDITACIÓN
DE CARRERAS UNIVERSITARIAS


DIEGO CAMACHO VELAZCO ARAMAYO
VICEPRESIDENTE
COMISIÓN NACIONAL DE ACREDITACIÓN
DE CARRERAS UNIVERSITARIAS


FREDDY MENDOZA ESPINOZA
VOCALES CELB
COMISIÓN NACIONAL DE ACREDITACIÓN
DE CARRERAS UNIVERSITARIAS


JUAN MARCELO SANZURI LIMA
SECRETARIO GENERAL
COMISIÓN NACIONAL DE ACREDITACIÓN
DE CARRERAS UNIVERSITARIAS


GUSTAVO SACRO ORTEGA ZELADA
VOCALES ANEP
COMISIÓN NACIONAL DE ACREDITACIÓN
DE CARRERAS UNIVERSITARIAS

**CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
NUEVAMENTE ACREDITADA AL SISTEMA ARCU - SUR
DEL SECTOR EDUCATIVO DEL MERCOSUR**



UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

© TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS
LA PAZ - BOLIVIA
JUNIO / 2026