

UNIVERSIDAD SAN PEDRO
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
Dirección General de Investigación



FACULTAD DE INGENIERÍA

**RESISTENCIA DE UNA PASTA CONCHA - ARCILLA DE
YACYA-HUARI**

César H. Julián Benites
Gumercindo Flores Reyes
Yudí S. Cribillero Maguiña
Walter Z. Velázquez Pereyra

Chimbote – Perú

2016

ÍNDICE

Tema	Página N°
Titulo del trabajo	i
Palabras Clave	ii
Resumen	iii
Abstract	iv
Introducción	1
Metodología	13
Resultados	19
Análisis y discusión	28
Conclusiones	32
Recomendaciones	33
Referencias bibliográficas	34

Resistencia de una pasta concha – arcilla de Yacya - Huari

Palabras clave: Arcilla, conchas de abanico, pasta cementante, resistencia.

Keywords: Cementitious paste, clay, resistance, scallops shells.

Línea de Investigación:

Línea	Código	Número
Materiales compuestos	UNESCO	22112211.03

Resumen

El propósito de este trabajo fue investigar la capacidad cementante de una pasta conformada en base a residuos calcáreos de conchas de abanico existente en la región Ancash, y una arcilla natural de Yacya– Huari. La investigación fue de carácter aplicada, prospectiva y transversal por las edades de curado de las pastas; así como, cuantitativa por el análisis de sus resultados. Las caracterizaciones de los materiales activados estuvieron orientados a conocer la composición química y su potencial reactividad puzolánica; así como, su composición estructural producto de la calcinación de estos materiales; además se evaluó el potencial Hidrógeno de las combinaciones de estos materiales activados. La pasta fue conformada en las proporciones arcilla/concha: 1/1, 2/1, 3/1, 1/2 y 1/3. El desmoldeado se realizó a los 7 días y el curado en agua fue por 28 días; al cabo de los cuales, se ensayó su resistencia a la compresión, y se comparó la resistencia entre ellos. La mejor resistencia a la compresión encontrada correspondió a la relación arcilla/concha 2/1 con un valor de 19.76 Kg/cm².

Abstract

The purpose of this study was to investigate the cementitious capability of a paste made of scallop shells existing at the Ancash region, and a natural clay from Yacya - Huari. The investigation was an applied one, prospective and cross-sectional character by the ages of seasoning pastes; as well as quantitative analysis of their results. The characterization of the activated materials was oriented to know the chemical composition and its potential pozzolanic reactivity; as well as their structural composition of the calcination product of these materials; also, Hydrogen potential combinations of these materials was evaluated activated. The paste was formed in proportions clay / shell: 1/1, 2/1, 3/1, 1/2 and 1/3. The unmolding of the small cylinders was performed at 7 days and the curing in water was for 28 days, after which their compressive strength was tested, and the resistance between them was compared. The best compression resistance found corresponds to the clay/shell ratio 2/1 with a value of 19.76 Kg / cm².

I. INTRODUCCIÓN

1. ANTECEDENTES Y FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICA

LAS ARCILLAS Y SU ACTIVIDAD PUZOLÁNICA.

El uso de las arcillas calcinadas como un material puzolánico para mortero y concreto ha recibido considerable atención en los años recientes debido a su potencial utilidad como material suplementario del cemento. La perspectiva es disminuir el consumo del cemento, el alto consumo de energía durante su fabricación y por lo tanto su elevada contaminación al medio ambiente durante este proceso. Además el concreto y el mortero que contienen materiales puzolánicos exhiben una considerable mejora en las propiedades de su durabilidad (Chakchouk, Samet y Mnif, 2006).

En el Perú y en especial en la región Ancash no se han encontrado antecedentes relacionados al estudio de la actividad puzolánica de las arcillas. Sin embargo, en esta región existe una gran variedad de arcillas tanto en la costa como en la sierra, las mismas que han venido siendo utilizadas desde las épocas pre-incas para la confección de utensilios cerámicos.

Entre los lugares que han sido identificados con una mayor actividad ceramista dentro de la región Ancash son: Calpoc, Cunea, Taricá, Pariahuanca, Marcará, Musho, Cancharunti, Corongo y Yacya. Entre los colores de las arcillas mencionadas, se han identificado las rojas, negras, amarillas, blancas y coloradas. Técnicamente, las arcillas son los materiales plásticos de base, sobre el cual se agrega otro material con elementos anti plásticos; es decir, con inclusiones minerales. Este segundo material es llamado temperante o desgrasante, que permite desgrasar la arcilla; es decir, hacerla más manipulable para trabajarla o hacer más fuerte a la pasta para que esta no se rompa durante el secado o la cocción. En realidad estos elementos anti plásticos, como las rocas molidas, la

arena y residuos vegetales son los que contrabalancean el efecto de encogimiento de la pasta cuando se evapora el agua contenida en ella. En este contexto merece especial atención las arcillas de Yacya y su temperante la piedra pizarra molida, la cual le da peso y resistencia a las cerámicas. Por lo que se les conoce también como cerámicas de piedra que son las preferidas en la región. Los ceramistas utilizaron diferentes proporciones de arcillas y sus correspondientes temperantes para conformar pastas arcillosas que han servido de base para la elaboración de sus cerámicas (Druc, 1996).

A nivel internacional, Chackchouk, Samet y Mnif (2006) reportan un estudio sobre el uso potencial de la actividad puzolánica de las arcillas de Tunisia en pastas. Para la localidad de Silania estos autores señalan los siguientes Límites de Atterberg: Límite Plástico 24%, Límite Líquido 41%, Índice de Plasticidad 17%; lo que permite apreciar que se trata de una arcilla de relativa baja plasticidad. El análisis estructural muestra una arcilla relativamente limpia, pues en su respectivo Difractograma se aprecia abundantes porcentajes de moscovita; con pequeños porcentajes de, Cuarzo y Calcio. Para una calcinación durante 5 horas a una temperatura de 700°C, se reporta resistencias a la compresión de 0.4 MPa en la proporción de 1:1 y 0.7 MPa en la proporción 1:3. Respecto a estos resultados los autores precisan que estos bajos valores se deben a la abundante presencia de la fase Moscovita; la misma que, mantiene su estructura cristalina aun por encima de los 800°C de calcinación a los que fue sometida esta muestra.

Ostnor (2007) sostiene que las arcillas calcinadas tienen un gran potencial como una alternativa de material puzolánico para el concreto debido a su alta disponibilidad y bajo costo. Sin embargo se debe considerar que la mineralogía de las arcillas muestra una amplia variación de unas con respecto a otras, lo cual, podría influir en su reactividad. Este autor también reporta que el rango de calcinación de las arcillas se encontraría entre 700°C – 800°C, sin embargo en

algunos casos podría llegar a 1000°C. Igualmente indica que el beneficio de reemplazar el cemento en el concreto por las arcillas calcinadas no está en incrementar su resistencia, sino en incrementar su durabilidad.

BIOMINERALIZACIÓN DE LAS CONCHAS DE ABANICO Y SU ACTIVIDAD CEMENTANTE.

Respecto a las conchas de los moluscos bivalvos generados por un proceso de biomineralización, se conoce que es un compuesto órgano – mineral; donde el mineral dominante es la calcita, la cual está íntimamente asociada a una matriz orgánica que contiene solo entre 1 al 5% del peso de la concha. La matriz orgánica representa una amalgama de proteínas, glicoproteínas, quitina y ácidos polisacáridos; secretados por los tejidos calcificados durante la génesis del esqueleto. Esta mixtura de elementos queda consecuentemente sellada dentro del esqueleto de la concha durante su crecimiento. A nivel macroscópico, la conjunción de estos componentes orgánicos en la estructura mineralizada le incrementa sus propiedades mecánicas de este ensamble compuesto órgano-mineral.

En relación a los aspectos evolutivos de la formación de la concha, a parte de su estado inicial larval, es que a partir del estado juvenil, la concha del molusco calcifica rápidamente. El elemento central de este proceso es el manto, un órgano fino, el cual cubre la superficie interna de la concha. Su tejido polarizado está constituido por un epitelio interior, en contacto con el medio ambiente (esto es, el agua de mar), y un manto exterior que contiene los músculos paliales, el tejido conectivo, las fibras nerviosas y el epitelio exterior el cual mineraliza la concha. Los iones precursores de la concha, es decir el calcio y el bicarbonato, son tomados del medio ambiente, a través del epitelio interior o de las branquias; ambos iones, también pueden ser originados del metabolismo del molusco

(alimento y fluidos). Estos elementos transitan a través del tejido conectivo del manto, vía un fluido hemolienfático que baña las células del molusco y son dirigidas al epitelio exterior del manto, a partir del cual se genera la mineralización de la concha (Marin, Luguel, Marie y Medakovic, 2008).

En relación a las consideraciones estructurales, la concha está formada básicamente por una superposición de dos a cinco hojas calcificadas y una hoja orgánica. La hoja más externa es una capa dura que no se erosiona durante la vida del animal y su función es proteger a toda la concha. Las láminas intermedias pueden tener una estructura prismática, laminar- cruzada, o mixta y están constituidas por uno de 6 polimorfos posibles de carbonato de calcio. Las características estructuradas que exhiben estas hojas intermedias son su resistencia moderada a la fractura; pero a su vez, poseen cierta flexibilidad, la cual se incrementa por su asociación con una hoja periostral de origen orgánico. De otro lado la hoja más interna de carácter nacarosa exhibe una extremada resistencia a la fractura.

La combinación natural de estas hojas permite a este biomaterial exhibir de forma integrada resistencia y flexibilidad, evitando así la propagación de una posible fractura a través de toda la concha. La hoja más interna, o nácar es la más fascinante, pues además de su microestructura sólida, muestra una resistencia mecánica mil veces mayor a una contraparte precipitada químicamente de aragonita geológica (Jackson et al., 1990 citado en Marin et al., 2012).

En relación al uso de los residuos calcáreos de las conchas de abanico (*Argopecten purpuratos*) y su actividad cementante se reportan los siguientes antecedentes:

Julián et al.(2015) sustituyen el 5, 10 y 15 % del cemento en mezclas de concreto por cenizas de conchas de abanico calcinadas a 900° C por 4 horas y trituradas a un tamaño de grano menor a 150 µm (malla #100). Las resistencias en compresión alcanzadas, a los 28 días, para estos niveles de sustitución fueron los siguientes. Al 5 %, la resistencia experimental supera al patrón en 29.5 %, al 10 % la resistencia experimental supera al patrón en 8.88% y al 15 %, la resistencia experimental supera al patrón en 13.51 %. La diferencia en las resistencias al nivel de sustitución del 5 % de este estudio con respecto al reportado en el 2011, es que en este último, la temperatura de calcinación se incrementó en 100° C, lo que propició un mayor porcentaje de conversión de carbonato de calcio en óxido de calcio y por ende una mayor contribución de este componente alcalino a la reacción con el agua y el cemento en la sustitución. También en este último estudio el tamaño de grano se disminuyó de 425µm a 150µm esto permitió que el material desarrolle una mayor área específica de reacción y por lo tanto una mayor reactividad dentro del compuesto.

2. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Según INEI (2013) las personas que están en situación de pobreza al 2012 son alrededor de 7.8 millones de peruanos, según esta fuente el promedio mensual de la canasta familiar de este sector de la población está en S/.151 a S/.284; con estos niveles monetarios de subsistencia es imposible aspirar a una vivienda en base a materiales constructivos de concreto. INEI también establece que un 53 % de los peruanos en esta condición se encuentran en el área rural y un 16.6 % en área urbana. Por regiones naturales la mayor incidencia está en la Sierra (38.5 %), Selva (32.5 %), Costa (16.5%) y Lima metropolitana (14.5%). La Región Ancash, se ubica en un grupo intermedio con niveles de pobreza del orden de 27.4 %, asentados básicamente en los sectores rurales de la Sierra Nor-Este de esta Región; pero también, en los sectores periurbanos de los grandes centros poblados como

Chimbote y Huaraz. Esta población ha sido marginada por los efectos de la economía capitalista y los procesos de globalización de libre mercado que vienen convirtiendo a unos cuantos en prósperos empresarios; pero a su vez, por sus métodos sistematizados de alta inversión, desplaza y margina a quienes no pueden competir y mantenerse en el mercado.

La población de nuestro país que por su situación económica está marginada del uso del cemento representa un considerable 33.6 %. Este significativo margen poblacional justifica la idea del presente proyecto que propone estudiar la potencial actividad puzolánica de los contenidos de silicio y aluminio en la arcilla natural de Yacya, los mismos que, podrían ser activados a relativas bajas temperaturas. Esta arcilla activada al ser combinada con el polvo activado de las conchas de abanico podría generar un material con una alta puzolanidad y resistencia a la compresión similar a los materiales convencionales utilizados en la construcción.

Si se toma en cuenta que la temperatura de calcinación de la arcilla es del orden de 50% del cemento. Esta magnitud de calcinación tendrá un menor efecto en el medio ambiente con relación a la magnitud de la contaminación que genera el cemento en su producción que lo ubica junto a la deforestación y el quemado de combustibles fósiles como uno de los mayores emisores de dióxido de carbono (CO_2) a la atmósfera. Este dióxido de carbono genera a su vez el efecto invernadero que es responsable del 65 % del calentamiento global (Vijayakumar et al. 2013). En términos globales la producción del cemento genera entre el 5 al 8 % de las emisiones de CO_2 en el mundo. Se ha logrado estimar que por cada tonelada de cemento que se produce, se emite una tonelada de dióxido de carbono a la atmósfera (Guimaraes, 2007 citado en Soroushian, 2012).

Las ingentes cantidades de energía consumida por la industria cementera se ven reflejadas en el hecho que solo es superado por la industria del aluminio y el acero. Además se reportan datos que la energía requerida para producir una tonelada de cemento es del orden de los 5.5 BTU (5.77×10^3 J), en razón de sus altas temperaturas de rocas calcáreas del orden de los 1600°C . Lo que representa más del 90 % del total de la energía requerida para producir el concreto. Nuestra propuesta representaría un consumo de energía y contaminación ambiental mucho menor que lo antes mencionado.

La novedad es generar nuevos conocimientos en ciencia y tecnología de los nuevos materiales puzolánicos como los residuos de las conchas de abanico y las arcillas naturales, se estaría aportando el desarrollo de un nuevo material compuesto conformado por el polvo activado de las conchas de abanico y la arcilla activada de Yacya.

La sostenibilidad de nuestra propuesta se basa en las 30 mil toneladas anuales de producción de la concha de abanico en la región Ancash y en los yacimientos aun no cuantificados de las canteras de arcilla en Yacya provincia de Huari Ancash.

3. PROBLEMA

¿En qué medida un compuesto arcilla de Yacya - concha de abanico permitiría obtener una nueva pasta cementante?

4. MARCO REFERENCIAL

ACTIVACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LAS ARCILLAS.

Un aspecto importante a considerar en el estudio puzolánico de las arcillas son sus propiedades geotécnicas; es decir, sus porcentajes de contenido de carbonato de

calcio y sus límites de consistencia (límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad). Cuanto más alto sean los porcentajes de Carbonato de Calcio (CaO_3), implica que menos contenidos de materiales arcillosos estarán presentes en el material. Cuando se tiene altos índices de plasticidad implica que el material contiene una alta fracción de arcilla (Holtz y Kovacs, 1981 citado en Chakchouk et al., 2006).

También es importante determinar, usando Fluorescencia de Rayos X (FRX); a nivel de elementos, y de óxidos la composición química de las arcillas en estudio, en razón de conocer los porcentajes de los precursores puzolánicos y por ende su potencial cementante. Sobre este particular el Estándar ASTM C618 (1980) señala el criterio químico de actividad puzolánico de las arcillas activadas por calcinación. Este criterio; establece que, la suma de los óxidos de silicio, aluminio y hierro debe superar el 70%, y que el dióxido de sulfuro debe ser menor al 4%. Esto implica que si se va a trabajar con un nuevo material arcilloso se debe empezar por explorar un rango de calcinación entre 600°C y 800°C para encontrar el mejor criterio químico de puzolanidad. Este criterio debe ser complementado con un estudio estructural por Difracción de Rayos X (DRX) a nivel de porcentajes de fases presentes en el material. Estos estudios determinarán en que porcentajes las fases de caolinita, illita, moscovita o montmorillonita están presentes en el material. Estas fases son capaces de producir materiales puzolánicos por calcinación (Ayub et al., 1988 citado en Chakchouk et al., 2006).

Durante la calcinación de las arcillas para convertirlos en materiales puzolánicos, hay que tener en cuenta que durante este proceso se producen una serie de reacciones que originan cambios mineralógicos y cristalográficos dentro del material. A bajos rangos de temperaturas entre 50°C a 200°C , ocurre una reacción endotérmica debido a la remoción del agua físicamente adherida a la arcilla. A medida que la temperatura continua incrementándose ocurre una reacción

endotérmica debido a la remoción de los cristales de agua y la deshidroxilación de la estructura cristalina de la arcilla y la formación de un material cuasi-amorfo el cual reacciona con la cal y genera un material puzolánico. Arriba de los 850°C, ocurre una reacción exotérmica debido a una reorganización estructural del material amorfo para formar nuevos silicatos de alta temperatura y compuestos óxidos. De otro lado es importante notar que cada arcilla tiene su temperatura óptima de calcinación para producir un material de alta actividad puzolánica. Esta temperatura se ubica justo por encima del pico de deshidroxilación y debajo del inicio del pico de re-cristalización (Al Rawas et al., 1998 citado en Chakchouk et al., 2006).

Julián et al., 2015 reportan los resultados de una caracterización de una arcilla de Campo Verde – Pucallpa. Tomando los resultados de esta arcilla como referencia a nuestro proyecto se puede destacar su composición química y estructural.

Su composición química muestra una predominancia de óxidos de silicio, aluminio y hierro como se aprecia en la Tabla N° 1. Y en su composición estructural destacan las fases de cuarzo, moscovita y caolinita, como se aprecia en la Figura 1.

Tabla Nº 1. Composición Química de una arcilla de Campo Verde – Pucallpa.

Composición Química	Resultados (%)	Método utilizado
Trióxido de Aluminio (Al_2O_3)	46058	Espectrometría de Fluorescencia de Rayos x
Dióxido de Silicio (SiO_2)	40.812	
Óxido de Hierro (Fe_2O_3)	6.775	
Óxido de Potasio (K_2O)	4.872	
Óxido de Titanio (TiO_2)	0.598	
Pentóxido de Fósforo (P_2O_5)	0.372	
Óxido de Calcio (CaO)	0.289	
Dióxido de Zirconio (ZrO_2)	0.064	
Trióxido de Azufre (SO_3)	0.064	
Óxido de Zinc (ZnO)	0.038	
Pentóxido de Vanadio (V_2O_5)	0.025	
Dióxido de Platino (PlO_2)	0.008	
Óxido de Cobre (CuO)	0.008	
Óxido de Estroncio (SrO)	0.005	
Materia Orgánica	0.010	

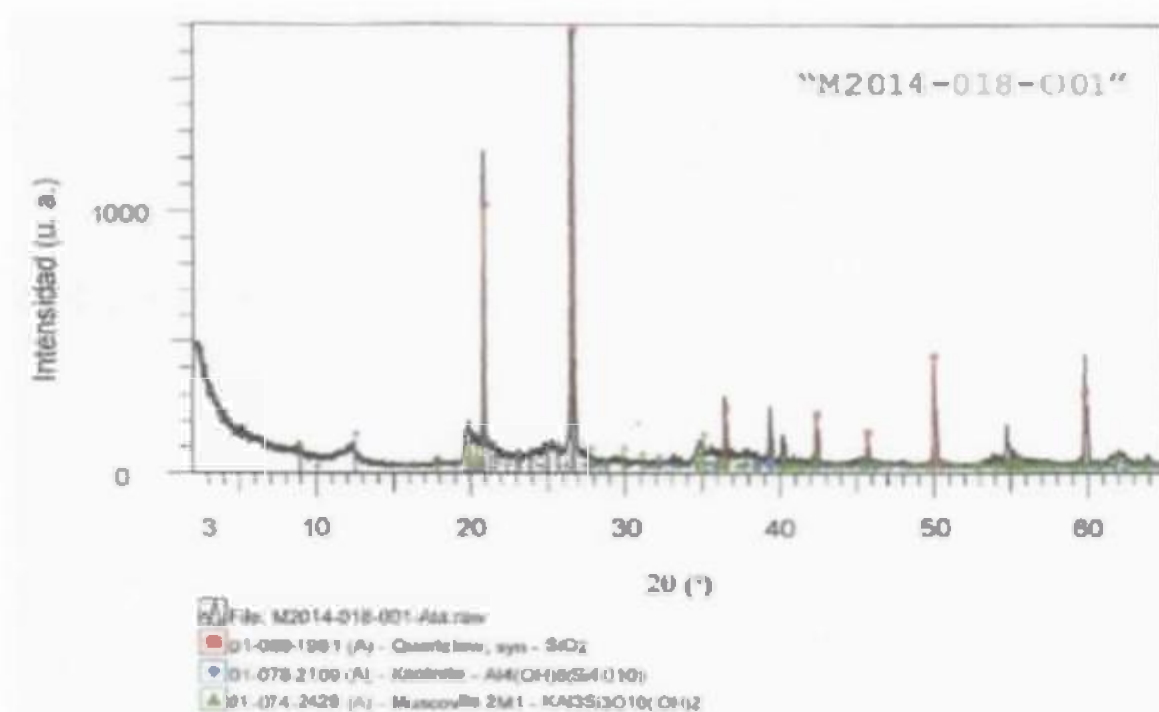


Figura 1. Principales fases presentes en una arcilla de Campo Verde – Pucallpa.

ACTIVACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA CONCHA DE ABANICO.

Koyama, Sasaya y Okuda, (2003) determinan que a partir de las conchas de abanico trituradas a un tamaño de partícula de 200 μm y sometidas a una calcinación de 1050°C por 3 horas, obtuvieron un polvo con tamaño de grano menor que 10 μm y una composición de carbonato de calcio, óxido de calcio e hidróxido de calcio, que se disuelve en el agua solo un 0.1% de su peso total. El pH de este polvo cerámico fue de 12.5 y en su composición química predomina el oxígeno (39%), el calcio (36%) y el carbono (23%).

Buasri et al., 2013 encuentran que para una calcinación entre 800°C y 1000°C se produce una conversión creciente de Carbonato de Calcio (CaO_3) a Óxido de Calcio (CaO), del orden de un 97.529%. Siendo este óxido de calcio el elemento activo de este material.

EVALUACIÓN DE LA ACTIVIDAD PUZOLÁNICA DE LAS PASTAS DE ARCILLA - CAL.

Chakchouk et al., (2006) reportan una medición indirecta de la actividad puzolánica de las pastas de arcilla a través de la determinación de su resistencia a la compresión. Para ello utilizaron tubos de prueba de mezclas calcinadas de arcilla y cal. Estos autores ensayaron dos proporciones de arcillas calcinadas (AC) con hidróxido de calcio (HC) (1:1 y 1:3 respectivamente con una proporción de agua a sólido de 0.75). Las resistencias a la compresión que reportan aumentan cuando se incrementa la proporción de cal con respecto a la arcilla cualquiera que sea la temperatura.

Para este trabajo se está considerando la definición de puzolana en los términos siguientes: “un material silicio o silicio y aluminoso, que por si mismo puede o no presentar una pequeña actividad cementante, pero que dividido finamente y en

presencia de humedad reacciona químicamente con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente para formar compuestos que poseen propiedades cementantes” (Malhorta & Mehta, 1996 citado en Müller, 2005). Este mismo autor clasifica a las arcillas calcinadas como puzolanas artificiales, y a la cal como óxidos e hidróxidos de calcio.

Ostnor (2007) sostiene que las resistencias de las mezclas puzolana - cal se incrementan a medida que se incrementa la combinación de cal, pero hace hincapié que esta no es una regla general entre estos dos parámetros. El desarrollo de la resistencia dependerá en última instancia de la razón puzolana/cal, la razón agua/aglutinante y del tamaño de partícula de empaquetamiento del material puzolánico.

Para determinar las características químicas de materiales arcillosos y de otros materiales puzolánicos se usa el análisis de Fluorescencia de Rayos X, estos análisis son importantes puesto que nos proporcionan los porcentajes de silicio, aluminio y hierro dentro del material y por lo tanto nos da una buena indicación de su calidad o potencial puzolánico.

En relación a las arcillas calcinadas se debe tener en cuenta que, raramente se encuentran arcillas puras, sino que por el contrario usualmente se los encuentra mezclados con otras arcillas y con cristales microscópicos de carbonatos, feldespatos, micas o cuarzo. Los minerales cristalinos están divididos en cuatro grupos principales: Caolinita, montmorillonita/esmectita, illita y grupos clorita. La composición de los minerales de arcilla depende de su área geográfica y de su base roca de fondo, y varía mucho de un lugar a otro.

Los suelos con un índice de plasticidad alto indican el contenido de una alta proporción de arcilla, los suelos con bajos índices de plasticidad tienden a ser limos.

Definición de Variables:

La variable independiente es las proporciones arcilla/concha que es manipulable.

La variable dependiente es la resistencia a la compresión de la pasta arcilla – concha que es medible.

La variable interviniente es la temperatura y el tiempo de calcinación que será controlada.

5. HIPÓTESIS

Calcinando y moliendo la arcilla de Yacya y la concha de abanico permitiría activar sus componentes a nivel óxidos para conformar una pasta cementante y determinar sus resistencias en diferentes proporciones.

6. OBJETIVOS

Objetivo General

Determinar la resistencia a la compresión, como un indicador del grado de puzolanidad, de una pasta mezclada en diferentes proporciones por arcilla activada de Yacya y polvo de concha de abanico de Chimbote.

Objetivos Específicos

- Determinar la composición química de los materiales puzolánicos arcilla de Yacya y concha de abanico mediante el Análisis de Fluorescencia de Rayos X.
- Determinar la composición estructural de la arcilla de Yacya y de la concha de abanico usando el Análisis de Difracción de Rayos X.
- Determinar el potencial Hidrógeno (pH) de las siguientes proporciones de pasta arcilla - concha: 1/1, 2/1, 3/1, 1/2 y 1/3.
- Determinar la resistencia a la compresión a los 28 días de las diferentes proporciones arcilla – concha: 1/1, 2/1, 3/1, 1/2 y 1/3; de acuerdo al mejor resultado obtenido, proponer su potencial uso en construcción.

II. METODOLOGÍA

TIPO DE INVESTIGACIÓN.

Por su orientación, la presente es una investigación aplicada en razón de que se explora la resistencia de una pasta arcilla/concha con potencial aplicación en el sector construcción.

Por el tiempo de ocurrencia y el registro de información, es una investigación prospectiva, porque se registran tiempos secuenciales a partir del moldeado de las pastas, encofrado, desencofrado a los 7 días y curado en agua por 28 días.

Según el periodo y número de mediciones, es una investigación transversal puesto que se registra una sola medición de la resistencia a compresión de las pastas a la edad de 28 días.

Según el análisis y el alcance de sus resultados, es una investigación cuantitativa, puesto que, tiene dos variables independientes que son la temperatura de calcinación y las proporciones de mezclas en las pastas; y una variable dependiente que se registra como la resistencia a la compresión de las pastas cementantes a los 28 días.

DISEÑO DE INVESTIGACIÓN.

El diseño de la presente investigación es cuasi-experimental, porque comprara el promedio de las resistencias entre los diferentes grupos de dosificación a fin de encontrar el más alto valor.

MATERIALES.

La arcilla usada en esta investigación fue colectada en el Centro Poblado de Yacya - Provincia de Huari, en el mes de Noviembre del 2015.

Los residuos calcáreos de la concha de abanico se colectaron de la empresa Cultimarine SAC ubicada en la Provincia de Casma, en el mes de Febrero.

MÉTODOS EXPERIMENTALES.

Preparación de las muestras.

En el caso de la arcilla, se procedió de la siguiente manera. Para eliminar la arena presente en la arcilla se efectuó un lavado en malla organza del orden de 150 μm , lo cual permitió el paso de la arcilla y el limo disuelto en el agua y retuvo la arena. El pasante de la malla organza (agua, arcilla y limo) se dejó reposar por 24 horas, al cabo de las cuales, se obtuvo la siguiente separación de fases: en la base del recipiente se ubica el limo, por encima del limo se ubica la arcilla (debido a su menor tamaño de grano) y por encima de ambos el agua. Para eliminar el agua, ésta se sifoneó hasta el ras de la arcilla. Para separar la arcilla del limo se inclinó el recipiente a un orden de 70° respecto a la vertical. Manteniendo ésta inclinación, la arcilla fluyó hacia un recipiente y el limo se quedó adherido a la base del recipiente del lavado. La arcilla limpia de arena y limo se secó a 105°C durante 24 horas en una estufa.

En el caso de la concha de abanico, la limpieza se inició con la eliminación de los restos orgánicos de la cara cóncava se realizó utilizando un cuchillo, los residuos de algas y conchuelas adheridas en la capa externa (convexa) de la concha se realizó

por escobillado y lavado en agua potable corriente. El secado de las conchas de abanico se realizó a una temperatura de 105°C durante 24 horas en una estufa.

Activación térmica y mecánica de los materiales.

La arcilla limpia fue calcinada a 700°C siguiendo el antecedente de Chackchouk et al., (2006). El tiempo de calcinación fue de 1 hora de acuerdo a la referencia de Taylor – Lange et al., (2015). Para disminuir el tamaño de grano generado por la calcinación, la arcilla calcinada se sometió a una activación mecánica por molienda hasta pasar la malla N°200 (76µm).

La activación térmica de la concha de abanico se realizó por calcinación a una temperatura de 1000°C durante 3 horas y 12 minutos, siguiendo el antecedente de Koyama et al., (2003). Para disminuir el tamaño de grano generado por la calcinación, la concha calcinada se sometió a una activación mecánica por molienda hasta pasar la malla N°200 (76µm).

Para medir el potencial Hidrógeno (pH) de las diferentes proporciones de las pastas considerado en este estudio, se procedió de la siguiente manera: para cada proporción de la mezcla arcilla – concha, se diluyó 1 g de esta mezcla en 100 mL de agua destilada, luego de agitarlo se procedió a medir el pH de cada una de las soluciones. También se registró por separado el pH de la arcilla sola y de la concha sola.

Ensayos utilizados para la caracterización de las muestras

Para determinar la composición química de las muestras se realizaron ensayos de Fluorescencia de Rayos X.

Para determinar la composición estructural se realizaron ensayos de Difracción de Rayos X.

Para determinar el potencial Hidrógeno (pH) de las soluciones acuosas correspondientes a las diferentes proporciones de la pasta se utilizó un medidor de pH o peachímetro.

Equipo de moldeado y ensayo de resistencias

Para el moldeado de las muestras, primero se confeccionó un dispositivo especial de bronce con capacidad para 6 muestras, las dimensiones para cada muestra fueron de 2cm de diámetro en su base y 4cm de altura, siguiendo el antecedente de Gniewek (Gniewek, 1987, citado en Chakchouk et al., 2006). Este dispositivo se muestra en la Figura 2.



Figura 2. Dispositivo para moldear pastas. Para el ensayo de la resistencia, se utilizó un Equipo de Anillo de Carga.

III. RESULTADOS

COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA ARCILLA DE YACYA

El material calcinado de acuerdo al numeral 6.3., fue sometido a un Análisis de Fluorescencia de Rayos X en el Laboratorio LABICER de la Universidad Nacional de Ingeniería. El equipo utilizado fue un espectrómetro de Fluorescencia de Rayos X SHIMADSU, EDX -800HS. Los resultados se muestran en la Tabla N° 2.

Tabla N° 2. Composición Química de la arcilla de Yacya - Huari.

Composición Química	Resultados (%)	Método utilizado
Trióxido de Aluminio (Al_2O_3)	52.030	Espectrometría de Fluorescencia de Rayosx
Dióxido de Silicio (SiO_2)	33.638	
Óxido de Potasio (K_2O)	6.869	
Trióxido de Hierro (Fe_2O_3)	6.068	
Dióxido de Titanio (TiO_2)	0.611	
Óxido de Calcio (CaO)	0.345	
Pentóxido de Fósforo (P_2O_5)	0.325	
Trióxido de Azufre (SO_3)	0.047	
Pentóxido de Vanadio (V_2O_5)	0.033	
Óxido de Estroncio (SrO)	0.014	
Óxido de Zinc (ZnO)	0.012	
Óxido de Rubidio (Rb_2O)	0.009	

COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA ARCILLA DE LA CONCHA DE ABANICO

El material térmica y mecánicamente activado, de acuerdo al numeral 6.3., fue sometido a un Análisis de Fluorescencia de Rayos X en el Laboratorio LABICER de la Universidad Nacional de Ingeniería, usando el mismo equipo señalado en el numeral 7.1.1. Los resultados se muestran en la Tabla N° 3.

Tabla N° 3. Composición Química del polvo de la concha de abanico.

Composición Química	Resultados (%)	Método utilizado
Óxido de Calcio (CaO)	97.743	
Dióxido de Silicio (SiO ₂)	0.820	
Óxido de Potasio (K ₂ O)	0.740	Espectrometría de
Óxido de Estroncio (SrO)	0.359	Fluorescencia de
Óxido de Hierro (Fe ₂ O ₃)	0.234	Rayos x
Trióxido de Azufre (SO ₃)	0.095	
Materia Orgánica	0.010	

COMPOSICIÓN ESTRUCTURAL DE LA ARCILLA DE YACYA.

La arcilla lavada de acuerdo al numeral 6.2., fue utilizada para determinar los límites de plasticidad, siguiendo el Método de Atterberg, en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad San Pedro. Los resultados se muestran en la Tabla N° 4.

Tabla N° 4. Límites de Atterberg.

	Límite plástico (%)	Límite líquido (%)	Índice de plasticidad (%)
Arcilla de Yacya	25.10	57.62	32.52

Los datos correspondientes a los Límites de Atterberg que aparecen en la Tabla N°4, fueron representados en el Diagrama de Holtz y Kocvas (Holtz y Kocvas, 1981), como se muestra en la Figura 3.

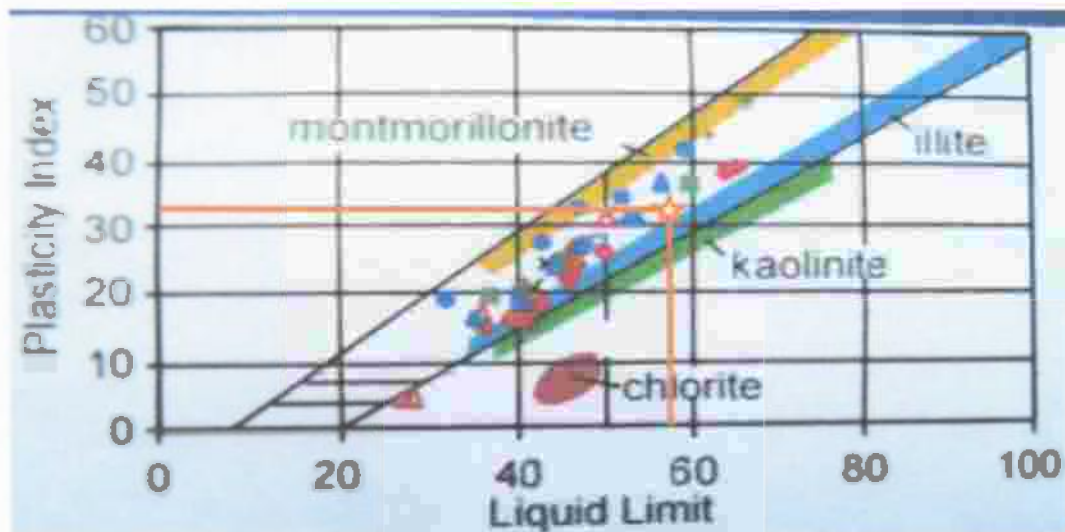


Figura 3. Ubicación de los Límites de Atterberg en el diagrama de Holtz y Kovacs.

El siguiente paso consistió en analizar la arcilla activada, de acuerdo al numeral 6.3., mediante un análisis de Difracción de Rayos X en el Laboratorio LDRX-FCF-UNMSM de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos el 04 de julio del 2016. El equipo utilizado fue un difractómetro marca BRUKER, modelo D8 – FOCUS. Se empleó un tubo de cobre cuya longitud de onda correspondió a $K_{\alpha 1} - Cu$, el cual fue de $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$. El voltaje y la corriente del tubo generador de los Rayos X fueron

de 40 kV y 40 mA. El registro se efectuó en contador de centelleo. Los resultados de este análisis aparecen en la Tabla N°5 y en la Figura 4.

Tabla N°5. Cuantificación de las fases presentes en la Arcilla de Yacya.

MUESTRAS	%W			
	Quartz (SiO ₂)	Kaolinite (Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄)	Muscovite (Na _{0.33} K _{0.67} Rb _{0.01} Ca _{0.01} Al ₃ (Si _{3.33} Al _{0.67}) ₂ O ₁₀ (OH) ₂)	Pyrophyllite (Al ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂)
Arcilla de Yacya	25.3	3.9	39.9	31.0

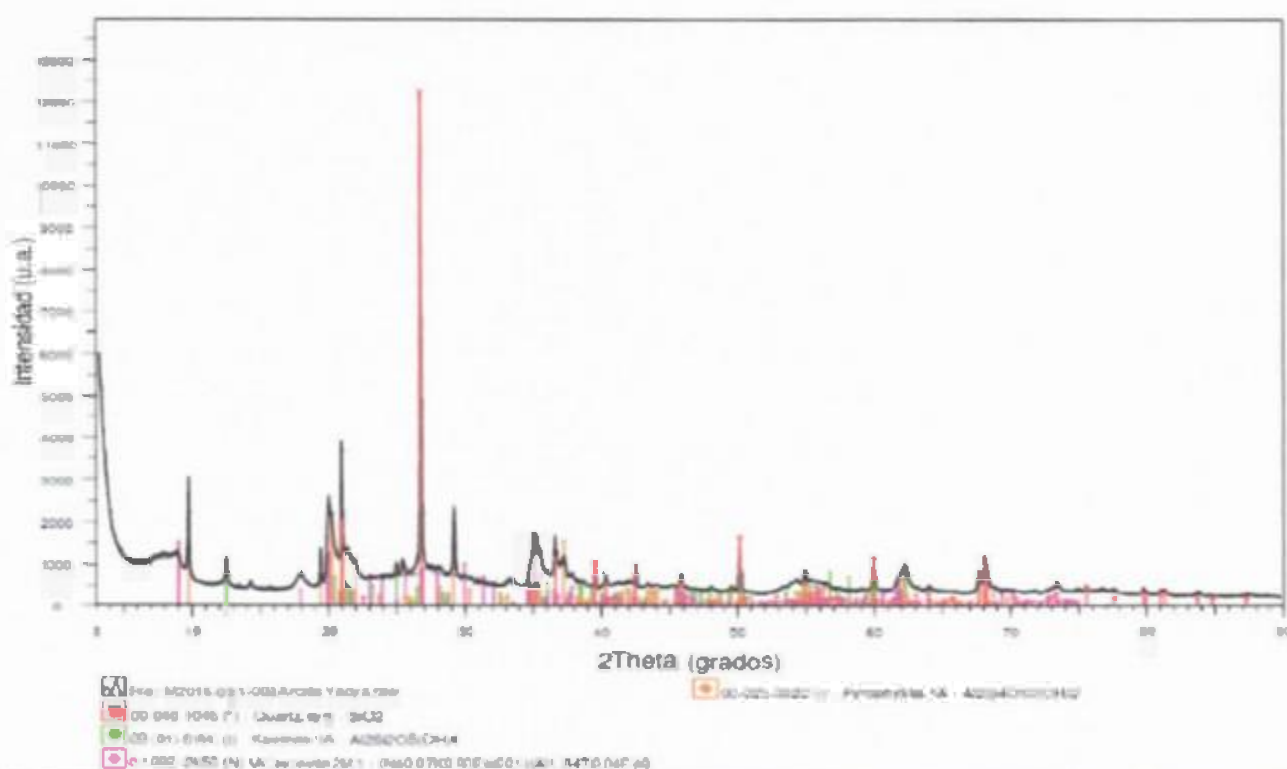


Figura 4. Difractograma de la arcilla de Yacya con los correspondientes picos de difracción de las principales fases encontradas.

COMPOSICIÓN ESTRUCTURAL DE LA CONCHA DE ABANICO.

Los materiales activados de la concha de abanico de acuerdo a lo señalado en el numeral 6.3., fueron sometidos a un Análisis de Difracción de Rayos X en el Laboratorio LDRX-FCF-UNMSM de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, usando el mismo equipo señalado en el numeral 7.2.1. Los resultados de este análisis aparecen en la Tabla N°6 y en la Figura 5.

Tabla N°6. Cuantificación de las fases presentes en la concha de abanico.

Muestra	Fases	Fórmula química	%WL	GOF
Concha de Abanico	calcite	CaCO_3	94.19	2.61
	calciumhydroxide	Ca(OH)_2	5.81	

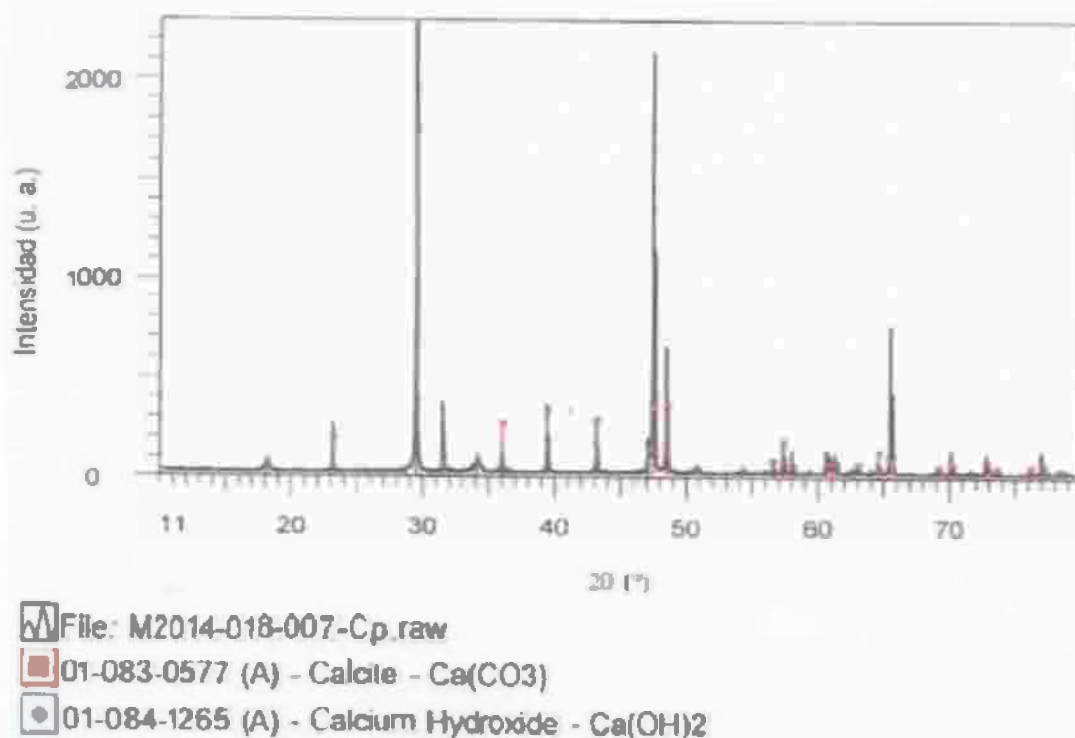


Figura 5. Difractograma de la concha de abanico con los correspondientes picos de difracción de las principales fases encontradas.

MEDICIÓN DEL PH

Las soluciones acuosas preparadas de acuerdo al numeral 6.3., fueron sometidas a las mediciones de sus respectivos pH, utilizando un peachímetro marca OAKTON PC 650. Los resultados aparecen en la Figura 6 y en la Tabla N°7.



Figura 6. pH de las mezclas arcilla/concha. (1): 1/1, (2): 2/1, (3): 3/1, (4): 1/2, (5): 1/3, (6): arcilla sola, (7): concha sola.

Tabla N° 7. pH de los componentes activos de la pasta.

Muestras	pH
arcilla/concha (1/1)	12.18
arcilla/concha (2/1)	11.81
arcilla/concha (3/1)	10.79
arcilla/concha (1/2)	12.16
arcilla/concha (1/3)	12.18
Arcilla sola	7.55
Concha sola	12.24

CONFORMACIÓN DE PROPORCIONES, MOLDEO Y CURADO DE LAS PASTAS.

Las cinco proporciones consideradas en este estudio se determinaron en peso de los componentes de la pasta; es decir, la razón arcilla/concha. Los resultados aparecen en la Tabla N° 8.

Tabla Nº 8. Proporciones arcilla/concha.

Proporciones Arcilla/Concha	Número de probetas	Cantidad de Materiales		
		Arcilla (Ar)	Concha (C)	Agua (A)
1/1	4	30.0 g	30.0 g	68 ml
2/1	2	20.0 g	10.0 g	15 ml
3/1	2	22.5 g	7.5 g	15 ml
1/2	2	15 g	30 g	30ml
1/3	2	11.25 g	33.75 g	30 ml

A fin de alcanzar una uniformidad del mezclado de los elementos en estado sólido arcilla/concha, de cada una de las proporciones consideradas, se procedió a tomar pequeñas proporciones de ambos materiales en una bandeja amplia y mezclarlos entre ellos como se muestra en la Figura 7. Luego se repitió este procedimiento con todas las proporciones de la mezcla.

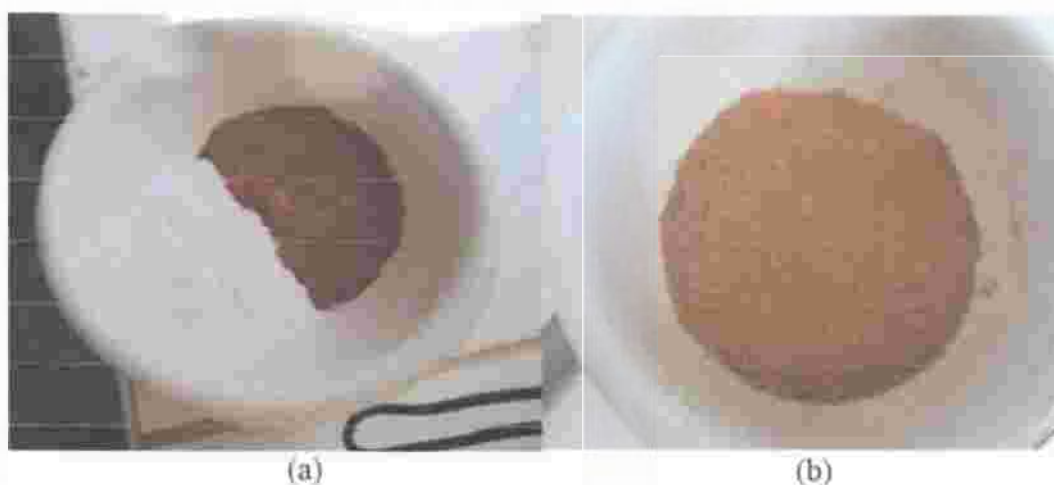


Figura 7. (a) Materiales antes del premezclado. (b) Materiales después del premezclado.

Para las proporciones arcilla/concha que aparecen en la columna uno de la Tabla N°8, se añadió las proporciones de agua que se indican en la columna cinco, obteniéndose de esta forma los valores de la relación agua/sólido que se muestran en la columna seis. Esa mezcla se amasó hasta alcanzar una plasticidad que permitió el moldeado de la misma.

Las pastas permanecieron dentro del molde por siete días y luego se procedió a su desmoldeo como se muestra en la Figura 8.



Figura 8 Pastas desmoldeadas.

El curado se realizó en agua por un periodo de 28 días, siguiendo el antecedente de Chakchouk et al., 2006. Al inicio del proceso de curado se observó la generación de burbujas alrededor de las pastas moldeadas como se aprecia en la Figura 9.



Figura 9. Curado en agua de pastas arcilla/concha.

ENSAYO DE RESISTENCIAS A COMPRESIÓN.

El ensayo a la compresión se realizó en un dispositivo de Anillo de Carga, marca: HUMBOLDT MFG. CO, serie: N° 2712, en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad San Pedro. Los resultados del ensayo se muestran en la Figura 10.

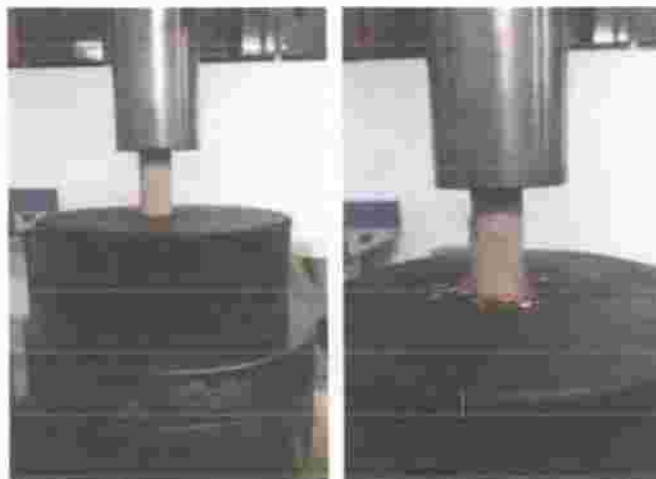


Figura 10. Ensayo a la compresión de la pasta arcilla/concha.

Tabla N° 9. Resistencias a la compresión de las pastas arcilla/concha.

Proporciones Arcilla/Concha	Resistencias (Kg/cm ²)	Promedios (Kg/cm ²)
1/1	14.90	14.90
	14.90	
2/1	19.35	19.76
	20.17	
3/1	18.57	18.18
	17.78	
1/2	12.50	12.22
	11.93	
1/3	11.69	11.80
	11.90	

IV. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

En los resultados de los análisis de Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X, realizados para la arcilla activada de Yacya, que se muestra en la Tabla N° 2; se puede apreciar que, es una arcilla relativamente limpia en su composición química, pues los porcentajes más relevantes de sus óxidos activados son: 52.030% de Trióxido de Aluminio (Al_2O_3) y 33.638% de Dióxido de Silicio (SiO_2); y en menores porcentajes, 6.869% de Óxido de Potasio (K_2O) y 6.068% de Trióxido de Hierro (Fe_2O_3). Estos valores nos permiten estimar la actividad puzolánica de este material siguiendo el Estándar ASTM C618 (1980), el cual establece que la suma de los óxidos de silicio, aluminio y hierro deben superar el 70% para que una arcilla activada pueda considerarse como un material puzolánico. En el caso de la arcilla de Yacya, la suma de 52.030% (Al_2O_3), 33.638% (SiO_2) y 6.068% (Fe_2O_3) alcanza un valor de 91.736% que supera en un 21.736% el criterio de puzolanidad antes mencionado. Es decir, el proceso de activación nos ha permitido obtener un material puzolánico de alta reactividad, que, al combinarse con los óxidos activados de calcio, originarían una pasta aglomerante del tipo cementante.

En el caso de la concha de abanico, el proceso de activación nos ha permitido obtener un biomaterial altamente reactivo con un 97.743% de Óxido de Calcio (CaO). Pero lo más importante de esta activación empleada es que nos ha permitido obtener un material extremadamente limpio, pues los porcentajes de Óxidos de Silicio, Potasio, Estroncio, Hierro y Azufre son del orden de décimas y centésimas. Es decir, es un material con una pureza de óxido de calcio del orden de un 100%. Un material de esta pureza y porcentaje de activación permitiría combinarse muy adecuadamente con los óxidos puzolánicos de nuestra arcilla activada para originar un material aglomerante.

Para la arcilla de Yacya que fue solamente lavada (sección 6.2.) se evaluó sus Límites de Atterberg que aparecen en la Tabla N°4. De acuerdo a estos valores, se puede apreciar que el índice de plasticidad fue de 32.52%. Graficando este índice de plasticidad y el límite líquido de 57.62% en el Diagrama de Holtz y Kovacs que se muestra en la Figura 3, se puede apreciar que se trata de una arcilla de mediana plasticidad. Este Diagrama también nos indica en una primera aproximación que la arcilla de Yacya estaría próxima al dominio Illita; aun cuando no se conoce, en que proporciones y junto a que otros minerales está asociada. Para tratar de dilucidar estos últimos puntos; a la arcilla activada (sección 6.3.) se sometió a un análisis de Difracción de Rayos X con los resultados que se muestran en la Tabla N°5. En esta tabla se puede apreciar los contenidos promedios de material arcilloso en sus fases de moscovita 39.9% y Pirofilita 31.0%. Estos filosilicatos tienen la misma estructura cristalina molecular de la Caolinita, pero requieren temperaturas más elevadas de activación que los 700°C a los que fue sometido este material. Este último punto se dilucidará a futuro cuando se realice su correspondiente Análisis Térmico Diferencial de la arcilla utilizada.

La concha de abanico de Casma, activada (sección 6.3.) y sometido a un Análisis de Difracción de Rayos X exhibió los resultados que se aprecian en la Tabla N°6. En estos resultados muestran que el 94.19% de su peso total es calcita y el 5.81% hidróxido de calcio; esto implica que, el procedimiento de activación empleado ha permitido obtener altos niveles de activación de la concha; pero también queda en evidencia que, el material activado es altamente higroscópico, pues aun cuando se tuvo cuidado con el almacenamiento del material activado, un pequeño porcentaje (5.81%) ya se había hidratado. De otro lado el difractograma de la Figura 5 permite apreciar que, después de la calcinación, el material activado, exhibe una estructura altamente cristalina.

La medición del pH de los elementos que conformaron la pasta arcilla – concha; así como, de las proporciones en las que intervinieron en dichas pastas es de suma importancia para determinar el tipo y el nivel de su reacción puzolánica. En el caso del presente estudio, la Figura 6 muestra el aspecto cualitativo de las soluciones acuosas conformadas de acuerdo al proceso establecido en el numeral 6.3. Así se puede apreciar que el caso de la muestra 6, es la más rojiza de todas pues corresponde a la arcilla sola; el de la muestra 7, es la más blanca pues corresponde a la concha sola; para el caso de las muestra 1, 2, 3, el grado creciente del color rojizo representa el incremento de la proporción de arcilla en estas soluciones; y el grado creciente hacia el color blanco de las muestras 4 y 5 representa el incremento de la proporción de concha. Cuando se analizan los valores de pH que se muestran en la Tabla N° 7, se puede apreciar que a medida que la proporción de arcilla está creciendo desde 1 hacia 3 y la proporción de concha se mantiene constante en 1, el correspondiente pH tiende a bajar de 12.18 hasta 10.79; pero cuando la arcilla se mantiene constante en 1 y la concha se incrementa de 2 a 3 el pH sube de 12.16 a 12.18. Esto se correlaciona bien con el pH de la arcilla sola que es de 7.55 y el más alto de 12.24 de la concha sola. Tomando como referencia el pH de 12 para el Cemento Portland Ordinario (CPO), los valores más favorables encontrados para las proporciones del presente estudio serían el de 12.18 correspondiente a arcilla/concha (1/1) y el de 12.18 correspondiente a arcilla/concha (1/3).

Analizando las proporciones de conformación de las pastas, su moldeo y curado se puede apreciar en la Tabla N°8, que las proporciones se hicieron en masa (gr), como se aprecia en las columnas tres, cuatro y cinco de esta tabla. El resultado más relevante, es que para las cinco proporciones arcilla/concha consideradas (1/1, 2/1, 3/1, 1/2, 1/3) sus correspondientes proporciones agua/arcilla-concha que aparecen en la columna seis (1.13, 0.5, 0.5, 0.67, 0.67), estas relaciones agua/sólido influirán en la resistencia de sus respectivas pastas. El otro aspecto importante en esta etapa del trabajo fue el premezclado manual de los componentes sólidos arcilla y concha

hasta alcanzar su uniformidad; y luego, con el agregado de la correspondiente adición agua/sólido se obtuvo las pastas que se muestra en la Figura 8. Cuando estas pastas moldeadas se introdujeron en agua para su curado por 28 días se observó el burbujeo que se aprecia en la Figura 9. Este burbujeo sería una manifestación del inicio de la hidratación de los óxidos de silicio activados en la arcilla y su reacción con los óxidos de calcio activados en la concha; dando inicio a la reacción de los silicatos de calcio hidratados (C-S-H), similar a los mencionados por Murray et al., (2010) para una pasta de cemento y podrían identificarse a través de un análisis de Difracción de Rayos X.

Los resultados de la resistencia a compresión de las diferentes proporciones de pastas, se presentan en la tercera columna de la Tabla N°9. En esta tabla se puede apreciar que el mejor valor encontrado de la resistencia a la compresión fue de 19.76 Kg/cm²; que corresponde a la proporción arcilla/concha de 2/1; esta proporción, está dentro del límite superior encontrada por Murray et al., (2010) para una pasta de cemento, quien reporta que la razón calcio - silicio (Ca - Si) en una pasta gel de silicatos de calcio hidratados (C-S-H) tiene como límite superior 2.0. El segundo y tercer mejor valor encontrado de 18.18 Kg/cm² y 15.55 Kg/cm² corresponden a las proporciones (3/1) y (1/1) respectivamente. De manera referencial se puede mencionar que para una arcilla de Siliana - Tunisia, que contenía similar composición estructural y química y activada a 700 °C registró menores valores a los encontrados en este estudio (4.0 Kg/cm² para la proporción 1/1, y 7.0 Kg/cm² para la proporción 3/1, Chakchouk et al., 2006).

V. CONCLUSIONES

La arcilla de Yacya es puzolánica y por lo tanto cementante.

La arcilla de Yacya contiene muy bajos porcentajes de caolinita en su composición estructural lo que determina el nivel de resistencia como material suplementario cementante. Los demás componentes de este material arcilloso (cuarzo, moscovita y pirofilita) requieren mayores temperaturas de activación que la caolinita.

La mayor resistencia obtenida corresponde a la proporción arcilla/concha (2/1) y a un pH alcalino de 11.81, esta proporción podría guiar el trabajo de otras arcillas con mayores contenidos de puzolanidad.

La resistencia alcanzada supera en 35% la resistencia del adobe. Por lo tanto, la pasta estudiada tendría potenciales aplicaciones como material constructivo.

VI. RECOMENDACIONES

Continuar caracterizando otras arcillas de la región a fin de encontrar aquellas que contengan altos porcentajes de caolinita y generen mayores resistencias.

Realizar los correspondientes análisis térmicos diferenciales de las nuevas arcillas a estudiar, a fin de encontrar sus temperaturas de activación.

Usar un fluidímetro para determinar la relación agua/ arcilla en la conformación de las pastas.

Utilizar la proporción 2/1 (arcilla/concha de abanico) para elaborar otras unidades constructivas como morteros y probetas de concreto.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Buasri, A., Chaiyut, N., Loryuenyong, V., Worawanitchaphong, P., Trongyong, S. (2013). Calcium Oxide Derived from Waste Shells of Mussel, Cockle, and Scallop as The Heterogeneous Catalysis for Biodiesel Production. *Hindawi Publication corporation. The Scientific World Journal*. Volume 2013. Article ID 460923, 7 pages.
- Chakchouk, A., Samet, B., Mnif, T. (2006). Study on the potential use of Tunisian clays as pozzolanic material. *Applied Clay Science* (33), 79 - 88.
- Druc I. (1996). De la etnografía hacia la arqueología: aportes de entrevistas con ceramistas de Ancash (Perú) para la caracterización de la cerámica prehispánica. *Bull. Inst. fr. études andines* 25 (1), 17-41.
- INEI (2013). *Encuesta Nacional de Hogares*. Recuperado de: <http://www.inei.gob.pe/estadisticas/indicadores-tematicos/Poblacion-y-vivienda/>
- Julián, C. (2015). *Caracterización química y estructural de una arcilla de Campo Verde - Pucallpa* (Manuscrito no publicado). Chimbote - Perú.
- Julián, C., Segura, L. y Jara, W. (2015). Resistencia de nuevos materiales para sustituir el cemento en concreto. *Conocimiento para el desarrollo* 6 (2): 1 - 8.
- Koyama, N., Sosaya, K. y Okuda, S. (2003). *Bionic design of the Scallop Shell development of new products that apply its function*. Recuperado de: <http://ms-laboratory.jp/english/Scallop.pdf>
- Marin, F., Luquet, G., Marie, B., Medokovic. (2008). Molluscan Shell proteins: primary structure, origin and evolution. *Curr Topics Dev Biol* (80), 209 - 276.
- Marin, F., Le Roy, N., Marie, B. (2012). The Formation and Mineralization of mollusk Shell, *Front. Biosci. Schol. B. d* (4), 1099 - 125.
- Muller, C. y Plotze, M. (2005). Flexible structure models applied to swelling montmorillonite. In: Reiner Dohrmann R. and Kaufhold S. (Eds.): *Berichte der DTTG Bd. 11, Beitrage zur Jahrestagung Celle*, 41 - 46.

- Murray, S., Subramani, V., Selvam, R., Hall, K. (2010). Molecular dynamics to understand the mechanical behavior of cement paste. *Journal of the Transportation Research Board*. (2), 75 –82.
- Ostnor T. (2007). Alternative pozzolans as supplementary cementitious materials in concrete. SISTEF Building and Infrastructure COIN – *Concrete Innovation Centre*.
- Soroushian, P. (2012). *Towards Broad Use of Recycled Glass Concrete on MSU Campus* (en línea). Disponible en <http://www.bestpartangreen.msu.edu/content/soroushian>.
- Vijayakumar, G., Vishaling, H., Govindarajuli, D. (2013). *Studies on Glass Powder as Partial Replacement of cement in concrete production*. Recuperado de: <http://www.ijetac.com/files/volume3 Issue2/IJETAE021325.pdf>