



UNIVERSIDAD
DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Valoración de la valva de concha de abanico como
agregado en mezclas de geopolímero**

Tesis para optar el Título de
Ingeniero Civil

Brenda Carrasco Jiménez
Angie Valeria Castillo Pizarro

Asesor:
Mgtr. Ing. Gaby Patricia Ruiz Petrozzi

Piura, marzo de 2025



Declaración Jurada de Originalidad del Trabajo Final

Yo, Brenda Carrasco Jiménez, egresado del Programa Académico de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Piura, identificado(a) con DNI: 74079434, declaro que:

Soy autor del trabajo final titulado:

“Valoración de la valva de concha de abanico como agregado en mezclas de geopolímero”

El mismo que presento bajo la modalidad de Tesis para optar el Título profesional de Ingeniero Civil.

Que el trabajo se realizó en coautoría con los siguientes alumnos de la Universidad de Piura.

- Angie Valeria Castillo Pizarro, identificado con DNI: 73666506

El texto de mi trabajo final es original y no vulnera los derechos de terceros o, de ser el caso, derechos de los coautores, incluidos los derechos de propiedad intelectual, datos personales, entre otros. En tal sentido, el texto de mi trabajo final no ha sido plagiado total ni parcialmente, para lo cual, he respetado las normas internacionales de citas y referencias de las fuentes consultadas. Asimismo, el texto del trabajo final que presento no ha sido publicado ni presentado antes en cualquier medio electrónico o físico; y que la investigación, los resultados, datos, conclusiones y demás información presentada que atribuyo a mi autoría son veraces.

En caso de detectarse el incumplimiento de lo declarado asumo frente a terceros, la Universidad de Piura y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

La asesoría del trabajo estuvo a cargo de los siguientes docentes de la Universidad de Piura:

- Mgtr. Ing. Gaby Patricia Ruiz Petrozzi, identificado con DNI: 02810251

Declaro que:

Luego de haber empleado el software de coincidencia Turnitin, revisado las fuentes de información señaladas por el autor, y en razón de mi experiencia como investigador, declaro que las ideas expuestas en el trabajo final alcanzan las condiciones de calidad, integridad y originalidad acorde a los objetivos institucionales y estándares en materia de investigación. Finalmente, no asumo responsabilidad por la posible vulneración de derechos de autor en el trabajo final referido, pues tal responsabilidad es exclusiva del autor.

Fecha: 24/03/2025.

.....
Firma del autor¹

.....
Firma del asesor¹

¹ Firma idéntica al DNI. No se admite digital, salvo certificado.

Declaración Jurada de Originalidad del Trabajo Final

Yo, Angie Valeria Castillo Pizarro, egresado del Programa Académico de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Piura, identificado(a) con DNI: 73666506, declaro que:

Soy autor del trabajo final titulado:

“Valoración de la valva de concha de abanico como agregado en mezclas de geopolímero”

El mismo que presento bajo la modalidad de Tesis para optar el Título profesional de Ingeniero Civil.

Que el trabajo se realizó en coautoría con los siguientes alumnos de la Universidad de Piura.

- Brenda Carrasco Jiménez, identificado con DNI: 74079434

El texto de mi trabajo final es original y no vulnera los derechos de terceros o, de ser el caso, derechos de los coautores, incluidos los derechos de propiedad intelectual, datos personales, entre otros. En tal sentido, el texto de mi trabajo final no ha sido plagiado total ni parcialmente, para lo cual, he respetado las normas internacionales de citas y referencias de las fuentes consultadas. Asimismo, el texto del trabajo final que presento no ha sido publicado ni presentado antes en cualquier medio electrónico o físico; y que la investigación, los resultados, datos, conclusiones y demás información presentada que atribuyo a mi autoría son veraces.

En caso de detectarse el incumplimiento de lo declarado asumo frente a terceros, la Universidad de Piura y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

La asesoría del trabajo estuvo a cargo de los siguientes docentes de la Universidad de Piura:

- Mgtr. Ing. Gaby Patricia Ruiz Petrozzi, identificado con DNI: 02810251

Declaro que:

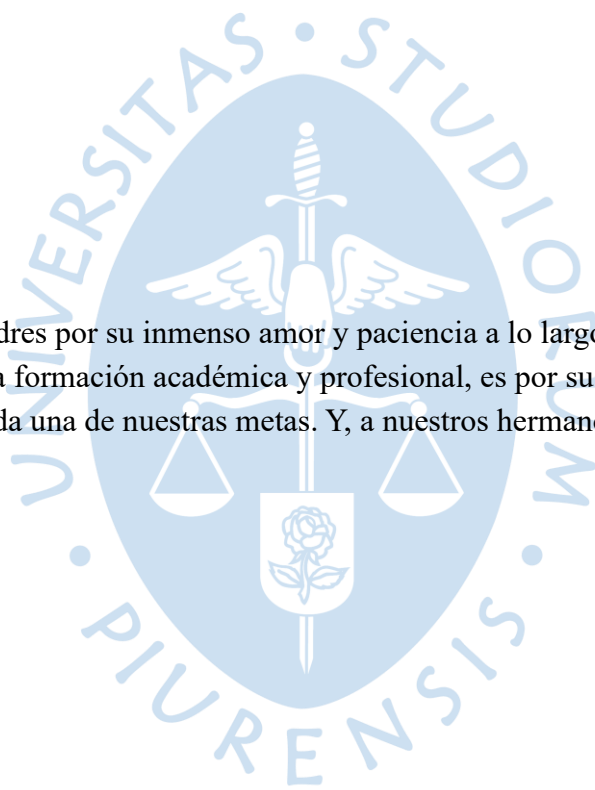
Luego de haber empleado el software de coincidencia Turnitin, revisado las fuentes de información señaladas por el autor, y en razón de mi experiencia como investigador, declaro que las ideas expuestas en el trabajo final alcanzan las condiciones de calidad, integridad y originalidad acorde a los objetivos institucionales y estándares en materia de investigación. Finalmente, no asumo responsabilidad por la posible vulneración de derechos de autor en el trabajo final referido, pues tal responsabilidad es exclusiva del autor.

Fecha: 24/03/2025.

.....
Firma del autor¹

.....
Firma del asesor¹

¹ Firma idéntica al DNI. No se admite digital, salvo certificado.



Dedicatoria

A nuestros padres por su inmenso amor y paciencia a lo largo de toda nuestra vida, en especial en nuestra formación académica y profesional, es por su apoyo incondicional que logramos cumplir cada una de nuestras metas. Y, a nuestros hermanos por todos sus consejos y motivación.

Agradecimientos

Queremos agradecerle en primer lugar a Dios por permitirnos haber llegado hasta este momento tan importante en nuestra formación profesional. Asimismo, a nuestra asesora Mgtr. Ing. Gaby Ruiz por su compromiso y apoyo en todo momento y, al Ing. Paul Ochoa por su disposición y comprensión. Finalmente, a los técnicos del laboratorio de suelos, Francisco Cruz, Estiwar Campos, Wilfredo Lazo y Wigberto Lazo, por sus enseñanzas y colaboración.

Resumen

En la presente investigación se llevó a cabo el estudio experimental de la incorporación de la valva de concha de abanico como agregado en una mezcla de geopolímero. Se decidió emplear geopolímero como pasta y, valva de concha de abanico como agregado en la mezcla. Para la elaboración de la pasta se empleó: FCC (residuo industrial rico en sílice y alúmina, obtenido de una planta industrial en Talara, Piura), como cementante y, una solución activadora (compuesta por hidróxido de sodio y silicato de sodio). Con el uso de materiales alternativos, se cuidaría el medio ambiente, ya que, el cemento ordinario Portland (OPC, por sus siglas en inglés) emite grandes cantidades de dióxido de carbono y requiere de grandes cantidades de energía para su producción.

Por otro lado, al utilizar a la valva de concha de abanico como único agregado en reemplazo de una arena, se buscó darle un uso alternativo a un residuo que es almacenado por millones de toneladas en botaderos, afectando el medio ambiente y por consiguiente al ser humano.

En el primer capítulo, se presenta la teoría del geopolímero y la valva de concha de abanico, así como sus propiedades dentro de las cuales tenemos: trabajabilidad y/o fluidez y cambios de volumen (para ambos componentes) y, la resistencia a la compresión y tracción (en la valva). También, se presenta la caracterización de la valva de concha de abanico como agregado.

Dentro del segundo capítulo, se explica la preparación de muestras desde el diseño de la mezcla, describiendo la granulometría de la valva triturada, su forma, y textura de las partículas, peso específico, absorción y angularidad en los agregados. Se incluye, además, la mezcla y los ensayos para: medir las propiedades en estado fluido y las propiedades mecánicas como son la resistencia a la compresión simple y la resistencia a la tracción indirecta o compresión diametral.

Para el tercer y último capítulo, se exponen los resultados obtenidos. Las principales conclusiones del trabajo apuntan a que la trabajabilidad del geopolímero disminuye más cuando se usa valva que cuando se usa arena natural aún con la misma granulometría y que un 35% en peso de la pasta, es la cantidad máxima de valva que se puede usar en los morteros de geopolímeros para no comprometer la trabajabilidad, ni la resistencia mecánica, evaluadas en este caso, a través de la compresión simple y tracción indirecta.

Finalmente, de acuerdo con el presente estudio se recomienda realizar una mayor investigación de la reacción del calcio proveniente de la valva con la pasta de geopolímero. Puesto que, aún no se tiene asegurado si es que las partículas más pequeñas reaccionen con la pasta geopolimérica, de ser así las propiedades podrían verse modificadas.

Tabla de contenido

Introducción	11
Capítulo 1 Marco teórico.....	12
1.1 Geopolímeros	12
1.1.1 Proceso de geopolimerización.....	13
1.1.2 Trabajabilidad y/o fluidez	15
1.1.3 Cambios de volumen.....	17
1.2 Comportamiento de los agregados en las mezclas	18
1.2.1 Valva de concha de abanico y su comportamiento como agregado	18
Capítulo 2 Plan experimental	22
2.1 Diseño experimental.....	22
2.1.1 Preparación de valvas de conchas de abanico.....	24
2.1.2 Preparación del geopolímero.....	25
2.2 Caracterización de la arena y la valva como agregados.....	26
2.2.1 Forma y textura de los agregados.....	26
2.2.2 Granulometría.....	26
2.2.3 Peso o gravedad específicos y absorción	27
2.2.4 Angularidad.....	30
2.3 Propiedades en estado fresco.....	31
2.4 Propiedades en estado endurecido.....	32
2.4.1 Resistencia a la compresión	32
2.4.2 Resistencia a la tracción indirecta por compresión diametral	32
Capítulo 3 Resultados y discusión	34
3.1 Caracterización de los materiales	34
3.2 Propiedades de la mezcla en estado fresco.....	35
3.2.1 Trabajabilidad y/o fluidez	35
3.3 Propiedades en estado endurecido.....	36
3.3.1 Cambios de volumen.....	36
3.3.2 Peso unitario.....	38
3.3.3 Resistencia a la compresión simple.....	40
3.3.4 Resistencia a la tracción indirecta por compresión diametral	41
3.4 Comparativa entre valva y arena, como agregados, en pasta geopolimérica.....	43
Conclusiones	46
Recomendaciones.....	47

Referencias	48
Apéndices	51
Apéndice 1: Granulometría de agregados y resultados de ensayos de compresión simple y tracción indirecta por compresión diametral.	52
Apéndice 2: Imágenes de los especímenes después de ser ensayados en compresión simple y tracción indirecta por compresión diametral.	61



Lista de tablas

Tabla 1 Cantidades de SiO ₂ , Al ₂ O ₃ y CaO en FCC, FA y MK	15
Tabla 2 Agua extra, superplastificante y flujo del mortero de geopolímero	16
Tabla 3 Trabajabilidad en morteros de geopolímero	17
Tabla 4 Caracterización química de la concha marina triturada.....	19
Tabla 5 Detalle de las muestras evaluadas, con cantidades de pasta de geopolímero, arena y valva, expresadas como peso en gramos de la muestra.....	23
Tabla 6 Huso granulométrico de agregado fino para concreto.....	24
Tabla 7 Dosificaciones en gr/cm ³ para muestras	25
Tabla 8 Resultados de la caracterización de la valva triturada y la arena natural como agregados.....	34



Lista de figuras

Figura 1 Ventajas ambientales y de sustentabilidad del concreto geopolimérico	12
Figura 2 Representación gráfica de las etapas de la geopolimerización	14
Figura 3 Almeja Corbícula en la parte superior, mejillón Dreissena en la parte inferior izquierda y el caracol Viviparus en la parte inferior derecha	19
Figura 4 Efecto de la incorporación de SW sobre la contracción autógena de morteros geopoliméricos a base de MK	21
Figura 5 Moldes usados para los ensayos de (a) resistencia a la compresión y (b) compresión diametral.....	25
Figura 6 Huso granulométrico de NTP 400.037 y curva granulométrica empleada para los agregados en el estudio	27
Figura 7 Muestra de la (a) valva triturada y de la (b) arena natural.....	28
Figura 8 Llenado de las fiolas hasta su 90% de capacidad	29
Figura 9 Equipo para ensayo de angularidad	30
Figura 10 Pasos del ensayo de flujo (a) compactado, (b) enrasado (c) retiro del cono truncado y (d) medición del diámetro	31
Figura 11 Ensayo de resistencia a la compresión en muestras cúbicas de 5 cm de lado	32
Figura 12 Ensayo de resistencia a la tracción en muestras cilíndricas de 5 cm de diámetro y 10 cm de longitud.....	33
Figura 13 Curva granulométrica de los agregados de valva y arena natural	34
Figura 14 Vista de los agregados evaluados (a) agregados naturales y (b) valva triturada.....	35
Figura 15 Resultados del diámetro medido para diferentes contenidos de agregado y valva en el mortero geopolimérico	36
Figura 16 Evolución del cambio de volumen en el tiempo para el geopolímero como pasta (0%) y con valva como agregado en una proporción de 30%, 35%, 40% y 45% a regímenes de curado (a) CPT25 y (b) CPT50	37
Figura 17 Evolución del peso unitario en el tiempo para el geopolímero como pasta (0%) y con valva como agregado en una proporción de 30%, 35%, 40% y 45% en muestras con regímenes de curado CPT25	39
Figura 18 Evolución del peso unitario en el tiempo para el geopolímero como pasta (0%) y con valva como agregado en una proporción de 30%, 35%, 40% y 45% en muestras con regímenes de curado CPT50	39
Figura 19 Evolución en el tiempo de la resistencia a la compresión simple para el geopolímero como pasta (0%) y con valva como agregado en una proporción de 30%, 35%, 40% y 45% para los regímenes de curado (a) CPT25 y (b) CPT50.....	40
Figura 20 Evolución en el tiempo de la resistencia a la tracción indirecta para el geopolímero como pasta y con valva como agregado en una proporción de 30%, 35%, 40% y 45% a regímenes de curado (a) CPT25 y (b) CPT50	42
Figura 21 Evolución de la resistencia a la compresión simple en el tiempo para el geopolímero curado a 25°C como pasta y con valva y arena como agregados en una proporción de 45% y 65%.....	43
Figura 22 Evolución de la resistencia a la tracción indirecta por compresión diametral en el tiempo para el geopolímero curado a 25°C como pasta y con valva y arena como agregados en una proporción de 45% y 65%	44

Introducción

En los últimos años se viene promoviendo el desarrollo de alternativas al cemento portland. Considerado como una de las fuentes principales de emisiones de CO₂ en el mundo, con una contribución total del 8% (Rodgers, 2018). Una de estas alternativas es el geopolímero. Los geopolímeros requieren la mitad de energía de producción del cemento (Mermedas et al., 2017) y aportan alrededor de 0.8 tn de CO₂ por cada tonelada de geopolímero producido. Como aglutinante alternativo ha demostrado buenas propiedades, como: temprana resistencia a la compresión, baja permeabilidad, elevada resistencia química y excelente resistencia al fuego (Singh et al., 2015).

Por otro lado, si bien el cemento y el geopolímero funcionan como aglutinantes, presentan diferencias en su composición y en su microestructura. Además, su fluidez es diferente fundamentalmente relacionada con la viscosidad de la solución activadora que se usa para sintetizar el geopolímero. Por ejemplo, la fluidez de un mortero de cemento suele estar entre el 100% y 120%, lo que corresponde con una mezcla fluida, mientras que un geopolímero con el mismo contenido de agregado y pasta, puede variar entre un 77% y 145% (Mermedas et al., 2017).

En Piura se ha podido fabricar geopolímero usando el residuo FCC, el cual es un subproducto de la industria del petróleo que se utiliza para mejorar la eficiencia del proceso de destilación (Ruiz et al., 2019) con resistencias a la compresión cercanas a los 34 MPa. Esto abre la posibilidad de seguir trabajando con este residuo para extender sus aplicaciones a otros productos en construcción.

Por otro lado, la concha de abanico es uno de los productos relevantes para el desarrollo de la acuicultura en la Región de Piura y tiene un potencial importante para convertirse en un motor para la diversificación productiva (RPPNoticias, 2015). Sin embargo, es un residuo de gran impacto ambiental (Carrillo, 2017). La provincia de Sechura cuenta con dos botaderos municipales solo para el desecho de las valvas que ocupan áreas importantes. Diversas formas de aprovechamiento de este residuo se han desarrollado y en el sector de la construcción también, entre ellos el reemplazo de agregados en la fabricación de concretos.

La posibilidad de usar la valva de concha de abanico como agregado en el geopolímero de FCC representa una gran ventaja de sustentabilidad porque reduciría la contaminación ambiental por emisiones al reemplazar al cemento Portland convencional y ayudaría controlar el consumo de recursos no renovables como la arena. En la presente investigación, se evaluará el comportamiento de la valva de concha de abanico como agregado dentro de la pasta de geopolímero y su efecto en las propiedades en estado fresco y endurecido con el fin de determinar su viabilidad en aplicaciones de construcción.

Capítulo 1

Marco teórico

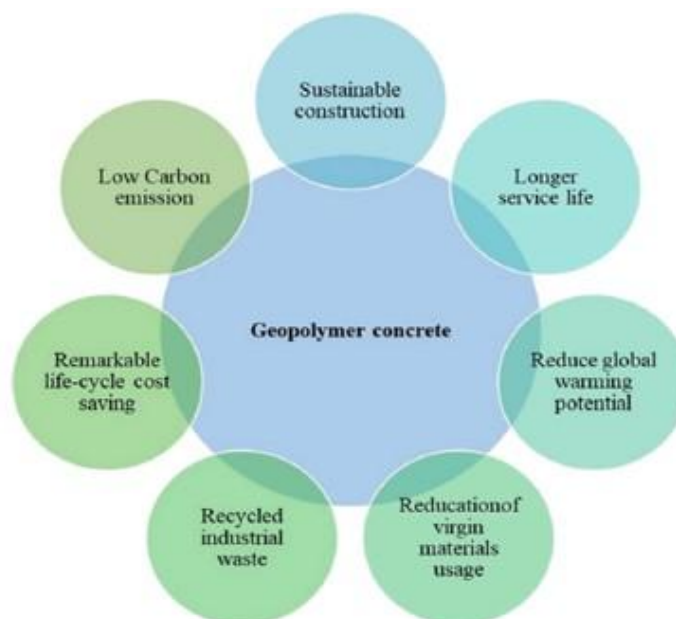
1.1 Geopolímeros

El término geopolímero fue propuesto por el investigador francés Joseph Davidovits alrededor de 1970 (Almutairi et al., 2021). Este compuesto está conformado por polímeros inorgánicos sintetizados por una activación alcalina, formada por materiales ricos en sílice y alúmina a una temperatura ligeramente alta (Ruiz et al., 2019).

Actualmente, es posible usarlo como aglutinante alternativo al cemento con ventajas sustentables (V. Figura 1). El hecho de ser fabricado a partir de subproductos industriales (Mermedas et al., 2017), por medio de la activación alcalina reducen las emisiones de CO₂ hasta en un 20% en comparación con el cemento Portland convencional (Nodehi et al., 2022). Además, se ha observado que mezclas de concreto con geopolímero presentan una resistencia a la compresión comparable con aquellas fabricadas con cemento convencional, además de la baja permeabilidad, una buena resistencia química a los ácidos y un excelente comportamiento frente al fuego (Singh et al, 2015; Almutairi et al, 2021).(V. Figura 1).

Figura 1

Ventajas ambientales y de sustentabilidad del concreto geopolimérico



Nota. Tomado de Almutairi et al. (2021). Potential applications of geopolymer concrete in construction: Case Studies in Construction Materials 15, e00733.

Los geopolímeros se sintetizan usando materiales ricos en sílice y alúmina, también llamados “precursores sólidos”, como: el metacaolín (arcillas calcinadas), la escoria, la ceniza volante, la cáscara de arroz, entre otros. Además, sus propiedades dependen del régimen de

curado, con temperaturas menores a los 100°C en un ambiente de 100% de humedad, lo cual se consigue fácilmente sellando las muestras en bolsas plásticas (Nodehi et al., 2022).

No obstante, para utilizar el geopolímero de modo masivo en la industria de la construcción se requiere estandarización, lo cual es bastante difícil especialmente cuando se usan diversos tipos de precursores sólidos. Además de las dificultades que supone trabajar con soluciones activadoras de elevada alcalinidad (Davidovits, 1991), la variabilidad en la calidad de los precursores sólidos implica un gran desafío. No siempre se logra grandes resistencias mecánicas y cada precursor sólido da lugar a geopolímeros muy particulares, diferenciados no tanto en sus propiedades físicas o mecánicas, sino especialmente en la microestructura final (Nodehi et al., 2022).

1.1.1 *Proceso de geopolimerización*

Para elaborar la mezcla de geopolímero se une el precursor sólido, rico en sílice y alúmina, con una solución activadora que puede estar compuesta por silicato de sodio ($\text{Na}_2(\text{SiO}_3)$) con hidróxido de sodio (NaOH) o, silicato de potasio ($\text{K}_4(\text{SiO}_4)$) con hidróxido de potasio (KOH), ambas con una determinada concentración molar. Aunque es posible trabajar con cualquiera de estos reactivos, las investigaciones previas han demostrado que es mejor trabajar con sodio porque logra disolver mejor los componentes del precursor sólido y de una manera más rápida (Görhan & Kürklü, 2014) (Palomo et al., 2004).

Cuando se elabora la mezcla de geopolímero, existen 3 etapas importantes que constituyen lo que se conoce como “*geopolimerización*”, que es precisamente todo el proceso de formación de un geopolímero (Carhuamaca, 2022). Estas etapas son:

- **Disolución**

En esta etapa, se disuelven los enlaces moleculares de SiO_2 y Al_2O_3 , gracias al NaOH, el cual mantiene separados a la sílice y a la alúmina en el agua de la mezcla, generando así un gel, donde se movilizan la Si y la Al, mientras reaccionan entre sí. En esta etapa se produce la variación de temperatura como resultado del ataque químico por el NaOH.

- **Formación de unidades poliméricas**

Dado que en el gel el medio capilar es el agua, las moléculas de Si y Al se movilizan mientras reaccionan formando cadenas y enlaces para finalmente, en una solución saturada de aluminosilicatos, generar los monómeros, que son moléculas de pequeña masa molecular de sílice, aluminio y oxígeno.

- **Policondensación o solidificación**

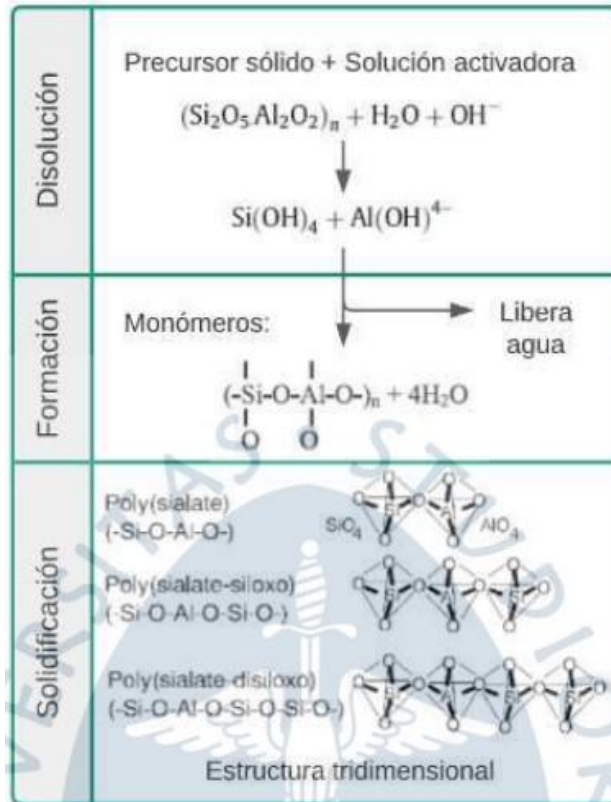
Una vez formados los monómeros, se formarán los polímeros y éstos a su vez formarán los oligómeros, lo que dará lugar a redes de cadenas tridimensionales; este proceso se repite varias veces, hasta formar toda una estructura tridimensional cada vez más sólida. En esta etapa, se presentan 3 estructuras poliméricas: el poli- sialato, el poli- sialato- siloxo y el poli- sialato- disiloxo (Ng et al., 2018). En esta etapa se produce la adquisición de consistencia, similar al

proceso de fragua de un aglomerante inorgánico convencional, y ocurre también la deshidroxilación, que es el proceso de expulsión de agua. Al mismo tiempo, la formación de los polímeros implica cambios de volumen.

En la Figura 2, se puede apreciar una representación gráfica de las reacciones químicas que se dan durante el proceso de geopolimerización.

Figura 2

Representación gráfica de las etapas de la geopolimerización.



Nota. Tomado de Carhuamaca, R. (2022). Estado del arte en la formulación, propiedades y microestructura del mortero de geopolímeros - Piura [Tesis de grado, Universidad de Piura]. Repositorio Institucional.

Aunque los componentes principales de los precursores de los geopolímeros son fundamentalmente sílice y alúmina, también se puede encontrar CaO en proporciones significativas. La sílice se caracteriza por brindar resistencia final; la alúmina cumple la función de controlar la cinética de la geopolimerización y la velocidad de fraguado del gel geopolimérico (Carhuamaca, 2022). Finalmente, el óxido de calcio puede llevar a reacciones tan rápidas que generen contracción en las muestras (Nodehi et al., 2022).

En la Tabla 1 se pueden apreciar alguna composición química de los 3 precursores más comúnmente usados para preparar geopolímeros. (Ruiz et al., 2019; Almutairi et al., 2021)

Tabla 1

Cantidades de SiO₂, Al₂O₃ y CaO en FCC, FA y MK

	SiO₂	Al₂O₃	CaO
Catalizador de craqueo catalítico (FCC)	49.610%	46.230%	0.090%
Ceniza volante (FA)	51.700%	31.900%	1.210%
Metacaolín (MK)	50.995%	42.631%	1.287%

De acuerdo con los valores ofrecidos en la Tabla 1, se podría esperar que el geopolímero de FCC presente una buena resistencia por su alto contenido en SiO₂, con un curado al aire libre. Por su poca presencia de cal y por su contenido de Al₂O₃, se formarían fuertes enlaces tridimensionales lo que podría producir una expansión en su muestra. En el FA, también se podría esperar una buena resistencia, y, de acuerdo con su bajo contenido de Al₂O₃ y alto en cal, se podría esperar una muestra densa con poca expansión, aunque eso también dependerá del régimen de curado que se emplee. Por último, en el MK, por su alto contenido en cal se podría observar una contracción en la muestra, y tomando en cuenta que contiene una cantidad regular de alúmina, la velocidad de reacción también será rápida contribuyendo así a un agrietamiento severo.

1.1.2 Trabajabilidad y/o fluidez

La trabajabilidad, consistencia, temple o fluidez, es una de las propiedades más importantes de un mortero, después de la adherencia. Es la propiedad que permite que el concreto y el mortero fresco sean fáciles de manejar durante el mezclado, transporte, colocado y compactado (Medina, 2016). Además de su importancia en las diferentes actividades en obra, garantiza que la estructura sea firme y resistente, ya que, podrá ser compactada de una mejor manera sin aire atrapado y sin cangrejeras.

En una mezcla geopolimérica existen diferentes parámetros que afectan su trabajabilidad. Partiendo desde la solución activadora. La presencia de hidróxido de sodio (NaOH) puede hacer la mezcla más fluida, como lo hace el agua en el concreto. Sin embargo, su concentración suele estar entre 10M a 15M, de modo que esta concentración determinará la trabajabilidad. Y, además, se sabe que a mayor molaridad se tiene mayor resistencia mecánica, por lo que, es necesario encontrar un equilibrio que beneficie ambas propiedades (Ruiz et al., 2019; Reddy et al., 2010).

Con respecto al SiO₂, este por sí mismo ya es viscoso (más que el NaOH). Por consiguiente, una relación alta de silicato de sodio con respecto del hidróxido de sodio (SS/NaOH) podría llevar a una viscosidad alta, y con ello nuevamente disminuir la trabajabilidad de la mezcla (Muhammad et al., 2019).

Tabla 2

Agua extra, superplastificante y flujo del mortero de geopolímero

Sodium silicate to NaOH ratio	NaOH (M)	Flow (%)	Water (% of fly ash)	or SP (% of fly ash)
0.67	10	135 ± 5	0	0
1	10	125 ± 5	0	0
1.5	10	110 ± 5	0	0
3	10	110 ± 5	2.3	3
0.67	15	135 ± 5	3.4	3
1	15	125 ± 5	3.4	4
1.5	15	110 ± 5	3.4	5
3	15	110 ± 5	4.5	6
0.67	20	135 ± 5	6.8	12
1	20	125 ± 5	6.8	8
1.5	20	110 ± 5	6.8	10
3	20	110 ± 5	7.9	10

Nota. Chindaprasirt et al. (2007). Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer. *Cement & Concrete Composites* 29, 224-229.

De acuerdo con la Tabla 2, se puede apreciar que de la relación SS/NaOH y la molaridad (15M) se obtendrán diferentes resultados de fluidez. Teniendo como porcentaje mínimo de fluidez un 110+-5%, para que la mezcla sea fácilmente colocada en los moldes y un máximo de 135+-5% con una relación SS/NaOH de 0.67, pues cantidades muy bajas de SS, tampoco favorecerían a la mezcla, ya que, sería muy líquida.

Una propuesta de rangos de flujo en morteros geopoliméricos para establecer los niveles de trabajabilidad es propuesta por Mermedas et al. (2017) y se detalla en la Tabla 3. En esta propuesta se establecen valores entre 120 mm y 250 mm como adecuados de trabajabilidad.

Tabla 3
Trabajabilidad en morteros de geopolímero

Workability criteria of Geopolymer mortar.

Sl. No.	Flow Diameter	Workability
1	Above 250	Very High
2	180–250 mm	High
3	150–180 mm	Moderate
4	120–150 mm	Stiff
5	Below 120 mm	Very Stiff

Nota. Tomado de Mermedas et al. (2017). Effect of aggregate properties on the mechanical and absorption. Engineering Science and Technology, an international Journal, Vol. 20, Issue 6, 1642-1652.

1.1.3 Cambios de volumen

Los cambios de volumen que se ven reflejados en las muestras de geopolímero, se deben a diferentes reacciones internas, como se explicó en 1.1.1. De acuerdo con ellas, existen tres factores principales que determinan los cambios volumétricos de la mezcla geopolimérica, la concentración de NaOH, el régimen de curado y la concentración del calcio.

✓ La concentración de NaOH

Cuando se tiene una alta molaridad, las reacciones de disolución se desarrollan mejor, tanto en velocidad como en la cantidad de componentes, de modo que se forman mejor las estructuras tridimensionales de los oligómeros resultantes, generando un mayor cambio de volumen. Además, una mayor concentración de NaOH supone una mezcla más viscosa, es decir, menos fluida, lo que puede influir en la facilidad de reorganización de los componentes, dando lugar a la formación de sistemas tridimensionales más estrechos, con una configuración más densa y menor cambios de volumen.

✓ El régimen de curado

La temperatura a la que se deja curar la mezcla es de gran importancia y genera un gran impacto en su comportamiento. Cuando se realiza un curado a una temperatura ambiente ($\sim 25^{\circ}\text{C}$), los componentes del precursor sólido tienen un periodo más prolongado para reaccionar y formar las redes tridimensionales, siendo estas más resistentes. Mientras que, en un curado a temperaturas más altas, lo que ocurre es que al inducir calor a la mezcla las reacciones se aceleran y, con un periodo de tiempo menor, las partículas no pueden movilizarse ni reorganizarse con facilidad, ni se logrará que se generen en su totalidad los productos, requiriendo así de menos espacio lo que hará que haya una expansión muy pequeña o que no exista. La configuración que se forme sería menos densa y probablemente menos resistente en comparación a un curado al aire libre. Existen varios métodos de curado para controlar la humedad como es el caso de la protección de muestras con el sellado de bolsas, aunque en sistemas industriales se pueden usar los mismos cuartos de curado que se usan para los elementos de concreto convencionales.

✓ El contenido de Ca en el precursor sólido

El calcio dentro de una mezcla cementante, se comporta como un acelerador del proceso de geopolimerización. Cuando hay calcio en el precursor sólido se evita realizar un curado con temperaturas altas, porque esto aceleraría el proceso de geopolimerización provocando que los enlaces producto de la reacción no sean tan resistentes. Incluso podría conllevar a una contracción de la muestra (Nodehi et al., 2022).

1.2 Comportamiento de los agregados en las mezclas

Los agregados se usan en Ingeniería Civil fundamentalmente para la fabricación de concretos hidráulicos, asfálticos y para morteros. Localmente en Perú se usan agregados naturales, aunque para algunas aplicaciones se prefieren agregados artificiales.

El agregado constituye entre el 60% al 70% del volumen total del concreto. Para obtener una resistencia y trabajabilidad óptimas, se deben utilizar las proporciones correctas de los agregados, controlando sus características físicas.

Entre las principales características se encuentra, la forma del agregado. La forma angulosa o redondeada del agregado influirá mucho en la resistencia y compacidad de la mezcla. Un agregado con partículas angulosas suele brindar mayor trabazón entre sí al momento de resistir las cargas de compresión, mientras que un agregado con forma redondeada facilitará el acomodo de sus partículas reduciendo los espacios vacíos donde debería ir la pasta. Asimismo, la absorción es una propiedad que ayudará a controlar la cantidad de agua que le quitará a la mezcla (Rivva et al., 1993). Finalmente, el peso unitario permite cuantificar el volumen que el agregado va a ocupar dentro del concreto (incluyendo los espacios vacíos). (ASTM C29/C29M-17a, 2023)

1.2.1 Valva de concha de abanico y su comportamiento como agregado

El uso de desechos de conchas marinas en la formulación de concretos y morteros de cemento Portland convencional (OPC) se ha investigado ampliamente y se ha encontrado que se pueden obtener propiedades mecánicas y de trabajabilidad adecuadas cuando se reemplaza hasta un 20 % (Hasnaoui et al., 2022).

La especie de las conchas de abanico, conocidas así en Perú, son moluscos propiamente denominados como “conchas de Vieira”. Como todo molusco, están conformados por dos valvas (caparazones) duras y simétricas, unidas por un ligamento articulado. Por dentro, las valvas son de textura suave mientras que por fuera tienen una apariencia acanalada y rugosa (Varhen et al., 2017).

Químicamente, la valva de cualquier molusco es carbonato de calcio (Varhen et al., 2017) y no tiene reactividad álcali-agregado (V. Tabla 4).

Tabla 4
Caracterización química de la concha marina triturada

Table 4
Chemical characterization of crushed seashell (CSS) using X-ray Fluorescence.

Compound	Chemical characterization (%)								L.I.*
	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	
CSS	0.10	53.70	0.10	0.18	0.03	0.50	0.01	0.32	44.4

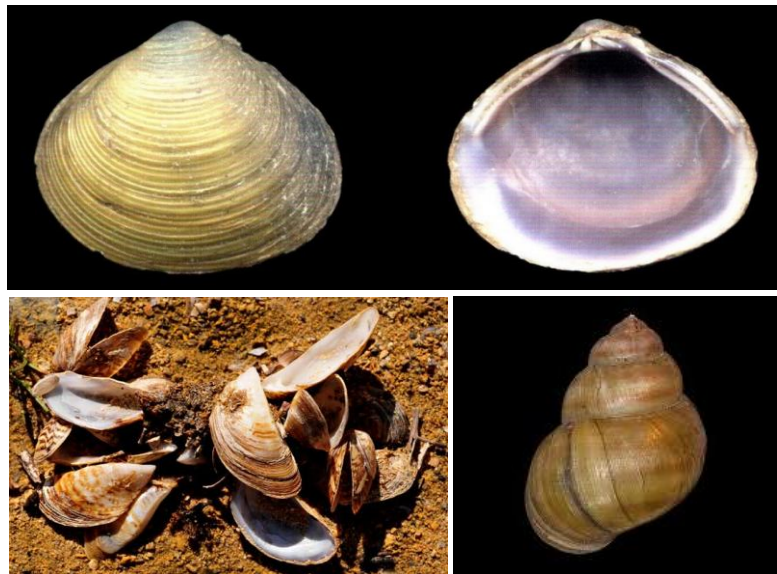
* Loss of ignition.

Nota. Tomado de Varhen et al. (2017). Experimental investigation of Peruvian scallop used as fine aggregate in concrete. *Construction and Building Materials* 136, 533-540.

Otras especies de moluscos evaluadas en la literatura como alternativa a los agregados son la almeja *Corbícula*, el mejillón cebra *Dreissena*, ambos bivalvos (que corresponderían a la concha blanca y el choro), y el caracol *Viviparus* (V. Figura 3). Se ha verificado que, empleando la *Corbícula* a un 20% del volumen de agregados no reducen la trabajabilidad, la porosidad, la carbonatación o la disolución del cloruro, pero si se emplea a un 100% todas estas propiedades se ven afectadas negativamente. (Bedda et al., 2022).

Figura 3

Almeja Corbícula en la parte superior, mejillón Dreissena en la parte inferior izquierda y el caracol Viviparus en la parte inferior derecha.



Por otro lado, de acuerdo con Chen et al. (2019) en países como China, Japón, Estados Unidos, Corea del Sur, Tailandia, Francia, y España, el molusco bivalvo dominante es la Ostra, asociada principalmente a la industria alimentaria. Las principales aplicaciones que se han evaluado han sido el reemplazo del agregado grueso, fino o como un agente activador en el cemento. Asimismo, se han evaluado las ostras como agregado fino en mezclas de cemento Portland (OPC), combinado con ceniza volante (FA, por sus siglas en inglés) y con escoria de alto horno granulada (GGBS, por sus siglas en inglés) cada uno por separado. En estos trabajos

se observó que, la incorporación de FA y GGBS en un mortero con residuos de ostras trituradas causaba una reducción en la densidad endurecida del mortero, aunque podrían mejorar si se realizaban curados prolongados. En cuanto a la resistencia a la compresión, la GGBS, presentó una mejora comparada con el FA. Finalmente, se observó que ambos tienen una menor resistencia a la compresión que el OPC, con una deformación más amplia.

En general, se sabe que las características más importantes de las valvas como agregados son la angularidad, la forma aplanada y textura lisa de las láminas, porque pueden aumentar la necesidad de pasta de cemento en la mezcla de concreto para mantener la trabajabilidad requerida, lo que resulta en un aumento del volumen de aire atrapado y un desempeño inferior en el concreto. De hecho, la trabajabilidad del concreto disminuye a medida que aumenta el porcentaje de incorporación de conchas, tanto como agregados finos o gruesos (Bedda et al., 2022). De igual forma, estudios realizados por Yang et al (2005). confirmaron que a medida que aumentaba el porcentaje de sustitución de concha de ostra, la trabajabilidad del concreto disminuía.

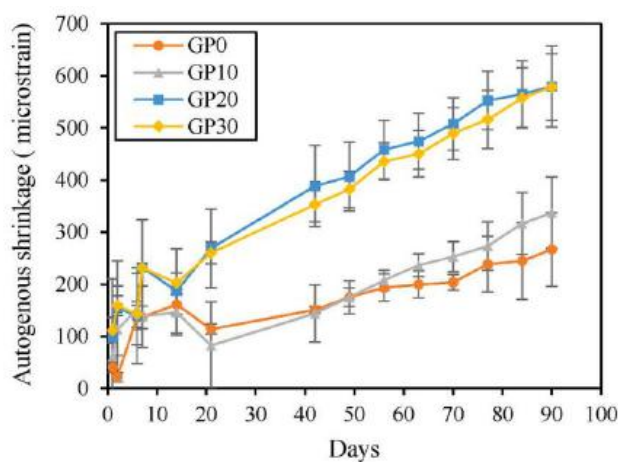
Otro aspecto importante es la dureza. La poca dureza de las valvas en comparación con los agregados convencionales y el aumento de la porosidad total debido a su forma facilita el atrapamiento de aire y perturba el empaque granular, disminuyendo la resistencia a la compresión (Bedda et al., 2022).

Del mismo modo afectan la resistencia a la tracción. Por ejemplo, con las conchas de abanico, a medida que aumenta la tasa de sustitución, la resistencia a la tracción disminuye ya que la forma de la valva conduce a una mayor concentración de tensiones en la pasta alrededor de la partícula. Además, es posible que la superficie de los caparazones no se adhiera a la pasta o que el caparazón en sí sea muy suave y liso, disminuyendo la adherencia y reduciendo la tracción. La incorporación de un 20% de conchas induce una disminución del 25% en la resistencia a la tracción (Bedda et al., 2022).

Hay muy pocos estudios relacionados con el uso de las valvas de moluscos como agregados en los geopolímeros Hasnaoui et al (2022) evaluó el impacto del agregado de concha de abanico (SW) en la contracción autógena de un mortero geopolimérico de metacaolín, y encontró que el aumento de concha en la mezcla conduciría a un aumento de la contracción autógena (V. Figura 4), mientras que con reemplazos del 10% la contracción autógena se mantenía muy similar a la del geopolímero patrón.

Figura 4

Efecto de la incorporación de SW sobre la contracción autógena de morteros geopoliméricos a base de MK



Nota. Tomado de Hasnaoui et al. (2022). Valorization of queen scallop shells in the preparation of metakaolin-based geopolymer mortars. *Journal of Building Engineering* 53, 104578.

Además de este trabajo, no se han encontrado aún trabajos que evalúen otras propiedades en los geopolímeros con las valvas de moluscos como agregados. Por ello, una evaluación preliminar de las propiedades en estado fresco y endurecido puede ser de gran ayuda para tener un panorama más claro de su importancia como material de construcción.

Capítulo 2

Plan experimental

2.1 Diseño experimental

Como se ha explicado, el propósito fundamental es evaluar la factibilidad de usar las valvas de moluscos como agregados en mezclas de geopolímeros. Los efectos más relevantes se dan en la trabajabilidad y en la resistencia mecánica, por lo que el plan experimental propuesto se centra en la trabajabilidad, los cambios de volumen durante el proceso de fragua y endurecimiento, y las propiedades mecánicas.

Aunque el objetivo no es comparar el comportamiento de la valva con el de una arena natural, sí permite establecer órdenes de magnitud de los efectos en el mortero si se incluye una comparación entre ambos materiales. Por ello, la comparación entre ambos agregados sólo se ha reservado al estado fresco y para ciertos contenidos de agregado en estado endurecido.

Para comparar el efecto de la valva como agregado en el geopolímero se añadió la valva a la pasta de geopolímero en proporciones de 30%, 35%, 40% y 45% medidas en peso respecto de la cantidad de pasta. En ambos casos, se ha incluido una muestra patrón sin valva (0%) para observar el comportamiento del mortero respecto a la pasta pura. En cuanto a la resistencia mecánica, en el geopolímero se midió en dos condiciones de curado: a temperatura ambiente (CPT25) y a 50°C en el horno protegidos con bolsa plástica (CPT50), aplicados por 24 horas, para las edades de 1, 7 y 28 días. Adicionalmente, y con el fin de evaluar el comportamiento de la valva como agregado comparado con un agregado natural, se prepararon algunas muestras con arena natural en las proporciones de 30%, 35%, 40% y 45% para evaluar el flujo en estado fresco y con 45% y 65% y un curado a 25°C para evaluar la resistencia mecánica, también a 1, 7 y 28 días. El detalle de las muestras se presenta en la Tabla 5.

Tabla 5

Detalle de las muestras evaluadas, con cantidades de pasta de geopolímero, arena y valva, expresadas como peso en gramos de la muestra.

Muestras	Ensayos
Patrón	Sólo resistencia a la compresión simple y compresión diametral.
MA30	Sólo para la fluidez.
MA35	
MA40	
MA45	Fluidez, resistencia a la compresión simple y compresión diametral.
MA65	Sólo resistencia a la compresión simple y compresión diametral.
MV30	Todas las propiedades
MV35	
MV40	
MV45	
MV65	Sólo para compresión simple y compresión diametral.

Notas:

- MA30, muestra de arena donde 30 representa el 30% del agregado en la mezcla y, del mismo modo para el resto de las muestras.
- MV30, muestra de valva donde 30 representa el 30% del agregado en la mezcla y, del mismo modo para el resto de las muestras.

La trabajabilidad se midió a través de la prueba de flujo, y el cambio de volumen se midió como el cambio de altura de los especímenes al completarse el proceso de endurecimiento.

En estado endurecido, se midió la resistencia mecánica, como resistencia a la compresión en especímenes cúbicos de 5 cm de lados y como resistencia a la tracción en especímenes cilíndricos de 5 cm de diámetro y 10 cm de altura a través de la compresión diametral.

El desarrollo de las muestras y sus respectivos ensayos en estado fresco y endurecido fueron realizados en las instalaciones del Laboratorio de Ensayos de Materiales de Construcción (LEMC) de la Universidad de Piura (UDEP).

Es importante mencionar que, las normas que se han empleado son para morteros de cemento Portland; sin embargo, para el estudio llevado a cabo, se han adaptado para geopolímeros.

2.1.1 Preparación de valvas de conchas de abanico

Las valvas de concha de abanico se obtuvieron de la provincia de Sechura. Después de limpiar la valva y secarla en el horno (a 50°C por 15 minutos), se trituró, pasó por un proceso de tamizado de acuerdo con la norma ASTM C 136-96a “*Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*” y se preparó por tamaños para construir una granulometría semejante a la que especifica la norma ASTM C 33 “*Standard Specification for Concrete Aggregates*” (NTP 400 037: Agregados. Agregados para concreto. Requisitos). (V. Tabla 6)

Tabla 6

Huso granulométrico de agregado fino para concreto

Tamiz	Porcentaje que pasa
9.5 mm (3/8 pulg)	100
4.75 mm (No. 4)	95 a 100
2.36 mm (No. 8)	80 a 100
1.18 mm (No 16)	50 a 85
600 µm (No. 30)	25 a 60
300 µm (No. 50)	5 a 30
150 µm (No. 100)	0 a 10
75 µm (No. 200)	0 a 3A,B
A Para concreto no sujeto a la abrasión, el límite para el material más fino que el tamiz 75 µm (No. 200) debe ser máximo 5%.	
B Para el agregado fino artificial u otros reciclados, si el material más fino que el tamiz 75 µm (No. 200) consiste en polvo de trituración, esencialmente libre de arcilla o esquistos, este límite debe ser 5% para concreto sujeto a abrasión y máximo 7% para concreto no sujeto a abrasión.	

Nota. Tomado de: INDECOPI. (2021). NTP 400.037: Agregados. Especificaciones normalizadas para agregados en concreto. Lima.

Primero, la valva pasó por un proceso de limpieza con agua y escobillas, para luego, dejarlas secar el horno a una temperatura de 50°C.

Seguidamente, se sometió a un proceso de triturado con un pisón manual hasta obtener un tamaño para que pudiera ser procesado por un molido eléctrico. En el molino se procesó la valva, separando el material con tamices 8; 16, 30, 50, 100 y 200. El pasante del tamiz 200 se descartó.

Una vez unidas las porciones de valva según los tamaños requeridos, se midieron las propiedades físicas de la mezcla final.

2.1.2 Preparación del geopolímero

Para la pasta de geopolímero se utilizó FCC procedente de la refinería de Talara. Para la solución activadora se utilizó silicato de sodio (SS) e hidróxido de sodio (NaOH), con una de proporción de 0.78 para la relación de NaOH/SS (V. Tabla 7 de dosificaciones). Luego de mezclarlos, se dejó reposar la solución por al menos 2 horas antes de usarla, para que se estabilizara térmicamente.

Tabla 7

Dosificaciones en gr/cm³ para muestras

Muestra [%]	Muestras cúbicas			Muestras cilíndricas		
	FCC [gr]	Solución Activadora [gr]	Agregado (valva y/o arena) [gr]	FCC [gr]	Solución Activadora [gr]	Agregado (valva y/o arena) [gr]
0	75.00	82.20	-	120.00	131.52	-
30	52.50	57.54	47.16	84.00	92.06	75.46
35	48.75	53.43	55.02	78.00	85.49	88.03
40	45.00	49.32	62.88	72.00	78.91	100.61
45	41.25	45.21	70.74	66.00	72.34	113.18

Para preparar el mortero geopolimérico se colocó el precursor sólido (FCC) en la mezcladora y luego se vertió la solución activadora, mezclando con una cuchara por 5 minutos. Después de ello, se agregó el agregado (arena o valva) y se volvió a mezclar durante 1 a 1.5 minutos aproximadamente, hasta que se formó una pasta uniforme. Finalmente se llevó la mezcla a la máquina mezcladora de morteros por 5 minutos más.

Con el mortero listo, y los moldes (cilíndricos y/o cúbicos) previamente recubiertos por film plástico y aceitados, se procedió a verter una primera capa de la mezcla, luego se compactó con una varilla con 25 golpes, se repitió el mismo procedimiento para una segunda capa, se enrasó el molde y finalmente, se dieron 15 ligeros golpes alrededor del molde con ayuda de un martillo de goma.

Figura 5

Moldes usados para los ensayos de (a) resistencia a la compresión y (b) compresión diametral.



(a)

(b)

2.2 Caracterización de la arena y la valva como agregados

Tanto en la arena como en la valva de concha de abanico se midió el peso o gravedad específica, absorción al agua y angularidad. Además, como la granulometría de la valva fue construida a partir de la granulometría de la arena, se evaluó en ambos materiales para verificar que fueran coincidentes. Como elemento adicional, se comparó la forma y textura, de manera visual.

2.2.1 Forma y textura de los agregados

Para la determinación de la forma y textura del agregado se tomó en cuenta lo mencionado en la norma peruana NTP 400.011.

Se observó la forma y la textura de las partículas de la valva de forma visual. Se identificó primero la valva en su forma completa y, posteriormente, se observó en los diversos tamaños de acuerdo con su granulometría.

2.2.2 Granulometría

La granulometría es la distribución por tamaños que un agregado posee. En este caso, se realizó la granulometría de la valva tomando como base la de una arena. Se siguió el proceso establecido en la NTP 400.012.

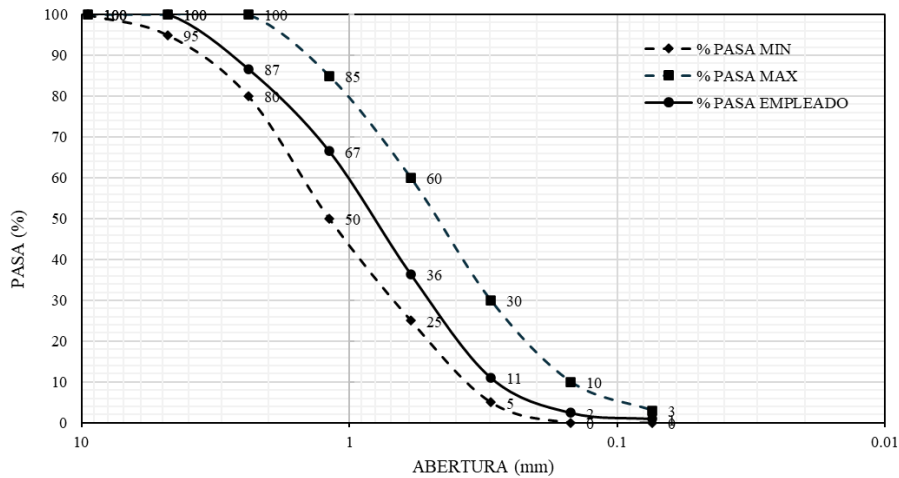
Primero, se seleccionó los tamaños adecuados de tamices para agregados finos. Seguidamente, se procedió con el tamizado por orden de abertura decreciente. Se agitó el tamiz manualmente por un periodo suficiente de tal manera que al final no más del 1 % de la masa del residuo sobre uno de los tamices, pasará a través de él durante 1 minuto de tamizado manual. Se sostuvo firmemente el tamiz individual en posición ligeramente inclinada en una mano, se golpeó el filo contra el talón de la otra mano con un movimiento hacia arriba y a una velocidad de cerca de 150 veces por min, girando el tamiz un sexto de una revolución por cada 25 golpes.

Una vez realizado todo el procedimiento por todos los tamices seleccionados, se descartó el pasante del tamiz 200.

Asimismo, se verificó que la curva granulométrica de la arena corresponde con los límites que propone la norma NTP 400.037 para un agregado fino de mortero de cemento convencional (V. Figura 6). Dicha curva es la mejor manera de representar la distribución del tamaño de las partículas. En el eje de las abscisas se ubicaron las aberturas de los tamices (en escala logarítmica), mientras que en el eje de las ordenadas están los porcentajes acumulados que pasan por cada tamiz.

Figura 6

Huso granulométrico de NTP 400.037 y curva granulométrica empleada para los agregados en el estudio.



2.2.3 *Peso o gravedad específicos y absorción*

La determinación del peso o gravedad específicos se realizó siguiendo lo establecido en la norma peruana NTP 400.022. Se colocó la muestra de ensayo en un recipiente adecuado y se secó en la estufa hasta una masa constante a una temperatura $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Se dejó enfriar hasta una temperatura apropiada de manipulación (aproximadamente $50\text{ }^{\circ}\text{C}$), se cubrió con agua, ya sea por inmersión o por adición hasta alcanzar al menos 6% de humedad del agregado fino y se dejó reposar durante $24\text{h} \pm 4\text{h}$. Una vez pasada esa cantidad de tiempo, se procedió a decantar el exceso de agua con cuidado para evitar la pérdida de finos, se extendió la muestra sobre una superficie plana no absorbente expuesta a una corriente suave de aire caliente y se movió con frecuencia para garantizar el secado homogéneo.

Figura 7

Muestra de la (a) valva triturada y de la (b) arena natural



(a)

(b)

Para comprobar que se alcanzó la condición de superficie saturada seca se colocó el molde firmemente sobre una superficie no absorbente suave con el diámetro mayor hacia abajo. Se colocó una porción del agregado fino suelto parcialmente seco en el molde llenándolo hasta el tope y se amontonó el material adicional por encima de la parte superior del molde sujetándolo con los dedos de la mano que sostiene el molde. Ligeramente se apisonó el agregado fino en el molde con 25 golpes con la barra compactadora. Se realizó cada golpe aproximadamente a 5 mm por encima de la superficie superior del agregado fino, dejando que la barra compactadora caiga libremente bajo la atracción gravitatoria de cada golpe. Se ajustó la altura inicial de la nueva elevación de la superficie después de cada golpe y se distribuyeron los golpes sobre la superficie. Luego, se retiraron las partículas sueltas de la base y se levantó el molde verticalmente con la ligera caída del agregado fino moldeado se determinó que se había llegado a un estado de superficie seca.

Una vez comprobado el estado de superficie seca se realizó el procedimiento del ensayo. Se introdujo en cada una de las fiolas 500 g del agregado en estado de superficie saturada seca y se llenó de agua adicional hasta aproximadamente el 90% de su capacidad. Se agitaron las fiolas de una manera que no se degrade la muestra y se llevó el nivel de agua en las fiolas a su capacidad de calibración. Se determinó la masa total de la fiola, el espécimen y el agua. Se retiró el agregado fino del picnómetro, se secó en el horno a una masa constante, a temperatura de $110\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$, se enfrió al aire a temperatura ambiente durante $1\text{ h} \pm 1/2\text{ h}$ y se determinó la masa. Por último, se determinó la masa de la fiola llena a su capacidad de calibración con agua a $23,0\text{ °C} \pm 2,0\text{ °C}$.

Figura 8

Llenado de las fiolas hasta su 90% de capacidad



Con dichos datos, se pudo obtener el valor de gravedad específica mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Gravedad Especifica (SSD)} = \frac{S}{(B + S - C)} \dots\dots \text{Ec. 1}$$

Donde:

B = masa del picnómetro lleno de agua hasta la marca de calibración (g).

C = masa del picnómetro lleno de la muestra y el agua hasta la marca de calibración (g).

S = masa de la muestra de agregado o suelo saturado superficialmente seca (g).

También, se obtuvo el valor de absorción mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Absorcion (\%)} = \frac{S - A}{A} \times 100 \dots\dots \text{Ec.2}$$

Donde:

A = masa de la muestra seca al horno (g).

S = masa de la muestra de agregado o suelo saturado superficialmente seca (g).

2.2.4 Angularidad

Este ensayo se realizó siguiendo las indicaciones de la MTC E 222-20000. Se usó un cilindro metálico de volumen conocido y un embudo con su soporte. Este mantuvo al embudo firmemente en posición con los ejes para que fuera colineal (dentro de un ángulo de 4° y un desplazamiento de 2mm) con los ejes de la medida cilíndrica. La abertura del embudo en la parte inferior se colocó a una distancia de 115 ± 2 mm por encima de la parte superior del cilindro como se muestra en la Figura 9.

Figura 9
Equipo para ensayo de angularidad



Se seleccionó 100 g del material que pasa la malla N°8 y que se retiene en la N°200.

Dicha muestra se vertió en su totalidad dentro del embudo, manteniendo tapado el orificio inferior con los dedos para impedir el paso del material al cilindro ubicado debajo del embudo. Luego se sacaron cuidadosamente para que la muestra cayera libremente sobre el cilindro hasta que este estuviese lleno del material.

Después, se enrasó el exceso del material fino sobre el molde cilíndrico con un movimiento sencillo de una espátula, evitando cualquier tipo de vibración que pudiera causar compactación de la muestra de agregado fino en el recipiente metálico, hasta que culminó dicho procedimiento. Se retiró el material adherido en la parte exterior del cilindro y se determinó el peso del cilindro más la muestra en la balanza, con una precisión de 0.1g. Esto se repitió por 3 veces y el resultado final es el promedio de las tres medidas.

Finalmente, se registró el peso del recipiente vacío. La angularidad se obtuvo mediante la siguiente ecuación:

$$\%a = \frac{V - \frac{W_{agregado}}{G_{sb}}}{V} \times 100 \dots\dots\dots \text{Ec.3}$$

Donde:

V= Volumen del cilindro ml.

Wagregado= Peso neto del agregado g.

Gsb= Gravedad específica del agregado fino g/ml.

%(a) = Vacíos sin compactar en el material en % (Angularidad).

El resultado de este ensayo indica el porcentaje de vacíos que tiene el agregado en estado suelto. En consecuencia, se podrá comparar el grado de angulosidad entre la valva y la arena natural.

2.3 Propiedades en estado fresco

Para las propiedades en estado fresco, se midió la trabajabilidad y/o flujo del mortero, mediante el ensayo de mesa de flujo.

Se siguieron las especificaciones mencionadas en la norma NTP 334.057.

La mezcla de mortero se vertió hasta la mitad del cono truncado y se compactó 20 veces con el pistón, luego se rellenó el resto y se volvió a compactar 20 veces, se enrazó el cono y se retiraron los excesos. Después, se retiró el cono lentamente, dejando que la mezcla se deslice, acto seguido se procedió a dar 25 golpes. Finalmente se midieron cuatro diámetros (en mm), se calculó el promedio y se reemplazaron datos en la siguiente ecuación:

$$\text{Porcentaje de fluidez} = \frac{\text{diámetro promedio} - 101.6}{101.6} * 100 \dots\dots\dots \text{Ec. 4}$$

Figura 10

Pasos del ensayo de flujo (a) compactado, (b) enrasado (c) retiro del cono truncado y (d) medición del diámetro.



(a)

(b)

(c)

(d)

2.4 Propiedades en estado endurecido

2.4.1 Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión se midió siguiendo el procedimiento sugerido por la NTP 334.051: Método de ensayo para determinar la resistencia a la compresión de morteros de cemento Portland usando especímenes cúbicos de 50 mm de lado.

En primero lugar, se inició el ensayo preparando la máquina, luego se colocó entre las dos caras de la muestra expuestas a la carga dos láminas de triplay (25cmx15cm) simulando un capeo.

Después, se verificó que el indicador de carga este en cero y se aplicó la carga de forma continua, hasta que la muestra fallara y se registró la resistencia más alta.

Figura 11

Ensayo de resistencia a la compresión en muestras cúbicas de 5 cm de lado.



2.4.2 Resistencia a la tracción indirecta por compresión diametral

La resistencia a la tracción indirecta por compresión diametral se midió siguiendo el procedimiento sugerido por la NTP 339.084: Concreto. Método de ensayo para la determinación de la resistencia a la tracción simple del concreto, por compresión diametral de una probeta cilíndrica.

En primer lugar, se dibujó una línea diametral a lo largo del espécimen para definir el plano axial, se colocó una tira de rodamiento auxiliar de triplay dentro del soporte tanto en la parte superior como en la inferior. Luego se sometió al espécimen a una carga constante, hasta llegar a su falla, registrando así su máximo valor de resistencia a la tracción indirecta.

Figura 12

Ensayo de resistencia a la tracción en muestras cilíndricas de 5 cm de diámetro y 10 cm de longitud.



Capítulo 3

Resultados y discusión

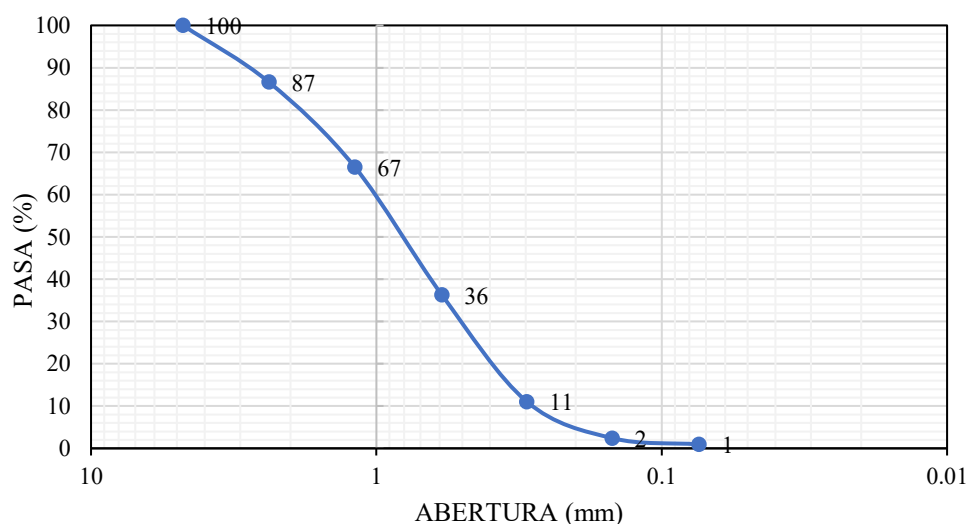
3.1 Caracterización de los materiales

La caracterización de los materiales se centró en los agregados, tanto la valva triturada, que es el objeto de estudio, como en la arena natural, que es el elemento de comparación.

En la Figura 13 y en el Apéndice A.1 se muestra la granulometría empleada tanto para el agregado natural como para la valva de concha de abanico. Como se explicó en el plan experimental, la valva se separó por tamaños y se construyó la granulometría seleccionando la cantidad de valva en cada uno de los rangos de tamaño para que el agregado final corresponda con la granulometría de la arena. La granulometría global tiene un tamaño máximo de 4.75 mm y un módulo de finura de 3, es decir, es un agregado de finura media.

Figura 13

Curva granulométrica de los agregados de valva y arena natural.



En la Tabla 8 se resumen los resultados de la gravedad específica, la absorción al agua y la angularidad de las partículas de la valva y los agregados naturales

Tabla 8

Resultados de la caracterización de la valva triturada y la arena natural como agregados.

Parámetros físicos	Valva triturada	Arena natural
G. E	2.30	2.16
Absorción (%)	1.17	1.63
Angularidad (%)	57	41

Se puede observar que la G.E de la valva es de 2.30, el cual resulta mayor que el de la arena con 2.16. Esto quiere decir que la valva ocupará menor volumen en una mezcla que la arena natural. Esto se produce posiblemente, debido a la textura de las partículas, ya que, la valva es lisa y permitirá que el agua se introduzca más fácil entre las partículas en contraste con

la arena, la cual es más rugosa y tendrá una mayor cantidad de vacíos impermeables. Con este resultado, se puede esperar que la fluidez de las mezclas con la valva sea menor que la del agregado natural.

En cuanto a la absorción se observa que la valva tiene un 1.17% y la arena 1.63%, que es ligeramente mayor que la valva. Se puede interpretar que, la valva es menos absorbente que la arena.

Finalmente, respecto a la angularidad, se midieron valores de 41% y 57%, para la arena y valva, respectivamente. En la Figura 14 se muestra la forma de las partículas de ambos materiales. Se puede observar la forma casi acicular de las partículas de valva que difieren mucho respecto a las del agregado natural, el cual tiene partículas de forma más uniforme y volumétricas. Esto explica los valores de angularidad obtenidos y corresponde con los valores obtenidos en investigaciones previas para tamaños similares a los usados en la presente investigación. (Chávez, 2019; Santamaría, 2020; Ruiz et al., 2018)

Figura 14

Vista de los agregados evaluados (a) agregados naturales y (b) valva triturada



(a)

(b)

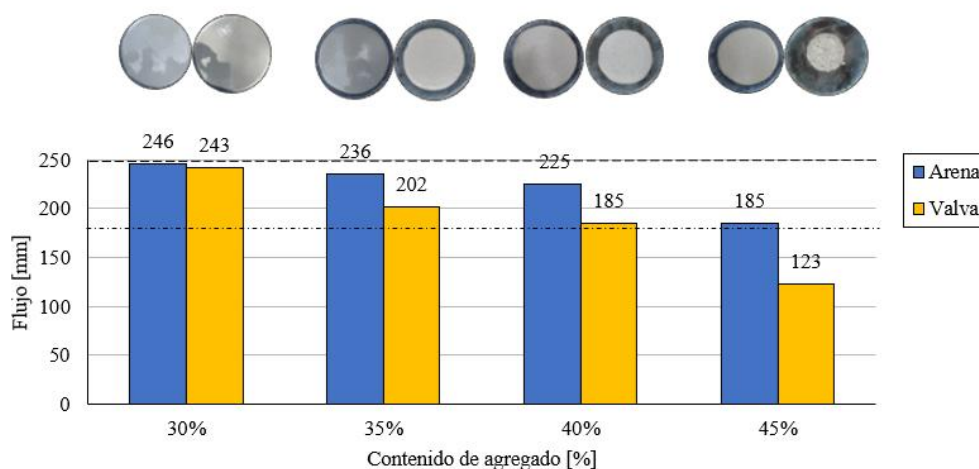
3.2 Propiedades de la mezcla en estado fresco

3.2.1 Trabajabilidad y/o fluidez

Mediante el ensayo de mesa de flujo se evaluó la fluidez de los morteros agregados de valva y de arena. En la Figura 15, se puede observar los diámetros obtenidos durante el ensayo de flujo para distintos porcentajes de arena y valva en la mezcla.

Figura 15

Resultados del diámetro medido para diferentes contenidos de agregado y valva en el mortero geopolimérico.



Los resultados indican que el mortero con agregado de arena presenta una mayor fluidez en comparación con el de valva y esta tendencia se mantiene al aumentar el porcentaje de agregados en la mezcla. Sin embargo, se notó una diferencia significativa en el comportamiento de la valva, pues a diferencia de la arena, para un contenido del 40% la mezcla adopta una consistencia semisólida estableciéndose como este valor (40%) el límite de adición para la valva. En el caso de la arena, este límite está en el 45%. En un mortero convencional, la cantidad de arena que suele admitirse está por el orden del 80 %.

Este comportamiento se puede explicar, en primer lugar, por la forma de las partículas de valva, pero también por la consistencia viscosa del geopolímero. Las partículas de valva tienen una mayor angularidad que la arena haciendo que se dificulte la movilidad y acomodo en estado fresco. Además, si bien la valva presenta una superficie más lisa, lo cual aportaría a una buena trabajabilidad, la forma angulosa de sus partículas más pequeñas tiene un impacto mayor. El geopolímero, por su parte, tiene una consistencia más viscosa, lo que limita un poco más la cantidad de agregado que un mortero de cemento Portland convencional.

3.3 Propiedades en estado endurecido

3.3.1 Cambios de volumen

Un aspecto relevante que se debe evaluar en el geopolímero es el cambio de volumen durante el proceso de endurecimiento. Si bien su estudio no es un objetivo de la presente investigación, sí se plantea como un aspecto importante del efecto de los agregados en la mezcla. Se sabe que agregados ayudan a controlar los cambios de volumen en los aglomerantes y la valva no debiera ser la excepción.

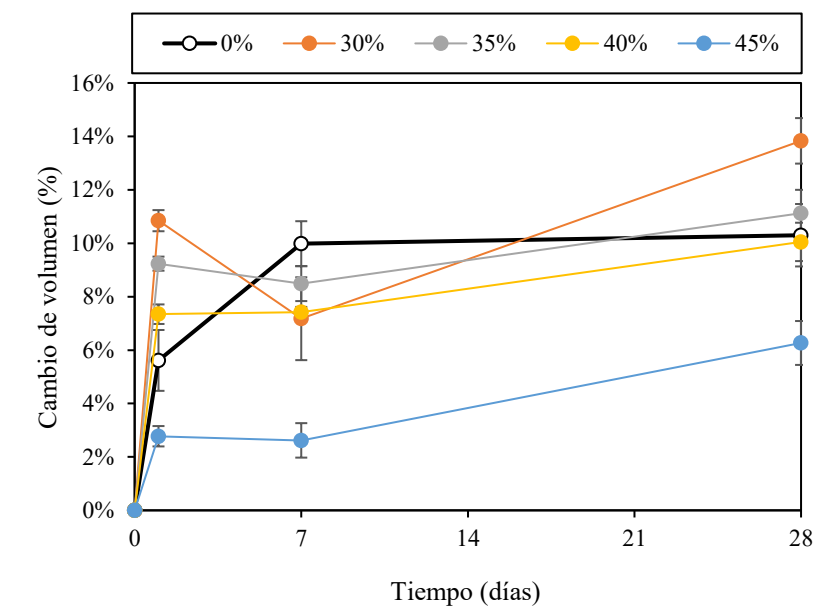
Si se observa la Figura 16 se han graficado los valores de cambio de volumen de los especímenes, expresado como un porcentaje del volumen inicial en el molde, a lo largo de los primeros 28 días, para 2 regímenes de curado, al ambiente CPT25 y en el horno CPT50. En ambos se aplicó un proceso de pre-curado al ambiente y sin protección durante las primeras 24

horas. Las mediciones se han hecho tanto para la pasta de geopolímero, sin valva (0%), como para las mezclas con 30% y 45% de valva.

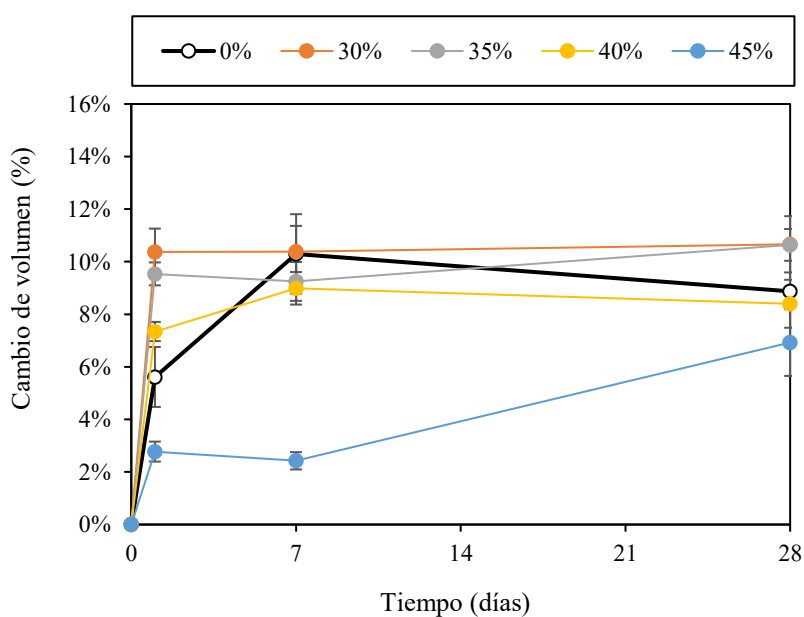
Si se observa la Figura 16a, para muestras con régimen CPT25 se obtuvieron mayores valores de cambios de volumen a los 28 días, sin embargo, esta diferencia reduce cuando se aplica el régimen de curado CPT50 (V. Figura 16b). Asimismo, se puede afirmar que hay mayores cambios de volumen en los especímenes con valva de concha de abanico como agregado.

Figura 16

Evolución del cambio de volumen en el tiempo para el geopolímero como pasta (0%) y con valva como agregado en una proporción de 30%, 35%, 40% y 45% a regímenes de curado (a) CPT25 y (b) CPT50.



(a)



(b)

Para el régimen de curado CPT25 (Figura 16a), se pudo observar que, la mayor expansión se dio con 30% de valva y la menor fue con 45%, confirmando que, a menor cantidad de valva, mayor sería su expansión. Además, se observó que a la edad de 28 días se registraron las mayores variaciones. Es importante mencionar que, en las muestras con valva como agregado se observa una tendencia de disminución de cambio de volumen a los 7 días, mientras que en las muestras con 0% de valva se observa un aumento progresivo de volumen.

De la misma forma se vieron afectados los resultados para el régimen de curado CPT50 ya que, a mayor cantidad de valva se observó una menor expansión en las muestras. Se observó una mayor expansión en las muestras con 30% de valva y una menor expansión con 45%.

Adicionalmente, se observó que para el régimen CPT50, en comparación con el régimen CPT25, las variaciones fueron menores, posiblemente por la aplicación de temperatura, que acelera las reacciones, logrando que con un periodo de tiempo menor las partículas no puedan reacomodarse en su totalidad y se forme una estructura más estable antes de tiempo sin posibilidad de modificaciones de volumen, aunque tampoco de resistencia. En consecuencia, se requerirá de menos espacio y por lo tanto la expansión será pequeña. Cabe mencionar que, pese a que con 25 °C se obtuvieron mayores variaciones, la diferencia entre ambos regímenes de curado no es grande, gracias a que las muestras se mantuvieron en bolsas plásticas selladas, lo que permitió que la mezcla conservara su humedad durante la aplicación de temperatura y la reacción de los componentes se llevara a cabo de una manera gradual.

En general, se pudo observar que, a mayor cantidad de porcentaje de valva de concha de abanico empleada, menor será el cambio de volumen en los especímenes, demostrando que la valva podría ayudar a controlar los cambios de volumen que tiene este geopolímero de FCC tanto como lo haría una arena natural.

Estos resultados contrastan lo obtenido por Hasnaoui et al. (2022), quien encontró que el incremento de agregado conchas de vieira (SW) en una mezcla de geopolímero conduce a un aumento de la contracción autógena en morteros geopoliméricos a base de metacaolín (MK).

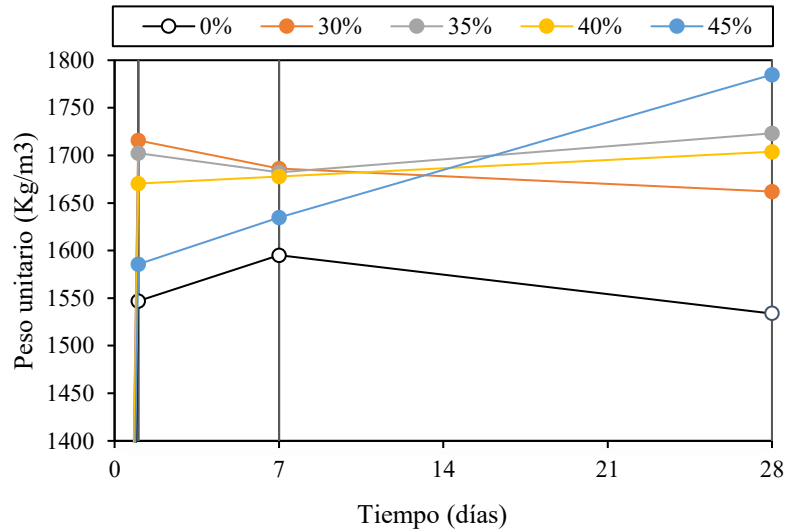
3.3.2 *Peso unitario*

Se midió el peso unitario final de los morteros sometidos a los dos regímenes de curado (CPT25 y CPT50) para diversas cantidades de valva incorporado a la mezcla del geopolímero (0%, 30%, 35%, 40% y 45%) a las edades de 1, 7 y 28 días.

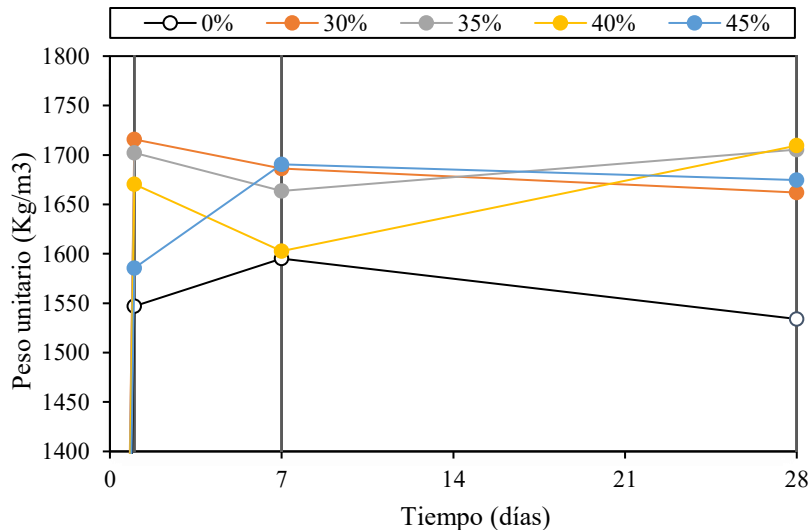
Se puede observar que el régimen de curado no influye en los resultados del peso unitario para todos los contenidos de valva. Sin embargo, se puede verificar que la presencia de valva incrementa ligeramente el peso unitario del material.

Figura 17

Evolución del peso unitario en el tiempo para el geopolímero como pasta (0%) y con valva como agregado en una proporción de 30%, 35%, 40% y 45% en muestras con regímenes de curado CPT25.

**Figura 18**

Evolución del peso unitario en el tiempo para el geopolímero como pasta (0%) y con valva como agregado en una proporción de 30%, 35%, 40% y 45% en muestras con regímenes de curado CPT50.



En la Figura 17 y Figura 18 se puede observar que el peso unitario para muestras con régimen de curado CPT25 y las de régimen CPT50 varían entre 1500 y 1800 Kg/m³ con una tendencia a ser menor al aplicar un curado con temperatura en el horno. Además, dado que la valva tiene una G.E mayor en comparación el geopolímero, la incorporación de valva, al igual

que un agregado natural convencional, produce un incremento en el peso unitario final del mortero.

En general, se pudo determinar que, a mayor porcentaje de valva de concha de abanico, se incrementa el peso unitario a los 28 días. Esto coincide con otros estudios (Hasnaoui et al., 2022) donde la incorporación de agregado de conchas de vieira (SW) aumentó igualmente el peso unitario de morteros geopoliméricos a base de metacaolín (MK).

3.3.3 Resistencia a la compresión simple

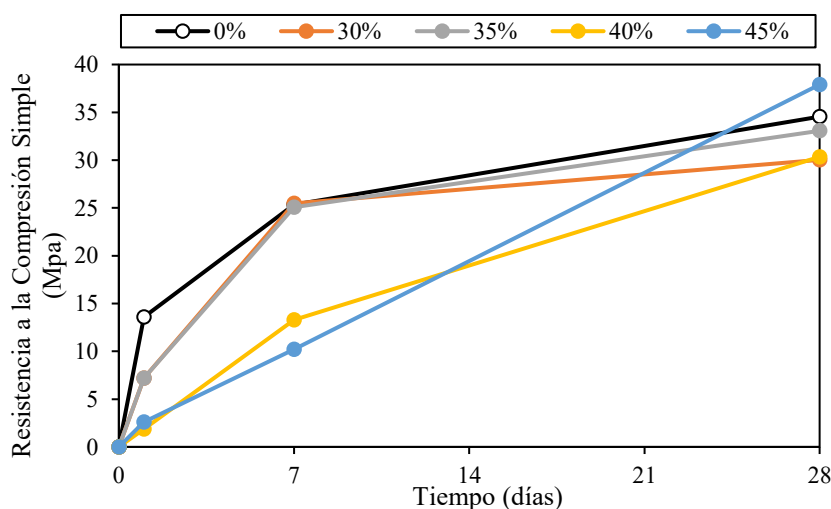
Los resultados de los ensayos a compresión simple se muestran en los Apéndices A.2 y B.1.

En la Figura 19 se muestra la evolución de la resistencia a la compresión en el tiempo al variar las dosificaciones de valva (0%, 30%, 35%, 40% y 45%) para 2 regímenes de curado, CPT25 y CPT50. Se puede observar que, independientemente del régimen de curado, se desarrolla un incremento progresivo de la resistencia, llegando a un valor máximo estable a los 28 días para el régimen de 50°C, mientras que, para el régimen de 25°C, se observó una tendencia a seguir incrementando.

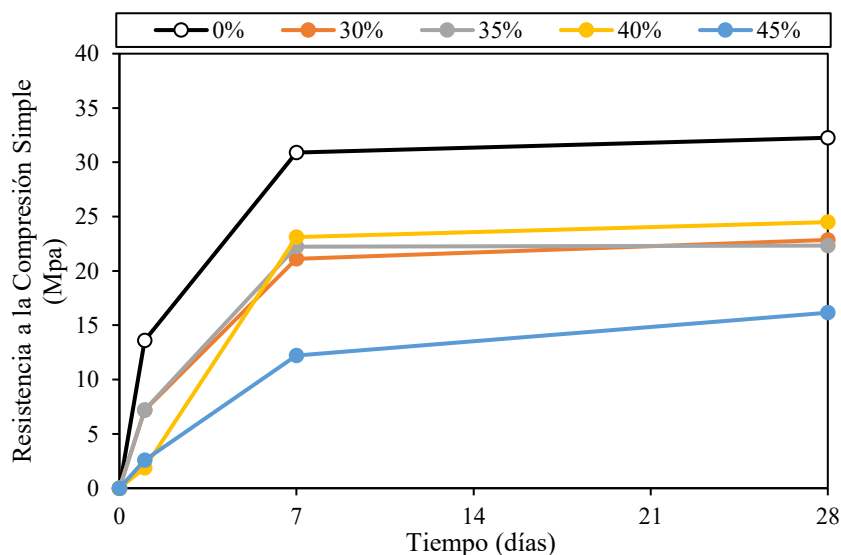
Sin embargo, cuando el curado se hace a temperatura ambiente, el valor final a los 28 días es muy similar para todos los porcentajes de reemplazo, encontrándose en el rango de 30 a 37 MPa. Sin embargo, cuando se cura a 50°C la máxima resistencia alcanza los 32 MPa, pero la adición de valva (y, por ende, disminución de pasta) reduce este valor al orden de 22 a 24 MPa, disminuyendo valores de 16 MPa si se usa 45% de valva.

Figura 19

Evolución en el tiempo de la resistencia a la compresión simple para el geopolímero como pasta (0%) y con valva como agregado en una proporción de 30%, 35%, 40% y 45% para los regímenes de curado (a) CPT25 y (b) CPT50.



(a)



(b)

Además, se puede observar que, para el régimen de curado a temperatura ambiente, la presencia de valva evoluciona de manera más lenta a medida que la cantidad de valva en la mezcla excede el 40%.

Finalmente, se puede afirmar que los mejores resultados de resistencia a la compresión simple se dan con el 35% y 40% de valva en la mezcla, para los regímenes a 25°C y 50°C, respectivamente.

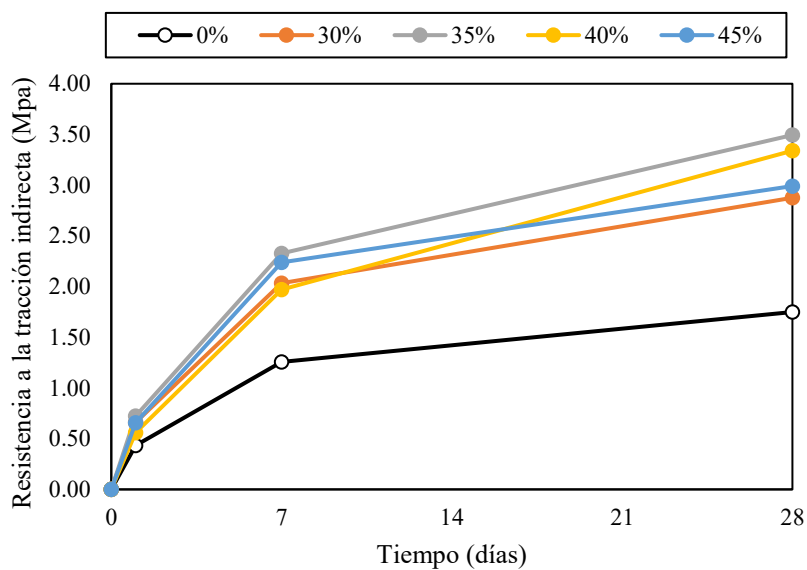
3.3.4 Resistencia a la tracción indirecta por compresión diametral

Para los ensayos a tracción indirecta (por compresión diametral), se utilizaron muestras cilíndricas para diversos contenidos de valva (0%, 30%, 35%, 40% y 45%) para dos regímenes de curado diferentes de 25°C y 50°C. Los resultados de dichos ensayos se presentan en los Apéndices A.3 y B.2.

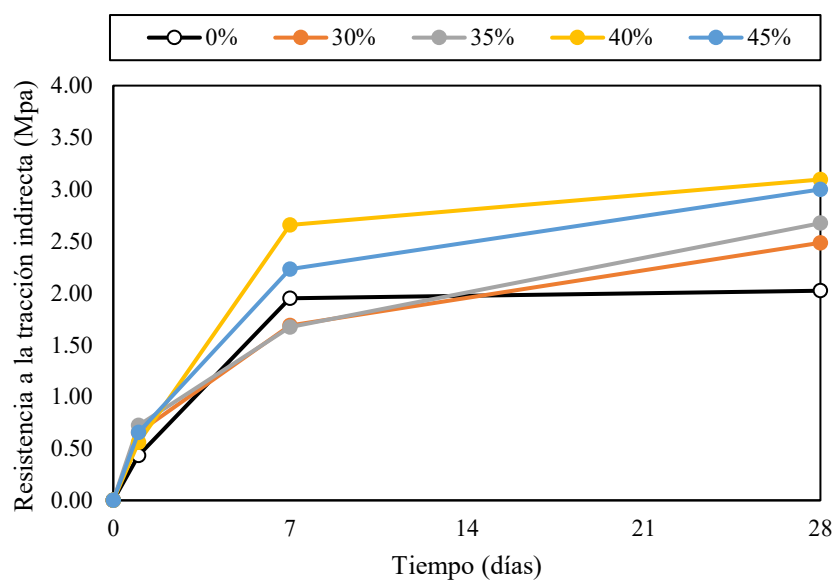
De la Figura 20, se puede observar que la resistencia a la tracción indirecta se incrementa con la presencia de valva y es mayor este efecto a temperatura ambiente y para edades de 28 días. En edades tempranas, si bien incrementa con la presencia de valva no se observa una relación clara con el porcentaje de valva, lo que sí se verifica a la edad de 28 días, donde se puede identificar un contenido óptimo de 35% de valva para el cual, la resistencia a la tracción es máxima.

Figura 20

Evolución en el tiempo de la resistencia a la tracción indirecta para el geopolímero como pasta y con valva como agregado en una proporción de 30%, 35%, 40% y 45% a regímenes de curado (a) CPT25 y (b) CPT50.



(a)



(b)

Finalmente, se puede visualizar un cierto valor óptimo del 35% para 25°C y del 40% para 50°C.

3.4 Comparativa entre valva y arena, como agregados, en pasta geopolimérica

De acuerdo con los resultados obtenidos, los mejores resultados en las propiedades de resistencia a la compresión directa y de resistencia a la compresión diametral para un geopolímero de FCC fueron obtenidos con un curado a una temperatura de 25°C y con una cantidad de valva entre 40 y 45%. Este resultado se muestra muy alentador puesto que el régimen de curado a temperatura ambiente ofrece mayores posibilidades de implementación en aplicaciones de la industria de la construcción. Sin embargo, se podría suponer que esto se puede lograr también con la arena natural. A partir de ello, se estableció una comparación más detallada con el fin de visualizar el comportamiento de la valva con el que se han obtenido estos resultados.

En la Figura 21, se ha graficado los resultados para un 45% y un 65% de contenido de agregado en la pasta de geopolímero, tanto para la arena natural como para la valva. Se puede observar que con la arena como agregado la resistencia a la compresión no disminuye en ninguno de los dos contenidos evaluados, a pesar de que son relativamente elevados. Sin embargo, al incorporar valva en contenidos del 65% se observa una severa disminución de la resistencia a cualquier edad. Aunque no se ha medido la trabajabilidad para este contenido de valva, se verificó una gran dificultad para moldear la muestra, de modo que, en concordancia con la tendencia en la trabajabilidad asociada al contenido de valva (sección 3.2.1), se puede inferir que la menor presencia de pasta y la dificultad en el moldeo han contribuido a la reducción de la resistencia observada.

Figura 21

Evolución de la resistencia a la compresión simple en el tiempo para el geopolímero curado a 25°C como pasta y con valva y arena como agregados en una proporción de 45% y 65%.

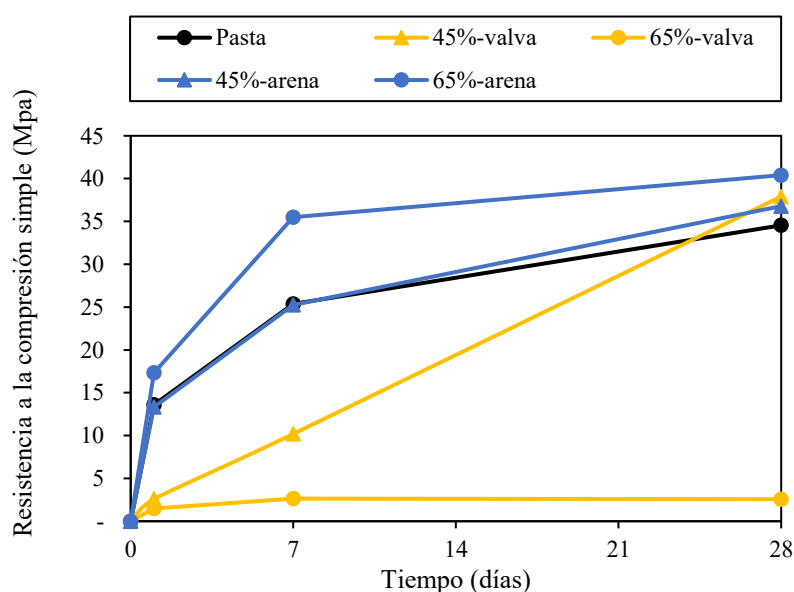
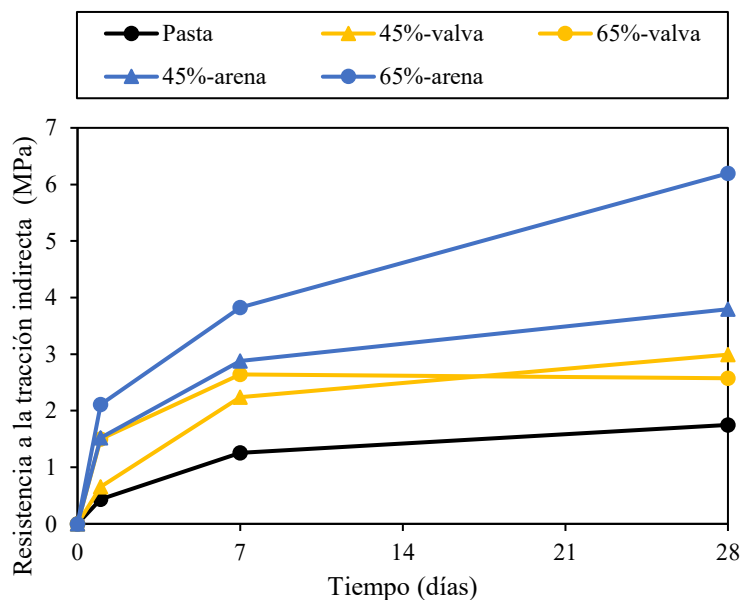


Figura 22

Evolución de la resistencia a la tracción indirecta por compresión diametral en el tiempo para el geopolímero curado a 25°C como pasta y con valva y arena como agregados en una proporción de 45% y 65%.



En el caso de la resistencia a la tracción indirecta (V. Figura 22), se puede observar la misma tendencia en el caso del agregado natural, ya que la incorporación de arena produce valores de resistencia a la tracción indirecta mayores al valor de la pasta sola. En el caso de la presencia de valva, hay también una mejora en la resistencia a la tracción indirecta respecto a la pasta sin agregados, aunque el efecto es mucho menor que con la arena natural.

El valor máximo de resistencia a la tracción indirecta a los 28 días con un 45% de arena fue de aproximadamente 3.8MPa, mientras que, con el mismo contenido de valva, la resistencia fue de aproximadamente 3MPa.

Estos resultados ponen en evidencia un efecto aparentemente negativo de la valva al ser introducida en la matriz de geopolímero. Al parecer, a pesar de la angulosidad de la valva, no hay una contribución significativa a la resistencia mecánica, que podría ser atribuida a su mayor fragilidad y dureza, comparada con el agregado natural, aunque no han sido medidas en este estudio. Otro factor que podría explicar este resultado es la adherencia entre la pasta geopolimérica y las partículas de valva. Se sabe que la valva, al ser carbonato de calcio, tiene un pH alcalino, lo que podría limitar la adherencia con la pasta de geopolímero, que también es alcalina. En ambos casos, se requerirá mayor investigación para verificar las causas de esta disminución en la resistencia a la tracción indirecta, evaluando de modo más analítico la interacción valva-geopolímero.

Finalmente, a pesar de los resultados, se puede concluir que sí es posible usar la valva como agregado en el geopolímero de FCC, aunque en contenidos no mayores al 35% para

garantizar un nivel de fluidez suficiente para su colocación y para limitar su efecto en las propiedades mecánicas del material.



Conclusiones

- La incorporación de la valva a una pasta geopolimérica, disminuye la trabajabilidad aproximadamente en un 20%, debido a la forma de sus partículas requiriendo una mayor área superficial que cubrir y una mayor cantidad de pasta. Este efecto se hace mayor cuando la cantidad de valva es del 45%.
- En cuanto al cambio de volumen, se pudo determinar que la presencia de la valva y con ello la disminución de pasta geopolimérica ayuda a controlar la expansión del geopolímero, siendo mayor el efecto cuando la cantidad de valva alcanza el 40% o más.
- En cuanto al peso unitario, se observó que se incrementa en apenas un 8% cuando se añade valva, por lo que se puede considerar que este cambio no es significativo.
- El efecto de la valva en las propiedades mecánicas depende mucho del régimen de curado. A temperatura ambiente (25°C) la presencia de valva aporta positivamente a la resistencia a la compresión respecto del tiempo, incrementándola en un 9% mientras que, a 50°C, la disminuye hasta un 50%. Por otro lado, con la resistencia a la tracción, se ven incrementos de hasta un 48% para el curado a temperatura ambiente y hasta un 35% para el curado a 50°C.
- Se verifica que sí es posible el empleo de la valva de concha de abanico como agregado en el geopolímero de FCC hasta un 35% del peso de la mezcla con un régimen de curado a temperatura ambiente. Esto representa una gran ventaja en cuanto a sustentabilidad porque reduce el impacto ambiental del residuo de las valvas de concha de abanico al ser un posible uso como agregados en la fabricación de concretos de geopolímero reduciendo así, el consumo de recursos no renovables. Además, reduce la necesidad de temperaturas en el proceso de curado al tener mejores resultados cuando el curado es a temperatura ambiente.

Recomendaciones

- Para poder determinar si es que el contenido de valva tiene una reacción álcali agregado y observar la adherencia agregado-pasta, se recomienda para futuros estudios realizar ensayos de XRD, SEM y ensayos de potencial de AC.



Referencias

- Almutairi et al. (2021). Potential applications of geopolymers in construction: A case study. *Case Studies in Construction Materials* 15, e00733.
- ASTM C29/C29M-17a. (2023, Octubre 6). *Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate*.
- Bedda et al. (2022). Experimental investigation and micromechanical modeling of mechanical and durability properties of concrete based on shells from sediments. *Cement and Concrete Composites* 133, 104684.
- Carhuamaca, R. (2022). *Estado del arte en la formulación, propiedades y microestructura del mortero de geopolímeros - Piura [Tesis de grado, Universidad de Piura]*. Repositorio Institucional. Retrieved from <https://hdl.handle.net/11042/5784>
- Carrillo, S. (2017). *Variabilidad de reciclaje de la concha en la industria de la construcción*. Piura, Perú.
- Chávez, F. (2019). *Valoración de residuo de concha de abanico para uso como agregado en mezclas asfálticas en caliente - Piura [Tesis de grado, Universidad de Piura]*. Repositorio institucional. Retrieved from <https://hdl.handle.net/11042/4268>
- Chen et al. (2019). Evaluation of the eco-friendly crushed waste oyster shell mortars containing supplementary cementitious materials. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 237, 117811.
- Chindaprasirt et al. (2007). Workability and strength of coarse high calcium fly ash geopolymer. *Cement & Concrete Composites* 29, 224-229.
- Davidovits, J. (1991). Geopolymers. Inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis*, Vol. 37, 1633-1656.
- Görhan, G., & Kürklü, G. (2014). The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures. *Composites: Part B*, Vol. 58, 371-377.
- Hasnaoui et al. (2021). A preliminary investigation of a novel mortar based on alkali-activated seashell waste powder. *Powder Technology* 389, 471-481.
- Hasnaoui et al. (2022). Valorization of queen scallop shells in the preparation of metakaolin-based geopolymer mortars. *Journal of Building Engineering* 53, 104578.
- INDECOPI. (2012). *NTP 339.084: Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la tracción simple del concreto, por compresión diametral de una probeta cilíndrica*. Lima.
- INDECOPI. (2013). *NTP 400.022: Método de ensayo normalizado para peso específico y absorción del agregado fino*. Lima.
- INDECOPI. (2019). *NTP 334.057: Método de ensayo para determinar la fluidez de morteros de cemento Portland*. Lima.
- INDECOPI. (2020). *NTP 400.011: Definición y clasificación de agregados para uso en morteros y hormigones (Concretos)*. Lima.

- INDECOPI. (2021). *NTP 400.012: Análisis granulométrico del agregado fino, grueso y global*. Lima.
- INDECOPI. (2021). *NTP 400.037: Agregados. Especificaciones normalizadas para agregados en concreto*. Lima.
- INDECOPI. (2022). *NTP 334.051: Determinación de la resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico usando especímenes cúbicos de 50 mm de lado. Método de ensayo*. Lima.
- Medina, R. (2016). Conociendo las Propiedades del Concreto (I). *Construyendo con Juan Seguro [Acero Arequipa]*.
- Mermedas et al. (2017). Effect of aggregate properties on the mechanical and absorption. *Engineering Science and Technology, an international Journal, Vol. 20, Issue 6*, 1642-1652.
- MTC. (2016). *MTC E 222-20000. Angularidad del agregado fino*. Lima.
- Muhammad et al. (2019). Optimum mix design of geopolymer pastes and concretes cured in ambient condition based on compressive strength, setting time and workability. *Journal of Building Engineering* 23, 301-313.
- Muhammad et al. (2022). Mechanical behavior of high-strength concrete incorporating seashell powder at elevated temperatures. *Journal of Building Engineering* 50, 104226.
- Ng et al. (2018). A review on microstructural study and compressive strength of geopolymer mortar, paste and concrete. *Construction and Building Materials Vol. 186*, 550-576.
- Nodehi et al. (2022). The effect of curing regimes on physico-mechanical, microstructural and durability properties of alkali-activated material: A review. *Construction and Building Materials* 321, 126335.
- Palomo et al. (2004). "Geopolímeros": una única base química y diferentes microestructuras. *Materiales de Construcción* 54 (275), 77-91.
- Reddy et al. (2010). Strength and workability of low lime fly-ash based geopolymer concrete. *Indian Journal of Science and Technology, Vol 3, No 12*, 1188-1189.
- Rivva et al. (1993). Tecnología del concreto. American Concrete Institute. *Capítulo Peruano*.
- Rodgers, L. (2018, diciembre 17). *La enorme fuente de emisiones de CO2 que está por todas partes y que quizás no conocías*. Retrieved from BBC News: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-46594783>
- RPPNoticias. (2014, agosto 15). Produce impulsa manejo sostenible de conchas de abanico en Piura. Sechura, Piura, Perú.
- RPPNoticias. (2015, agosto 28). Piura: Buscan una solución ante contaminación de botadero en Sechura. Sechura, Piura, Perú.
- Ruiz et al. (2018). Laboratory evaluation of seashells used as fine aggregate in hot mix asphalt. *International Journal of Pavement Engineering*.

- Ruiz et al. (2019). Synthesis of a Geopolymer Binders Using Spent Fluid Catalytic Cracking (FCC) Catalyst. *IOP Conf. Ser: Mater. Sci. Eng.* 660, 012009.
- Santamaría, S. (2020). *Durabilidad de las mezclas asfálticas en caliente con valvas de concha de abanico - Piura [Tesis de grado, Universidad de Piura]*. Repositorio institucional. Retrieved from <https://hdl.handle.net/11042/4493>
- Singh et al. (2015). Geopolymer concrete: A review of some recent developments. *Construction and Building Materials* 85, 78-90.
- Tashima et al. (2013). Alkali activated materials based on fluid catalytic cracking catalyst residue (FCC): Influence of SiO₂/Na₂O and H₂O/FCC ratio on mechanical strength and microstructure. *Fuel* 108, 833-839.
- Varhen et al. (2017). Experimental investigation of Peruvian scallop used as fine aggregate in concrete. *Construction and Building Materials* 136, 533-540.
- Yang et al. (2005). Effect of oyster shell substituted for fine aggregate on concrete characteristics: Part I. Fundamental properties. *Cement and Concrete Research* 35, 2175-2182.



Apéndices



Apéndice 1: Granulometría de agregados y resultados de ensayos de compresión simple y tracción indirecta por compresión diametral.

Tabla 9

Datos de la granulometría del agregado (valva triturada y/o arena natural)

ABERTURA (mm)	TAMIZ ASTM	CONTENIDO gr	RETENIDO PARCIAL %	RETENIDO TOTAL %	PASA %
62.7	2 1/2"	0	0	0	100
38.1	1 1/2"	0	0	0	100
19.1	3/4"	0	0	0	100
9.5	3/8"	0	0	0	100
4.76	4	0	0	0	100
2.38	8	65.5	13	13	87
1.19	16	98.2	20	33	67
0.59	30	147.5	30	64	36
0.297	50	123.5	25	89	11
0.149	100	42.2	9	98	2
0.074	200	7.2	1	99	1
	FONDO	4.2	1		
	TOTAL	488.3			
	PESO INICIAL	488.7			
	PÉRDIDA	0.4			

Tabla 10

Resultados de las muestras para el ensayo de compresión simple.

Tanda	Molde	Especimen	Cobertura 1	Temperatura	Cobertura 2	T°/HR	Peso I (gr)	Resultados								H pie de rey (cm)	Molde (cm)	Variación (cm)	T°/HR (en ensayo)			
								Edad (d)	Peso2 (gr)	b (cm)	l (cm)	h (cm)	Densidad (Kg/m ³)	F (Kgf)	F (KN)					R (Mpa)	R prom (Mpa)	Desv.
Régimen / 0% de reemplazo																						
1	1	a	UT	25	x	30.8/46%	202	1	223.70	5.040	5.060	5.547	1581.35	3604.00	35.34	13.86	13.59	0.4	5.55	5.4	0.15	31.8/42%
1	1	c	CPT	25	C	30.8/46%	202	7	227.80	5.016	5.122	5.642	1571.53	8303.00	81.42	31.69			5.64	5.2	0.44	33.7/40%
1	2	a	UT	25	x	30.8/46%	202	1	230.30	5.090	5.200	5.552	1567.20	3722.00	36.50	13.79			5.55	5.4	0.15	32.1/42%
1	3	a	UT	25	x	33.3/36%	202	1	243.00	5.210	5.230	5.665	1574.23	3647.00	35.76	13.12	25.35	7.16	5.67	5.4	0.27	32.1/41%
1	2	c	CPT	25	C	30.8/46%	202	7	231.00	5.105	5.130	5.630	1566.72	7148.00	70.10	26.77			5.63	5.2	0.43	33.3/40%
1	3	c	CPT	25	C	33.3/36%	202	7	246.60	5.218	5.238	5.704	1581.77	4903.00	48.08	17.59			5.70	5.2	0.50	33.3/40%
9	1	a	CPT	50	C	30.2/44%	251	7	224.00	5.082	5.119	5.599	1537.86	7507.00	73.62	28.30	30.90	2.27	5.60	5.2	0.40	33.7/47%
9	2	a	CPT	50	C	30.2/44%	251	7	228.50	5.068	5.177	5.596	1556.30	8547.00	83.82	31.95			5.96	5.2	0.76	33.1/50%
9	3	a	CPT	50	C	30.2/44%	251	7	227.30	5.114	5.166	5.663	1519.28	8742.00	85.73	32.45			5.66	5.2	0.46	32.4/51%
Régimen / 30% de reemplazo																						
1	CB	a	UT	25	x	29,9/61%	241	1	238.90	5.009	5.055	5.543	1702.15	1894.00	18.57	7.34	7.18	0.18	5.54	5	0.54	29,6/62%
1	CB	b	CPT	25	C	29,9/61%	241	7	237.60	5.007	5.073	5.536	1689.69	6688.00	65.59	25.82			5.54	5	0.54	29,9/59%
1	CB	a'	UT	25	x	29,9/61%	241	1	238.50	5.002	5.029	5.584	1697.92	1793.00	17.58	6.99			5.58	5	0.58	29,6/62%
1	CB	a''	UT	25	x	29,9/61%	278	1	274.80	5.185	5.197	5.889	1731.70	1985.00	19.47	7.22	25.48	0.88	5.89	5.4	0.49	29,6/62%
1	CB	b'	CPT	25	C	29,9/61%	278	7	274.70	5.184	5.250	5.892	1713.06	6792.00	66.61	24.47			5.89	5	0.89	29,6/59%
1	CB	b''	CPT	25	C	29,9/61%	278	7	272.50	5.221	5.232	5.890	1693.67	7279.00	71.38	26.13			5.89	5	0.89	29,6/59%
5	CB	a	CPT	50	C	29,9/55%	277	7	273.60	5.214	5.250	5.989	1668.90	5984.00	58.68	21.44	21.12	0.36	5.99	5.4	0.59	29,3/62%
5	CB	a'	CPT	50	C	29,9/55%	277	7	267.10	5.193	5.258	5.808	1684.26	5770.00	56.58	20.72			5.81	5.4	0.41	29,3/62%
5	CB	a''	CPT	50	C	29,9/55%	277	7	271.80	5.250	5.250	5.977	1649.86	5960.00	58.45	21.21			5.98	5.4	0.58	29,3/62%
Régimen / 35% de reemplazo																						
2	CB	a	UT	25	x	30,0/61%	261	1	256.70	5.088	5.110	5.685	1736.71	1928.00	18.91	7.27	7.20	0.40	5.69	5.2	0.48	29,6/61%
2	CB	b	CPT	25	C	30,0/61%	261	7	259.60	5.126	5.207	5.661	1718.09	5995.00	58.79	22.03			5.66	5.2	0.46	29,6/59%
2	CB	a'	UT	25	x	30,0/61%	261	1	250.90	5.061	5.078	5.652	1727.31	1980.00	19.42	7.56			5.65	5.2	0.45	29,6/61%
2	CB	a''	UT	25	x	30,0/61%	261	1	258.50	5.079	5.128	5.688	1744.92	1798.00	17.63	6.77	25.09	2.74	5.69	5.2	0.49	29,6/61%
2	CB	b'	CPT	25	C	30,0/61%	261	7	256.30	5.049	5.127	5.650	1752.39	7206.00	70.67	27.30			5.65	5.2	0.45	29,6/59%
2	CB	b''	CPT	25	C	30,0/61%	261	7	254.50	5.072	5.132	5.580	1752.22	6888.00	67.55	25.95			5.58	5.2	0.38	29,6/59%
5	CB	b	CPT	50	C	30,2/55%	279	7	267.50	5.169	5.236	5.805	1702.61	5887.00	57.73	21.33	22.23	1.13	5.81	5.4	0.40	29,3/62%
5	CB	b'	CPT	50	C	30,2/55%	279	7	271.30	5.174	5.277	5.860	1695.66	6087.00	59.69	21.86			5.86	5.4	0.46	29,3/62%
5	CB	b''	CPT	50	C	30,2/55%	279	7	274.50	5.216	5.233	5.954	1689.06	6539.00	64.13	23.49			5.95	5.4	0.55	29,3/62%

Régimen / 40% de reemplazo																						
3	CB	a	UT	25	x	26,8/67%	234	1	231.90	5.023	5.201	5.395	1645.35	510.00	5.00	1.91	1.87	0.62	5.40	5	0.40	29,1/61%
3	CB	b	CPT	25	C	26,8/67%	234	7	226.50	5.029	5.100	5.384	1640.25	3896.00	38.21	14.90			5.38	5	0.38	27,6/63%
3	CB	a'	UT	25	x	26,8/67%	234	1	235.80	5.028	5.109	5.507	1666.85	320.00	3.14	1.22			5.51	5	0.51	29,1/61%
3	CB	a''	UT	25	x	26,8/67%	237	1	236.70	5.051	5.098	5.416	1697.24	648.00	6.35	2.47	13.29	2.11	5.42	5	0.42	29,1/61%
3	CB	b'	CPT	25	C	26,8/67%	237	7	234.60	5.006	5.148	5.364	1697.11	2865.00	28.10	10.90			5.36	5	0.36	27,1/63%
3	CB	b''	CPT	25	C	26,8/67%	237	7	234.20	5.016	5.099	5.380	1702.01	3672.00	36.01	14.08			5.38	5	0.38	27,1/63%
5	CB	c	CPT	50	C	26,2/68%	253	7	266.20	5.100	5.150	5.650	1793.83	6257.00	61.36	23.36	23.12	1.69	5.65	5.4	0.25	27,6/62%
5	CB	c'	CPT	50	C	26,2/68%	253	7	270.70	5.150	5.200	5.600	1805.05	5825.00	57.12	21.33			5.60	5.4	0.20	28,2/62%
5	CB	c''	CPT	50	C	26,2/68%	253	7	266.50	5.100	5.150	5.650	1795.86	6610.00	64.82	24.68			5.65	5.4	0.25	28,8/60%
Régimen / 45% de reemplazo																						
4	CB	a	UT	25	x	27,4/64%	223	1	248.10	5.182	5.228	5.510	1662.04	645.00	6.33	2.33	2.59	0.23	5.51	5.4	0.11	29,1/60%
4	CB	b	CPT	25	C	27,4/64%	223	7	232.50	5.181	5.210	5.565	1547.77	1408.00	13.81	5.12			5.57	5.4	0.17	27,1/63%
4	CB	a'	UT	25	x	27,4/64%	223	1	244.00	5.172	5.211	5.502	1645.47	735.00	7.21	2.67			5.50	5.4	0.10	29,1/60%
4	CB	a''	UT	25	x	27,4/64%	239	1	255.00	5.178	5.242	5.568	1687.26	767.00	7.52	2.77	10.20	4.52	5.57	5.4	0.17	29,1/60%
4	CB	b'	CPT	25	C	27,4/64%	239	7	261.70	5.187	5.277	5.560	1719.59	3846.00	37.72	13.78			5.56	5.4	0.16	27,4/62%
4	CB	b''	CPT	25	C	27,4/64%	239	7	259.10	5.174	5.246	5.580	1710.72	3240.00	31.77	11.71			5.58	5.4	0.18	27,4/62%
5	CB	d	CPT	50	C	27,9/64%	222	7	214.10	4.900	5.000	5.100	1713.49	2777.00	27.23	11.12	12.20	1.67	5.10	5	0.10	28,8/60%
5	CB	d'	CPT	50	C	27,9/64%	222	7	222.20	5.000	5.000	5.100	1742.75	3601.00	35.31	14.13			5.10	5	0.10	29,1/60%
5	CB	d''	CPT	50	C	27,9/64%	222	7	217.60	5.000	5.000	5.100	1706.67	2897.00	28.41	11.36			5.10	5	0.10	29,1/59%
Régimen / 65% de reemplazo																						
11	CB	a	UT	25	x	25,5/55%	196	1	194.00	5.010	5.160	5.040	1488.96	380.00	3.73	1.44	1.99	0.73	5.04	5	0.04	26,7/56%
11	CB	a'	UT	25	x	25,5/55%	196	1	188.10	5.050	5.080	5.030	1457.69	350.00	3.43	1.34			5.03	5	0.03	26,7/56%
11	CB	a''	UT	25	x	25,5/55%	196	1	198.30	5.040	5.090	5.070	1524.64	450.00	4.41	1.72			5.07	5	0.07	26,7/56%
11	CB	b	CPT	25	C	25,5/60%	185	7	188.90	5.000	5.010	5.100	1478.61	720.00	7.06	2.82	2.15	0.72	5.11	5	0.11	26,2/52%
11	CB	b'	CPT	25	C	25,5/60%	185	7	185.00	5.090	5.100	5.050	1411.21	720.00	7.06	2.72			5.10	5	0.10	26,2/52%
11	CB	b''	CPT	25	C	25,5/60%	185	7	186.20	5.000	5.100	5.130	1423.38	620.00	6.08	2.38			5.15	5	0.15	26,2/52%

Tanda	Molde	Especimen	Cobertura 1	Temperatura	Cobertura 2	T°/HR	Peso 1 (gr)	Resultados										H pie de rey (cm)	Molde (cm)	Variación (cm)	T°/HR (en ensayo)	
								Edad (d)	Peso2 (gr)	b (cm)	l (cm)	h (cm)	Densidad (gr/cm3)	F (Kgf)	F (KN)	R (Mpa)	R prom (Mpa)					Desv.
Régimen/ 0% de reemplazo																						
1	2	c	CPT	25	C	32.4/40%	221	28	219.10	5.030	5.055	5.481	1572.15	8289.00	81.29	31.97	34.5	3.62	5.481	5	0.481	30.2/60%
1	2	c'	CPT	25	C	32.4/40%	221	28	218.10	5.003	5.080	5.510	1557.43	10027.00	98.33	38.69			5.510	5	0.510	30.2/60%
1	2	c''	CPT	25	C	32.4/40%	221	28	220.20	5.009	5.082	5.459	1584.60	8561.00	83.95	32.98			5.459	5	0.459	29.9/65%
9	1	c	CPT	50	C	30.2/44%	251	28	220.50	4.999	5.102	5.603	1542.99	8602.00	84.36	33.07	32.3	2.09	5.603	5.2	0.403	31.5/50%
9	1	c'	CPT	50	C	30.2/44%	251	28	222.30	5.030	5.210	5.571	1522.65	7985.00	78.31	29.88			5.571	5.2	0.371	31.5/50%
9	1	c''	CPT	50	C	30.2/44%	251	28	227.40	5.134	5.285	5.569	1504.92	9357.00	91.76	33.82			5.569	5.2	0.369	31.5/49%
Régimen/ 30% de reemplazo																						
6	CB	a	CPT	25	C	30,2/55%	257	28	269.60	5.219	5.221	5.843	1693.34	8361.00	81.99	29.98	30.0	0.29	5.843	5.4	0.443	27,1/61%
6	CB	b	CPT	25	C	30,2/55%	257	28	276.90	5.207	5.211	6.075	1679.84	8411.00	82.48	30.33			6.075	5.4	0.675	27,1/61%
6	CB	c	CPT	25	C	30,2/55%	257	28	276.20	5.178	5.206	5.995	1709.10	8191.00	80.33	29.76			5.995	5.4	0.595	27,1/61%
10	CB	e	CPT	50	C	31,1/52%	285	28	277.80	5.186	5.226	6.023	1701.84	6310.00	61.88	22.67	22.9	0.94	6.023	5.4	0.623	28,8/63%
10	CB	e'	CPT	50	C	31,1/52%	285	28	278.80	5.197	5.236	6.043	1695.46	6757.00	66.26	23.88			6.043	5.4	0.643	28,8/61%
10	CB	e''	CPT	50	C	31,1/52%	285	28	277.40	5.192	5.286	6.056	1669.01	6225.00	61.05	22.02			6.056	5.4	0.656	28,8/61%
Régimen/ 35% de reemplazo																						
7	CB	a	CPT	25	C	29,9/59%	264	28	285.80	5.200	5.253	5.985	1748.18	9282.00	91.03	33.34	33.1	0.72	5.985	5.4	0.585	27,1/61%
7	CB	b	CPT	25	C	29,9/59%	264	28	283.40	5.187	5.260	5.990	1734.09	9412.00	92.30	33.62			5.990	5.4	0.590	27,1/61%
7	CB	c	CPT	25	C	29,9/59%	264	28	284.30	5.189	5.250	5.972	1747.49	8995.00	88.21	32.25			5.972	5.4	0.572	27,1/61%
10	CB	f	CPT	50	C	31,1/52%	284	28	276.90	5.228	5.262	5.799	1735.74	4585.00	44.96	16.31	22.3	5.54	5.799	5.4	0.399	28,8/61%
10	CB	f'	CPT	50	C	31,1/52%	284	28	280.30	5.215	5.216	5.930	1737.71	6597.00	64.69	23.47			5.930	5.4	0.530	28,8/62%
10	CB	f''	CPT	50	C	31,1/52%	284	28	274.90	5.221	5.213	5.872	1720.07	7563.00	74.17	27.22			5.872	5.4	0.472	28,8/63%

Régimen/ 40% de reemplazo																						
8	CB	a	CPT	25	C	27,1/60%	251	28	250.00	5.035	5.184	5.539	1729.20	7993.00	78.38	29.79	30.3	3.29	5.539	5	0.539	26,2/55%
8	CB	b	CPT	25	C	27,1/60%	251	28	245.60	5.045	5.079	5.462	1754.84	8828.00	86.57	33.88			5.462	5	0.462	26,8/55%
8	CB	c	CPT	25	C	27,1/60%	251	28	247.90	5.037	5.078	5.501	1761.86	7412.00	72.69	27.37			5.501	5	0.501	26,4/55%
10	CB	g	CPT	50	C	26,2/68%	231	28	231.90	5.000	5.100	5.300	1715.87	6600.00	64.72	22.80	24.5	1.49	5.300	5	0.300	23,9/66%
10	CB	g'	CPT	50	C	26,2/68%	231	28	232.30	5.000	5.100	5.200	1751.89	7046.00	69.10	25.56			5.200	5	0.200	23,9/66%
10	CB	g''	CPT	50	C	26,2/68%	231	28	237.80	5.000	5.100	5.300	1759.53	6728.00	65.98	25.12			5.300	5	0.300	23,9/66%
Régimen/ 45% de reemplazo																						
9	CB	a	CPT	25	C	30,5/51%	255	28	253.20	5.028	5.149	5.267	1856.87	9724.00	95.36	36.81	37.9	1.64	5.267	5	0.267	26,7/55%
9	CB	b	CPT	25	C	30,5/51%	255	28	248.10	5.032	5.069	5.257	1850.23	10305.00	101.06	39.78			5.257	5	0.257	26,7/55%
9	CB	c	CPT	25	C	30,5/51%	255	28	256.90	5.039	5.093	5.402	1853.07	9978.00	97.85	37.11			5.402	5	0.402	27,1/55%
10	CB	h	CPT	50	C	27,9/64%	318	28	219.50	5.000	5.000	5.150	1704.85	4273.00	41.90	16.33	16.2	0.47	5.150	5	0.150	23,9/66%
10	CB	h'	CPT	50	C	27,9/64%	318	28	221.20	5.000	5.050	5.100	1717.72	4311.00	42.28	16.51			5.100	5	0.100	23,9/66%
10	CB	h''	CPT	50	C	27,9/64%	318	28	221.90	5.000	5.000	5.150	1723.50	4117.00	40.37	15.62			5.150	5	0.150	23,9/66%
Régimen/ 65% de reemplazo																						
11	CB	c	CPT	25	C	26,8/55%	189	28	171.60	5.020	5.070	5.100	1322.01	330.00	3.24	1.27	2.6	1.13	5.100	5	0.100	25/50%
11	CB	c'	CPT	25	C	26,8/55%	189	28	190.20	5.080	5.100	5.130	1431.06	820.00	8.04	3.14			5.130	5	0.130	25/50%
11	CB	c''	CPT	25	C	26,8/55%	189	28	185.70	5.080	5.100	5.080	1410.96	880.00	8.63	3.30			5.080	5	0.080	25/50%



Tabla 11

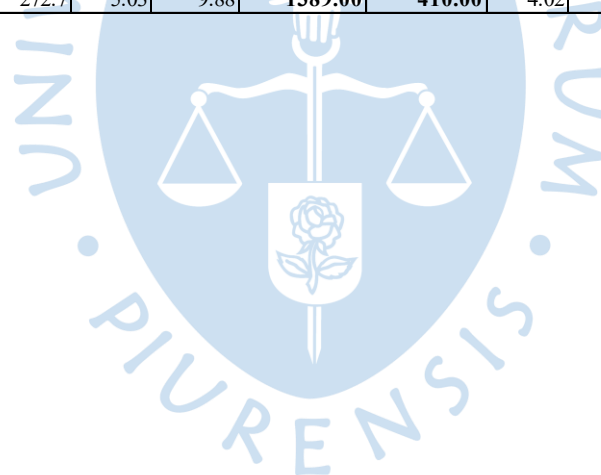
Resultados de las muestras para el ensayo de compresión diametral o tracción indirecta.

Tanda	Molde	Especimen	Cobertura 1	Temperatura	Cobertura 2	T°/HR	Peso1 (gr)	Resultados								H pie de rey (cm)	Molde (cm)	Variación (cm)	T°/HR (en ensayo)		
								Edad (d)	Peso2 (gr)	d (cm)	h (cm)	Densidad (Kg/m ³)	F (Kgf)	F (KN)	R (Mpa)					R prom (Mpa)	Desv.
Régimen / 0% de reemplazo																					
1	CL	a	UT	25	x	31.4/48%	336	1	328.5	5.06	10.64	1535.33	200.00	1.96	0.26	0.43	0.15	10.64	10	0.64	26.5/65%
1	CL	a'	UT	25	x	31.4/48%	333	1	328.8	5.04	10.82	1523.19	408.00	4.00	0.52			10.82	10	0.82	26.1/65%
1	CL	a''	UT	25	x	31.4/48%	331	1	328.2	5.08	10.78	1502.11	412.00	4.04	0.52			10.78	10	0.78	26.4/65%
1	CL	b	CPT	25	C	33.3/45%	345	7	341.6	5.08	10.24	1645.89	530.00	5.20	0.66	1.26	0.52	10.24	10	1.23	27.1/61%
1	CL	b'	CPT	25	C	33.3/45%	337	7	332.3	5.05	10.83	1531.90	1230.00	12.06	1.56			10.83	10	0.84	27.5/61%
1	CL	b''	CPT	25	C	33.3/45%	349	7	345.8	5.06	10.28	1672.79	1250.00	12.26	1.55			10.28	10	1.17	27.5/61%
2	CL	a	CPT	50	C	33.3/45%	354	7	342.3	5.11	11.44	1458.98	1710.00	16.77	2.09	1.95	0.15	11.28	10	1.49	27.4/61%
2	CL	a'	CPT	50	C	33.3/45%	335	7	327.9	5.09	10.85	1485.20	1560.00	15.30	1.97			11.39	10	0.84	27.5/61%
2	CL	a''	CPT	50	C	33.3/45%	357	7	350.3	5.02	11.31	1568.00	1460.00	14.32	1.79			10.58	10	1.33	27.5/61%
Régimen / 30% de reemplazo																					
1	CL	a	UT	25	x	30,2/49%	379	1	376.50	5.12	11.11	1648.49	512.00	5.02	0.66	0.66	0.00	11.11	10	1.11	30,8/53%
1	CL	b	CPT	25	C	30,2/49%	380	7	376.90	5.13	11.01	1659.54	1500.00	14.71	1.87			11.01	10	1.01	28,5/60%
1	CL	a'	UT	25	x	30,2/49%	380	1	377.40	5.11	11.18	1648.08	518.00	5.08	0.66			11.18	10	1.18	29,1/59%
1	CL	a''	UT	25	x	30,2/49%	367	1	363.90	5.10	10.71	1662.43	519.00	5.09	0.66	2.03	0.14	10.71	10	0.71	28,8/60%
1	CL	b'	CPT	25	C	30,2/49%	388	7	385.60	5.13	11.19	1668.63	1714.00	16.81	2.11			11.19	10	1.19	28,5/62%
1	CL	b''	CPT	25	C	30,2/49%	378	7	375.80	5.11	11.20	1638.60	1692.00	16.59	2.12			11.20	10	1.20	28,5/62%
5	CL	a	CPT	50	C	28,2/63%	365	7	359.10	5.04	10.93	1646.81	1363.00	13.37	1.75	1.69	0.27	10.93	10	0.93	27.1/61%
5	CL	a'	CPT	50	C	28,2/63%	363	7	356.93	5.10	10.75	1625.34	1299.00	12.74	1.39			10.75	10	0.75	27.1/61%
5	CL	a''	CPT	50	C	28,2/63%	382	7	374.98	5.14	11.17	1617.85	1555.00	15.25	1.92			10.17	10	0.17	27.1/61%
Régimen / 35% de reemplazo																					
2	CL	a	UT	25	x	31,1/47%	381	1	378.40	5.10	11.10	1668.83	534.00	5.24	0.67	0.72	0.05	11.10	10	1.10	28,8/60%
2	CL	b	CPT	25	C	31,1/47%	373	7	370.80	5.10	10.73	1693.29	1825.00	17.90	2.25			10.73	10	0.73	28,5/61%
2	CL	a'	UT	25	x	31,1/47%	370	1	368.30	5.09	10.85	1668.50	601.00	5.89	0.76			10.85	10	0.85	28,5/60%
2	CL	a''	UT	25	x	31,1/47%	378	1	375.60	5.13	10.92	1666.69	587.00	5.76	0.74	2.33	0.08	10.92	10	0.92	29/60%
2	CL	b'	CPT	25	C	31,1/47%	377	7	375.10	5.12	10.73	1698.93	1973.00	19.35	2.41			10.73	10	0.73	28,5/62%
2	CL	b''	CPT	25	C	31,1/47%	370	7	369.00	5.06	10.94	1680.65	1900.00	18.63	2.32			10.94	10	0.94	28,5/60%
5	CL	b	CPT	50	C	29,1/63%	369	7	363.70	5.02	11.00	1670.53	1041.00	10.21	1.31	1.67	0.31	11.00	10	1.00	26.7/61%
5	CL	b'	CPT	50	C	29,1/63%	364	7	359.72	5.04	10.84	1663.35	1465.00	14.37	1.80			10.84	10	0.84	27.4/60%
5	CL	b''	CPT	50	C	29,1/63%	359	7	353.10	5.01	10.82	1655.41	1521.00	14.92	1.89			10.82	10	0.82	27.1/61%

Régimen / 40% de reemplazo																					
3	CL	a	UT	25	x	32,4/45%	359	1	356.70	5.05	10.67	1667.75	474.00	4.65	0.59	0.56	0.08	10.67	10	0.67	29/60%
3	CL	b	CPT	25	C	30,8/49%	368	7	366.10	5.11	10.65	1676.33	1729.00	16.96	2.15			10.65	10	0.65	28,8/60%
3	CL	a'	UT	25	x	30,8/49%	362	1	360.30	5.09	10.67	1661.91	371.00	3.64	0.46			10.67	10	0.67	29/61%
3	CL	a''	UT	25	x	30,8/49%	368	1	365.20	5.08	10.71	1682.54	497.00	4.87	0.62	1.97	0.17	10.71	10	0.71	29/61%
3	CL	b'	CPT	25	C	30,8/49%	394	7	391.90	5.15	11.22	1676.64	1453.00	14.25	1.80			11.22	10	1.22	28,8/61%
3	CL	b''	CPT	25	C	30,8/49%	367	7	365.50	5.08	10.45	1725.65	1591.00	15.60	1.96			10.45	10	0.45	28,8/61%
5	CL	c	CPT	50	C	29,6/58%	377	7	371.90	5.07	10.86	1698.11	2062.00	20.22	2.55	2.66	0.11	10.86	10	0.86	28,2/65%
5	CL	c'	CPT	50	C	29,6/58%	396	7	389.60	5.15	10.96	1705.17	2271.00	22.27	2.77			10.96	10	0.96	27,9/65%
5	CL	c''	CPT	50	C	29,6/58%	384	7	379.30	5.16	10.97	1654.42	2185.00	21.43	2.65			10.97	10	0.97	27,9/64%
Régimen / 45% de reemplazo																					
4	CL	a	UT	25	x	25,3/65%	381	1	378.50	5.12	13.24	1387.30	480.00	4.71	0.59	0.66	0.11	13.24	12	1.24	26,8/64%
4	CL	b	CPT	25	C	25,3/65%	365	7	363.10	5.06	10.28	1754.04	1898.00	18.61	2.33			10.28	10	0.28	27,4/61%
4	CL	a'	UT	25	x	25,3/65%	382	1	379.90	5.13	13.29	1383.97	637.00	6.25	0.78			13.29	12	1.29	26,8/64%
4	CL	a''	UT	25	x	25,3/65%	350	1	348.10	5.07	9.85	1747.74	483.00	4.74	0.60	2.24	0.09	9.85	9.5	0.35	27,4/64%
4	CL	b'	CPT	25	C	25,3/65%	354	7	352.30	5.04	10.06	1754.83	1741.00	17.07	2.16			10.06	10	0.06	27,5/62%
4	CL	b''	CPT	25	C	25,3/65%	387	7	385.60	5.13	13.19	1412.30	1824.00	17.89	2.22			13.19	12	1.19	27,6/60%
5	CL	d	CPT	50	C	29,3/59%	369	7	364.00	5.13	10.55	1671.69	1943.00	19.05	2.41	2.23	0.16	10.55	10	0.55	28,2/65%
5	CL	d'	CPT	50	C	29,3/59%	363	7	358.90	5.07	10.30	1727.32	1734.00	17.00	2.18			10.30	10	0.30	27,9/65%
5	CL	d''	CPT	50	C	29,3/59%	364	7	360.00	5.11	10.20	1721.63	1691.00	16.58	2.11			10.20	10	0.20	27,9/65%
Régimen / 65% de reemplazo																					
3	CL	a	UT	25	x	25,2/60%	301	1	299.1	5.04	10.23	1465.51	100.00	0.98	0.13	0.15	0.03	10.23	10.2	0.03	26,7/57%
3	CL	a'	UT	25	x	25,2/60%	286	1	284.8	5.07	9.85	1432.18	150.00	1.47	0.19			9.85	9.83	0.02	26,7/57%
3	CL	a''	UT	25	x	25,2/60%	277	1	276.2	5.07	9.90	1381.92	110.00	1.08	0.14			9.90	9.86	0.04	26,7/57%
3	CL	b	CPT	25	C	25,2/60%	278	7	276.1	5.03	9.81	1416.35	400.00	3.92	0.50	0.50	0.01	9.99	9.95	0.04	25,9/57%
3	CL	b'	CPT	25	C	25,2/60%	305	7	303	5.09	10.51	1416.82	380.00	3.73	0.48			10.52	10.5	0.02	25,9/57%
3	CL	b''	CPT	25	C	25,2/60%	284	7	282.1	5.04	9.97	1418.26	410.00	4.02	0.51			9.96	9.94	0.02	25,9/57%

Tanda	Molde	Especimen	Cobertura 1	Temperatura	Cobertura 2	T°/HR	Peso I (gr)	Resultados									H pie de rey (cm)	Molde (cm)	Variación (cm)	T°/HR (en ensayo)	
								Edad (d)	Peso2 (gr)	d (cm)	h (cm)	Densidad (kg/m ³)	F (Kgf)	F (KN)	R (Mpa)	R prom (Mpa)					Desv.
Régimen / 0% de reemplazo																					
1	CL	c	UT	25	C	28.5/60%	343	28	338.7	5.08	11.28	1481.46	1610.00	15.79	1.95	1.75	0.23	11.29	10	1.29	27.5/64%
1	CL	c'	UT	25	C	33.3//45%	357	28	350.6	5.14	11.39	1483.45	1510.00	14.81	1.80			11.30	10	1.30	27.5/64%
1	CL	c''	UT	25	C	33.3//45%	329	28	324.3	5.06	10.58	1524.30	1190.00	11.67	1.50			10.69	10	0.69	27.5/64%
2	CL	b	CPT	50	C	28.5/60%	334	28	322	5.04	11.05	1460.64	1530.00	15.00	1.90	2.02	0.17	10.40	10	0.40	26.1/62%
2	CL	b'	CPT	50	C	28.5/60%	339	28	330.4	5.05	11.19	1474.14	1780.00	17.46	2.21			11.15	10	1.15	26.1/62%
2	CL	b''	CPT	50	C	28.5/60%	357	28	349	5.13	11.59	1456.86	1640.00	16.08	1.95			11.49	10	1.49	26.1/62%
Régimen/ 30% de reemplazo																					
6	CL	a	CPT	25	C	30,2/55%	396	28	393.80	5.11	11.23	8732.96	2427.00	23.80	3.01	2.88	0.32	11.23	10	1.23	27,4/55%
6	CL	b	CPT	25	C	30,2/55%	399	28	397.00	5.12	11.31	8738.05	2087.00	20.47	2.51			11.31	10	1.31	27,4/55%
6	CL	c	CPT	25	C	30,2/55%	384	28	381.50	5.06	10.97	8751.06	2510.00	24.61	3.11			10.97	10	0.97	27,6/55%
10	CL	e	CPT	50	C	30,8/54%	377	28	372.20	5.08	11.02	8469.12	2024.00	19.85	2.52	2.48	0.08	11.02	10	1.02	28,5/60%
10	CL	e'	CPT	50	C	30,8/54%	380	28	374.90	5.12	10.87	8576.82	1939.00	19.02	2.40			10.87	10	0.87	28,2/60%
10	CL	e''	CPT	50	C	30,8/54%	369	28	363.10	5.06	10.79	8473.59	2034.00	19.95	2.53			10.79	10	0.79	28,2/60%
Régimen/ 35% de reemplazo																					
7	CL	a	CPT	25	C	29,9/55%	387	28	385.30	5.10	10.88	8848.71	2775.00	27.21	3.38	3.49	0.11	10.88	10	0.88	27,9/55%
7	CL	b	CPT	25	C	29,9/55%	390	28	388.10	5.09	10.87	8932.89	2912.00	28.56	3.58			10.87	10	0.87	27,9/55%
7	CL	c	CPT	25	C	29,9/55%	418	28	416.30	5.14	11.34	9101.75	2882.00	28.26	3.52			11.34	10	1.34	27,9/55%
10	CL	f	CPT	50	C	27,1/65%	398	28	393.00	5.05	10.78	9183.50	2046.00	20.06	2.55	2.67	0.11	10.78	10	0.78	26,8/59%
10	CL	f'	CPT	50	C	27,1/65%	409	28	404.30	5.14	11.33	8843.90	2220.00	21.77	2.71			11.33	10	1.33	26,4/59%
10	CL	f''	CPT	50	C	27,1/65%	401	28	396.30	5.08	10.96	9074.16	2193.00	21.51	2.76			10.96	10	0.96	26,4/59%

Régimen/ 40% de reemplazo																					
8	CL	a	CPT	25	C	27,1/71%	387	28	385.30	5.09	10.79	8933.07	2417.00	23.70	2.98	3.34	0.32	10.79	10	0.79	27,1/59%
8	CL	b	CPT	25	C	27,1/71%	386	28	384.10	5.10	10.90	8805.07	2787.00	27.33	3.47			10.90	10	0.90	27,9/56%
8	CL	c	CPT	25	C	27,1/71%	410	28	407.60	5.11	11.47	8854.80	2837.00	27.82	3.57			11.47	10	1.47	27,9/56%
10	CL	g	CPT	50	C	27,4/65%	376	28	372.50	5.06	10.46	8971.53	2496.00	24.48	3.20	3.09	0.20	10.46	10	0.46	26,4/59%
10	CL	g'	CPT	50	C	27,4/65%	398	28	394.40	5.10	10.81	9101.65	2276.00	22.32	2.87			10.81	10	0.81	26,7/59%
10	CL	g''	CPT	50	C	27,4/65%	411	28	407.30	5.13	11.14	9076.11	2636.00	25.85	3.22			11.14	10	1.14	26,7/59%
Régimen/ 45% de reemplazo																					
9	CL	a	CPT	25	C	27,1/71%	386	28	384.40	5.03	10.86	8971.97	2589.00	25.39	3.23	2.99	0.21	10.86	10	0.86	27,1/58
9	CL	b	CPT	25	C	27,1/71%	373	28	371.10	5.02	10.43	9017.24	2248.00	22.05	2.83			10.43	10	0.43	27,1/58
9	CL	c	CPT	25	C	27,1/71%	381	28	378.60	5.02	10.68	8983.16	2318.00	22.73	2.91			10.68	10	0.68	27,1/58
10	CL	h	CPT	50	C	28,2/62%	399	28	395.30	5.14	10.79	9082.02	2375.00	23.29	2.90	3.00	0.11	10.79	10	0.79	26,7/59%
10	CL	h'	CPT	50	C	28,2/62%	391	28	387.90	5.08	10.83	8970.18	2498.00	24.50	3.11			10.83	10	0.83	26,7/59%
10	CL	h''	CPT	50	C	28,2/62%	407	28	403.40	5.19	11.15	8877.67	2434.00	23.87	2.99			11.15	10	1.15	26,7/59%
Régimen / 65% de reemplazo																					
3	CL	e	CPT	25	C	25,2/61%	310	28	312.8	5.08	10.48	1472.61	560.00	5.49	0.68	0.55	0.12	10.41	10	0.41	25,9/58%
3	CL	e'	CPT	25	C	25,2/61%	288	28	290.9	5.07	10.15	1419.62	370.00	3.63	0.44			10.14	10	0.14	25,9/58%
3	CL	e''	CPT	25	C	25,2/61%	270	28	272.7	5.03	9.88	1389.00	410.00	4.02	0.52			9.69	9.68	0.01	25,9/58%



Apéndice 2: Imágenes de los especímenes después de ser ensayados en compresión simple y tracción indirecta por compresión diametral.

Figura 23

Ensayo a Compresión simple – 0% de reemplazo de valva- Régimen CPT25 (1 día)

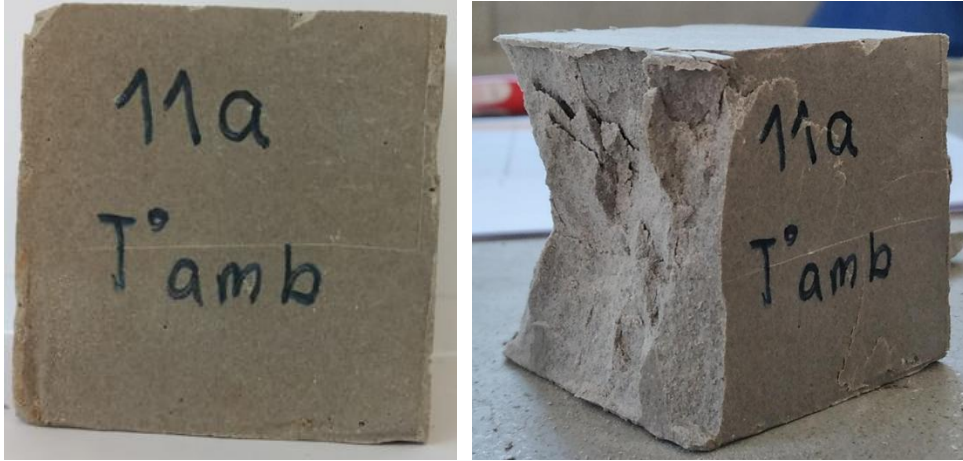


Figura 24

Ensayo a Compresión simple – 0% de reemplazo de valva- Régimen CPT25 (7 días)



Figura 25

*Ensayo a Compresión simple – 0% de reemplazo de valva- Régimen CPT25
(28 días)*

**Figura 26**

*Ensayo a Compresión simple – 0% de reemplazo de valva- Régimen CPT50
(7 días)*

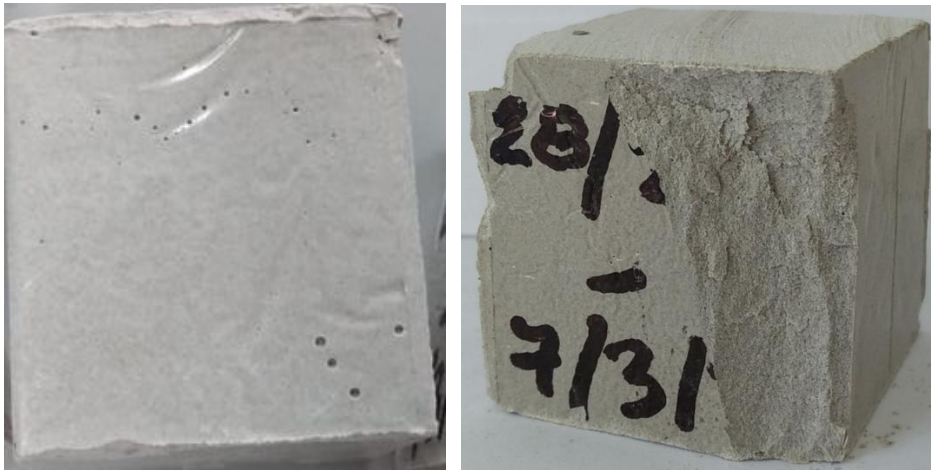


Figura 27

Ensayo a Compresión simple – 0% de reemplazo de valva- Régimen CPT50 (28 días)

**Figura 28**

Ensayo a Compresión simple – 30% de reemplazo de valva- Régimen CPT25 (1 día)

**Figura 29**

Ensayo a Compresión simple – 30% de reemplazo de valva- Régimen CPT25 (7 días)

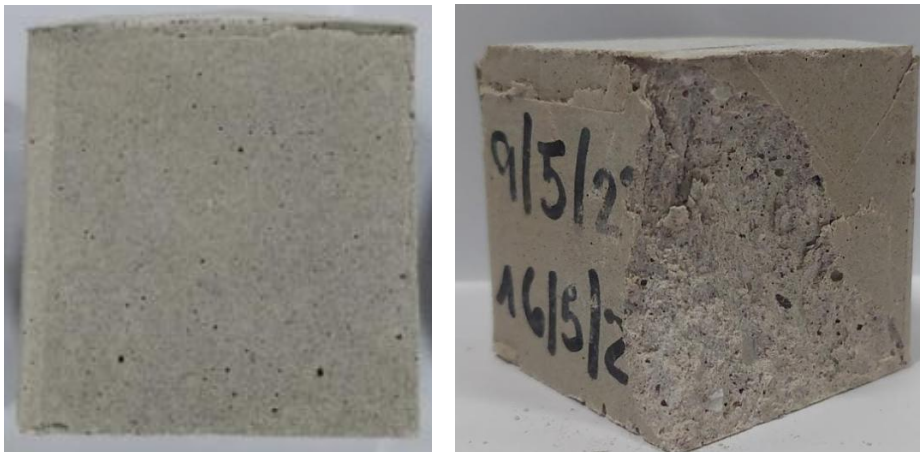


Figura 30

Ensayo a Compresión simple – 30% de reemplazo de valva- Régimen CPT25 (28 días)

**Figura 31**

Ensayo a Compresión simple – 30% de reemplazo de valva- Régimen CPT50 (7 días)

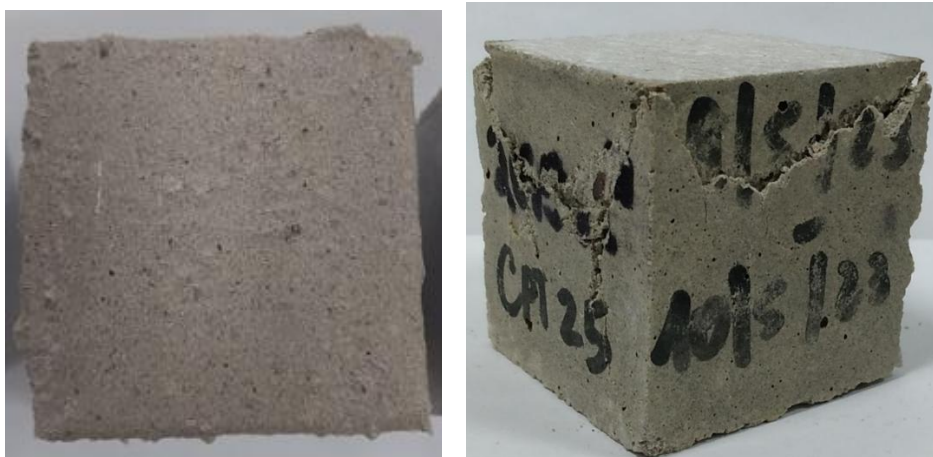


Figura 32

Ensayo a Compresión simple – 30% de reemplazo de valva- Régimen CPT50 (28 días)

**Figura 33**

Ensayo a Compresión simple – 35% de reemplazo de valva- Régimen CPT25 (1 día)

**Figura 34**

Ensayo a Compresión simple – 35% de reemplazo de valva- Régimen CPT25 (7 días)



Figura 35

Ensayo a Compresión simple – 35% de reemplazo de valva- Régimen CPT25 (28 días)

**Figura 36**

Ensayo a Compresión simple – 35% de reemplazo de valva- Régimen CPT50 (7 días)

**Figura 37**

Ensayo a Compresión simple – 35% de reemplazo de valva- Régimen CPT50 (28 días)

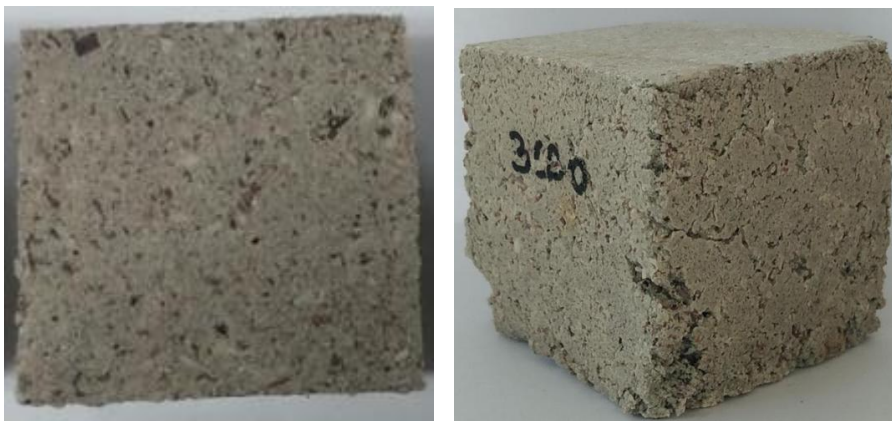


Figura 38

Ensayo a Compresión simple – 40% de reemplazo de valva- Régimen CPT25 (1 día)

**Figura 39**

Ensayo a Compresión simple – 40% de reemplazo de valva- Régimen CPT25 (7 días)

**Figura 40**

Ensayo a Compresión simple – 40% de reemplazo de valva- Régimen CPT25 (28 días)

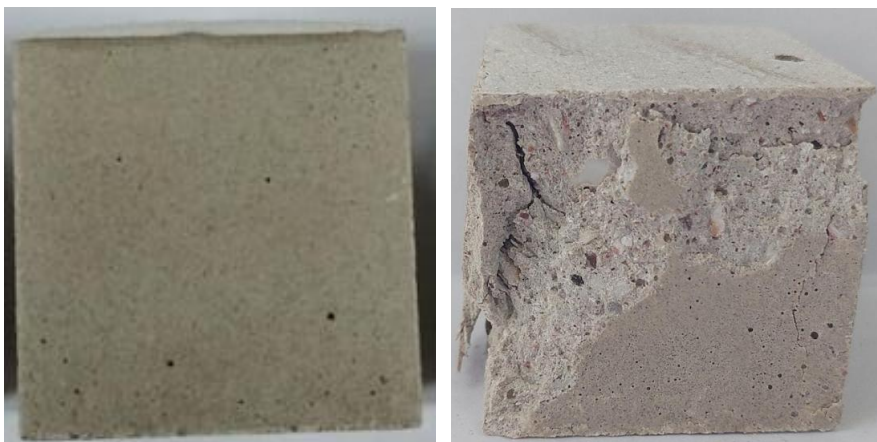


Figura 41

Ensayo a Compresión simple – 40% de reemplazo de valva- Régimen CPT50 (7 días)

**Figura 42**

Ensayo a Compresión simple – 40% de reemplazo de valva- Régimen CPT50 (28 días)



Figura 43

Ensayo a Compresión simple – 45% de reemplazo de valva- Régimen CPT25 (1 día)

**Figura 44**

Ensayo a Compresión simple – 45% de reemplazo de valva- Régimen CPT25 (7 días)



Figura 45

Ensayo a Compresión simple – 45% de reemplazo de valva- Régimen CPT25 (28 días)

**Figura 46**

Ensayo a Compresión simple – 45% de reemplazo de valva- Régimen CPT50 (7 días)



Figura 47

Ensayo a Compresión simple – 45% de reemplazo de valva- Régimen CPT50 (28 días)

**Figura 48**

Ensayo a Compresión simple – 65% de reemplazo de valva- Régimen CPT25 (1 día)



Figura 49

Ensayo a Compresión simple – 65% de reemplazo de valva- Régimen CPT25 (7 días)

**Figura 50**

Ensayo a Compresión simple – 65% de reemplazo de valva- Régimen CPT25 (28 días)



Figura 51

Ensayo a compresión diametral - 0 % de reemplazo de valva - Régimen CPT25 (1 día)

**Figura 52**

Ensayo a compresión diametral - 0 % de reemplazo de valva - Régimen CPT25 (7 días)



Figura 53

Ensayo a compresión diametral - 0 % de reemplazo de valva - Régimen CPT25 (28 días)

**Figura 54**

Ensayo a compresión diametral - 0 % de reemplazo de valva - Régimen CPT50 (7 días)



Figura 55

Ensayo a compresión diametral - 0 % de reemplazo de valva - Régimen CPT50 (28 días).

**Figura 56**

Ensayo a compresión diametral - 30 % de reemplazo de valva - Régimen CPT25 (1 día)



Figura 57

Ensayo a compresión diametral - 30 % de reemplazo de valva - Régimen CPT25 (7 días)

**Figura 58**

Ensayo a compresión diametral - 30 % de reemplazo de valva - Régimen CPT25 (28 días)



Figura 59

Ensayo a compresión diametral - 30 % de reemplazo de valva - Régimen CPT50 (7 día)

**Figura 60**

Ensayo a compresión diametral - 30 % de reemplazo de valva - Régimen CPT50 (28 días)



Figura 61

Ensayo a compresión diametral - 35 % de reemplazo de valva - Régimen CPT25 (1 día)

**Figura 62**

Ensayo a compresión diametral - 35 % de reemplazo de valva - Régimen CPT25 (7 días)



Figura 63

*Ensayo a compresión diametral - 35 % de reemplazo de valva
- Régimen CPT25 (28 días)*

**Figura 64**

*Ensayo a compresión diametral - 35 % de reemplazo de valva
- Régimen CPT50 (7 días)*



Figura 65

*Ensayo a compresión diametral - 35 % de reemplazo de valva
- Régimen CPT50 (28 días)*

**Figura 66**

*Ensayo a compresión diametral - 40 % de reemplazo de valva
- Régimen CPT25 (1 día)*



Figura 67

Ensayo a compresión diametral - 40 % de reemplazo de valva - Régimen CPT25 (7 días)

**Figura 68**

Ensayo a compresión diametral - 40 % de reemplazo de valva - Régimen CPT25 (28 días)



Figura 69

*Ensayo a compresión diametral - 40 % de reemplazo de valva
- Régimen CPT50 (7 días)*

**Figura 70**

*Ensayo a compresión diametral - 40 % de reemplazo de valva
- Régimen CPT50 (28 días)*



Figura 71

Ensayo a compresión diametral - 45 % de reemplazo de valva - Régimen CPT25 (1 día)

**Figura 72**

Ensayo a compresión diametral - 45 % de reemplazo de valva - Régimen CPT25 (7 días)



Figura 73

Ensayo a compresión diametral - 45 % de reemplazo de valva - Régimen CPT25 (28 días)

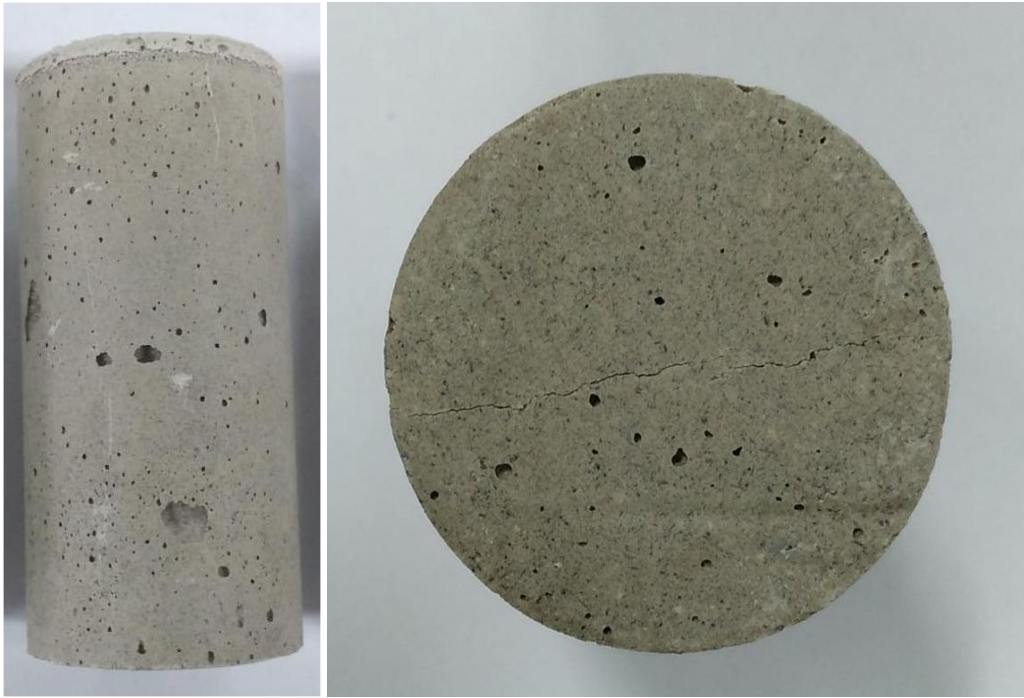
**Figura 74**

Ensayo a compresión diametral - 45 % de reemplazo de valva - Régimen CPT50 (7 días)



Figura 75

Ensayo a compresión diametral - 45 % de reemplazo de valva - Régimen CPT50 (28 días)

**Figura 76**

Ensayo a compresión diametral - 65 % de reemplazo de valva - Régimen CPT25 (1 día)



Figura 77

Ensayo a compresión diametral - 65 % de reemplazo de valva - Régimen CPT25 (7 días)

**Figura 78**

Ensayo a compresión diametral - 65 % de reemplazo de valva - Régimen CPT25 (7 días)

