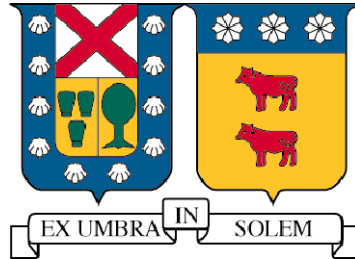


UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA  
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES  
VALPARAISO – CHILE



EFFECTO DE LA CENIZA DE CÁSCARA DE HUEVO EN LA  
RESISTENCIA DE LA PASTA DE CEMENTO

Memoria de título presentada por  
FRANCISCO ENRIQUE MACHUCA SALGADO

Como requisito parcial para optar al título de  
CONSTRUCTOR CIVIL

Profesor guía  
SERGIO CARMONA MALATESTA

Agosto de 2025



## CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

### 1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción):  Memoria o trabajo de título;  Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: Efecto de la ceniza de cáscara de huevo en la resistencia de la pasta de cemento

Nombre del candidato(a): Francisco Enrique Machuca Salgado

Carrera / Grado: Construcción Civil

Campus: Casa Central Valparaíso ; Departamento: Obras Civiles

### 2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Sergio Alejandro Carmona Malatesta, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

### 3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

El trabajo **NO contiene información que amerite confidencialidad** y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

6 meses;  12 meses;  2 años;  3 años;  5 años;  10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

### 4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 22/08/2025

; Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 22/08/2025

; Firma:

*Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.*

## *AGRADECIMIENTOS*

A mis padres, Claudia y Juan, pilares fundamentales de mi vida, por creer siempre en mí.

A mis hermanos, Gonzalo y Benjamín, por su apoyo y compañía en todo momento. A mi pareja Claudia, por su amor, paciencia y motivación.

Gracias infinitas por todo.

## *RESUMEN*

El cemento ha sido fundamental para el desarrollo humano desde sus orígenes hace más de 6000 años hasta el cemento Portland del siglo XIX. Sin embargo, su producción representa aproximadamente el 8% de las emisiones globales de CO<sub>2</sub>. Ante este impacto ambiental, la industria de la construcción busca alternativas sostenibles. Este estudio evalúa el uso de ceniza de cáscara de huevo como sustituto parcial del cemento, analizando su efecto en la resistencia de la pasta. El objetivo es reducir el consumo de cemento y, de esta manera, disminuir las emisiones contaminantes, contribuyendo a una construcción más ecológica.

Resultados preliminares que estudiaron la adición de cenizas de cáscara de huevo a mezclas de concreto sugieren que para bajos porcentajes (<15%) de ceniza se podría aumentar la resistencia mecánica del hormigón, mientras que a mayores porcentajes se disminuye la resistencia.

Para esta experiencia se analizaron, mediante ensayos normalizados a los 7 y 28 días, pastas de cemento con diferentes porcentajes de sustitución por ceniza de cáscara de huevo (0-25%), utilizando dos relaciones de agua cemento (0,35 y 0,4) con el fin de estimar cómo afecta esta incorporación a la resistencia final de la mezcla.

Los resultados obtenidos mostraron que para ambas relaciones de agua cemento, y tanto en los ensayos de flexotracción como compresión, la adición de cenizas afectó negativamente las propiedades mecánicas de la pasta, sin embargo, si se limitara su incorporación a cantidades bajas, inferiores a un 10% de ceniza, y para relaciones agua cemento bajas, podría ser aceptable si lo que se desea es priorizar la sostenibilidad ambiental sin comprometer la resistencia estructural en aplicaciones no críticas, como elementos no estructurales o revoques.

## *ABSTRACT*

Cement has been fundamental to human development from its origins over 6000 years ago to Portland cement in the 19th century. However, its production accounts for approximately 8% of global CO<sub>2</sub> emissions. Facing this environmental impact, the construction industry seeks sustainable alternatives. This study evaluates the use of eggshell ash as a partial cement substitute, analyzing its effect on cement paste strength. The objective is to reduce cement consumption and consequently decrease polluting emissions, contributing to greener construction.

Preliminary results from studies incorporating eggshell ash into concrete mixtures suggest that mechanical strength could increase at low percentages (<15%) of ash, while higher percentages decrease strength.

For this study, standardized tests at 7 and 28 days were conducted on cement pastes with different substitution percentages of eggshell ash (0-25%), using two water-cement ratios (0.35 and 0.4) to evaluate how this incorporation affects the final mixture strength.

The results showed that for both water-cement ratios, in both flexural and compression tests, ash addition negatively affected the mechanical properties of the paste. However, limiting the incorporation to low quantities (<10% ash) with low water-cement ratios could be acceptable when prioritizing environmental sustainability without compromising structural strength in non-critical applications, such as non-structural elements or plastering.

# INDICE

AGRADECIMIENTOS .....	2
RESUMEN .....	3
ABSTRACT.....	4
LISTA DE FIGURAS .....	6
1. INTRODUCCIÓN .....	7
2. OBJETIVOS .....	8
2.1 Objetivo General.....	8
2.2 Objetivos Específicos .....	8
3. MARCO TEÓRICO .....	9
3.1 El Cemento Portland.....	9
3.2 Composición química del cemento portland .....	10
3.3 Hidratación del cemento .....	10
3.4 Impacto ambiental de la producción de cemento .....	13
3.5 Materiales suplementarios y adiciones al cemento.....	14
3.6 Ceniza de cáscara de huevo.....	15
3.7 Relación agua cemento .....	17
3.8 Consistencia de la mezcla .....	18
3.9 Ensayos de compresión y flexotracción .....	19
4. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	19
4.1 Materiales empleados .....	19
4.2 Elaboración de las muestras.....	23
4.3 Ensayo en laboratorio.....	26
5. CÁLCULO Y ANÁLISIS.....	27
5.1 Determinación de la resistencia mecánica.....	27
6. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS .....	33
7. CONCLUSIONES.....	39
8. REFERENCIAS .....	40
9. ANEXOS.....	42

## LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1	Compuestos principales del cemento portland
Tabla 3.2	Principales reacciones químicas en la hidratación del cemento
Tabla 3.3	Componentes del cemento en Chile
Tabla 4.1	Control de temperatura de calcinación
Tabla 4.2	Granulometría de la ceniza
Tabla 4.3	Tiempos de fraguado y resistencias mínimas especificadas según grado del cemento
Tabla 4.4	Dosificación de las muestras
Tabla 4.5	Resultados cono invertido de Abrams y mesa de sacudidas
Tabla 5.1	Resultados resistencia a flexotracción R a/c = 0,35
Tabla 5.2	Resultados resistencia a flexotracción R a/c = 0,4
Tabla 5.3	Resultados resistencia a compresión R a/c = 0,35
Tabla 5.4	Resultados resistencia a compresión R a/c = 0,4
Tabla 6.1	Disminuciones porcentuales en la resistencia a la compresión de las muestras, en relación con la mezcla sin sustitución
Tabla 6.2	Variaciones porcentuales en la resistencia a la flexotracción de las muestras, en relación con la mezcla sin sustitución
Tabla 9.1	Tabla comparativa resumen de resistencias a 7 y 28 días para cada porcentaje de sustitución

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1	Desarrollo de la estructura de la pasta de cemento
Figura 3.2	Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (kt CO <sub>2</sub> eq) del Sector de Procesos Industriales y Uso de Productos (IPPU), Chile.
Figura 3.3	Calcinación en cacerola
Figura 3.4	Relaciones típicas edad/resistencia del hormigón
Figura 4.1	Secado de las cáscaras de huevo al sol
Figura 4.2	Molienda de las cáscaras de huevo en procesadora
Figura 4.3	Calcinación en horno artesanal
Figura 4.4	Tamizado de ceniza
Figura 4.5	Curva granulométrica de la ceniza
Figura 4.6	Dosificación cemento con reemplazo de ceniza de cáscara de huevo
Figura 4.7	Ensayo cono invertido de Abrams
Figura 4.8	Ensayo de consistencia en mesa de sacudidas
Figura 4.9	Vaciado pasta de cemento en probetas Rilem
Figura 4.10	Desmolde de probetas
Figura 5.1	Resistencia a flexotracción R a/c = 0,35
Figura 5.2	Resistencia a flexotracción R a/c = 0,4
Figura 5.3	Resistencia a flexotracción para ambas R a/c
Figura 5.4	Resistencia a compresión R a/c = 0,35
Figura 5.5	Resistencia a compresión R a/c = 0,4
Figura 5.6	Resistencia a compresión para ambas R a/c

## 1. INTRODUCCIÓN

Sin duda el cemento ha sido históricamente el material más utilizado dentro de la industria de la construcción, desde sus primeros vestigios de utilización en base a piedra caliza hace más de 6000 años, hasta la revolución que significara el desarrollo del cemento Portland a inicios del siglo XIX. Sin embargo, a pesar de su gran utilidad es también un gran agente contaminante.

La industria del cemento es responsable de altas emisiones de CO<sub>2</sub>, aproximadamente un 8% de las emisiones a nivel global, según el Instituto Mundial de Recursos (WRI, 2020). Por esto, la búsqueda de nuevos materiales que puedan de alguna manera reemplazar o sustituir en parte su utilización se ha vuelto tan necesaria como urgente. Actualmente el rubro de la construcción se encuentra en una constante búsqueda de desarrollar materiales más eficientes y sostenibles en el tiempo, en el caso del cemento, se ha tratado de reducir el impacto ambiental que genera tanto su producción como su uso, mediante, por ejemplo, la incorporación de adiciones o sustitutos a la mezcla, sin que esto perjudique sus propiedades mecánicas, o incluso mejorando alguna de sus características. Es así como adiciones activas, ricas en sílice activa y componente cálcicos, como las cenizas volantes o escorias de alto horno, que contribuyen en la formación de compuestos hidratados que aportan resistencia a la pasta de cemento, han sido comúnmente utilizados para reducir la cantidad de cemento utilizada, haciéndolo más ecológico (Mamlouk, Michael S., 2009).

Estudios internacionales han desarrollado nuevas alternativas, como un cemento fabricado en un 100% de material reciclado, compuesto por ceniza de huesos de oliva y escoria de altos hornos (Memoria Investigaciones en Ingeniería [UM], 2024), así como adiciones que sustituyen parte del cemento por cenizas de aserrín, logrando en este último caso mejorar la resistencia a la compresión para porcentajes de sustitución de un 10% (UPV, 2017).

Dentro de las alternativas, la cáscara de huevo, debido a su alto contenido de calcio se postula como un producto de interés que podría contribuir en la búsqueda de materiales

que permitan reducir las cantidades de cemento a utilizar en la construcción. Para ser utilizada, sin embargo, se debe pasar por un proceso de calcinación, con el fin de eliminar toda materia orgánica presente y obtener como resultado un compuesto alto en óxido de calcio (Sagar et al., 2023). En estudios previos, como los de Reibán (2017) y Ambicho J. (2022) fue posible determinar que para porcentajes bajos de ceniza incorporada en mezclas de hormigón la resistencia a la compresión logra igualar a la de una mezcla patrón sin adición de ceniza (Ambicho J., 2022) e incluso incrementar esta resistencia (Reibán, 2017), para porcentajes de ceniza del 15% y del 10% respectivamente.

Si bien en ambos estudios se postula que para porcentajes bajos de ceniza incorporada es posible mejorar las propiedades mecánicas en el hormigón, resta no obstante evaluar su impacto en una mezcla pura de pasta de cemento con el fin de determinar su efecto en esta mezcla. Se busca por lo tanto con esta memoria, analizar de manera aislada cómo actúa esta sustitución en relación con las propiedades mecánicas de la pasta.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo General**

El objetivo principal de esta memoria es evaluar el efecto de la incorporación de cáscaras de huevo calcinadas y trituradas en la resistencia a la compresión y flexotracción de pastas de cemento, con el fin de estimar como se ve afectada la capacidad estructural y la durabilidad del material, lo que permitirá evaluar la viabilidad de utilizar este residuo orgánico como sustituto parcial del cemento.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Proponer un procedimiento de preparación de la cáscara de huevo para su uso como adición activa en pasta de cemento.
- Confeccionar diferentes probetas con una mezcla de pasta de cemento y ceniza de cáscara de huevo en diferentes proporciones, evaluando primeramente la consistencia de cada una de ellas.

- Ensayar las probetas elaboradas, según la norma NCh 158, con el fin de determinar el efecto del contenido de cáscaras de huevo con respecto al cemento, incorporado en proporciones entre el 5% y el 25%, en las resistencias a la compresión y flexotracción de pasta de cemento.
- Estimar con qué porcentaje de sustitución existe un mejor comportamiento mecánico, y si eventualmente existe una mejora en la resistencia.

### *3. MARCO TEÓRICO*

#### **3.1 El Cemento Portland**

El cemento es uno de los materiales más antiguos utilizados por la humanidad. Sus orígenes se remontan a más de 6000 años, cuando romanos y egipcios utilizaban mezclas primitivas de caliza calcinada y materiales puzolánicos, como cenizas volcánicas, para construir sus estructuras. No fue hasta inicios del siglo XIX, cuando el ingeniero británico Joseph Aspdin patentara el cemento Portland, revolucionando la construcción, al ofrecer mayor resistencia y durabilidad.

El cemento portland es producido por dos componentes brutos básicos, un material calcáreo y uno arcilloso. El material calcáreo es un óxido de calcio, que puede ser por ejemplo piedra caliza, yeso o conchas de ostras. El material arcilloso corresponde a una combinación de silicio y aluminio, que puede obtenerse a partir de arcilla y escoria de altos hornos, un tipo de horno industrial diseñado para la producción de hierro fundido a partir de mineral de hierro. Estos materiales en bruto, en las proporciones adecuadas, pasan por un proceso de molienda para luego ser almacenado en silos, a la espera de ser llevados al horno principal.

Una vez en el horno principal, el material es fundido a temperaturas entre los 1400 °C y los 1650°C, lo que transforma estos materiales en un compuesto denominado clínker de cemento. El clínker es posteriormente enfriado y almacenado. El final del proceso implica la molienda del clínker, para obtener un polvo fino, al que se le añade una pequeña cantidad de yeso, con el fin de regular el tiempo de fraguado, obteniendo así el cemento portland (Mamlouk, Michael S., 2009).

### 3.2 Composición química del cemento portland

Los materiales en bruto utilizados en la elaboración del cemento portland son la cal, la sílice, el óxido de aluminio y el óxido de hierro. Estos materiales interactúan en el horno principal formando compuestos químicos complejos. La calcinación en el horno reestructura la composición molecular, produciendo cuatro compuestos principales, mostrados en la tabla a continuación.

**Tabla 3.1**

*Compuestos principales del cemento portland*

Compuesto	Fórmula química	Fórmula común*	Rango usual en peso (%)
Silicato tricálcico	$3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$	45–60
Silicato dicálcico	$2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$	15–30
Aluminato tricálcico	$3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$	6–12
Aluminoferrita tetracálcica	$4 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$	6–8

\* La industria cementera suele utilizar una notación abreviada para las fórmulas químicas: C = óxido de calcio, S = dióxido de silicio, A = óxido de aluminio y F = óxido de hierro.

Nota. De Materiales para ingeniería civil (p. 213), por M.S. Mamlouk, 2009, Pearson Educación.

De estos compuestos resultantes, son los silicatos,  $\text{C}_2\text{S}$  y  $\text{C}_3\text{S}$ , los que al hidratarse proporcionan las características de resistencia deseadas al cemento. En cuanto a los aluminatos,  $\text{C}_4\text{AF}$  y  $\text{C}_3\text{A}$ , ellos se producen a partir de los óxidos de hierro y de aluminio incorporados en bruto inicialmente. Estos óxidos se adicionan no obstante con la función de reducir la temperatura requerida para generar el  $\text{C}_3\text{S}$ , disminuyéndola de  $2000^\circ\text{C}$  a  $1350^\circ\text{C}$ , permitiendo ahorrar energía y reducir costes de producción.

### 3.3 Hidratación del cemento

La hidratación corresponde a la reacción química entre el cemento y el agua. En esta reacción los aluminatos se hidratan mucho más rápido que los silicatos. El aluminato tricálcico, por ejemplo, reacciona de manera inmediata liberando grandes cantidades de calor, por lo que se utiliza yeso para ralentizar este proceso. El yeso se disuelve rápidamente generando iones sulfato que bloquean la solubilidad de los aluminatos, lo

que determina la velocidad de fraguado, dependiendo de las concentraciones de estos dos compuestos. Es importante que la velocidad de fraguado inicial se mantenga en límites normales (unos 45 minutos), ya que en caso de un fraguado acelerado se genera una disminución de la resistencia máxima.

Los silicatos de calcio reaccionan con el agua formando silicatos de calcio hidratados (CSH). Al reaccionar, comienzan a formar cristales unas horas después de realizar la mezcla de agua y cemento, y se desarrollan de manera continua mientras haya partículas libres sin reaccionar.

**Tabla 3.2**

Principales reacciones químicas en la hidratación del cemento

TABLA 6.2 Reacciones químicas principales durante la hidratación del cemento.				
$2 (3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2)$ Silicato tricálcico	+	$6 \text{ H}_2\text{O}$ Agua	=	$3 \text{ CaO} \cdot 2 \text{ SiO}_2 \cdot 3 \text{ H}_2\text{O}$ + $3 \text{ Ca} (\text{OH})_2$ Silicato de calcio hidratado + Hidróxido de calcio
$2 (2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2)$ Silicato dicálcico	+	$4 \text{ H}_2\text{O}$ Agua	=	$3 \text{ CaO} \cdot 2 \text{ SiO}_2 \cdot 3 \text{ H}_2\text{O}$ + $\text{Ca} (\text{OH})_2$ Silicato de calcio hidratado + Hidróxido de calcio
$3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ Aluminato tricálcico	+	$12 \text{ H}_2\text{O}$ + $\text{Ca} (\text{OH})_2$ Agua + Hidróxido de calcio	=	$3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Ca} (\text{OH})_2 \cdot 12 \text{ H}_2\text{O}$ Aluminato de calcio hidratado
$4 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ Aluminoferrita tetracálcica	+	$10 \text{ H}_2\text{O}$ + $2 \text{ Ca} (\text{OH})_2$ Agua + Hidróxido de calcio	=	$6 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 12 \text{ H}_2\text{O}$ Aluminoferrita cálcica hidratada
$3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ Aluminato tricálcico	+	$10 \text{ H}_2\text{O}$ + $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{ H}_2\text{O}$ Agua + Yeso	=	$3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12 \text{ H}_2\text{O}$ Monosulfoaluminato cálcico hidratado

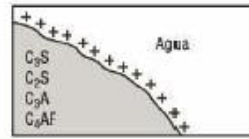
Nota. De Materiales para ingeniería civil (p. 216), por M.S. Mamlouk, 2009, Pearson Educación.

El proceso de hidratación de los silicatos da como resultado tanto CSH como hidróxido de calcio, este último no obstante es susceptible de ser atacado por sulfatos y aguas ácidas, afectando la durabilidad del hormigón. La hidratación completa del  $\text{C}_3\text{S}$  produce un 61% de CSH y un 39% de hidróxido de calcio, por su parte, la hidratación del  $\text{C}_2\text{S}$  produce un 82% de CSH y un 18% de hidróxido de calcio. Por lo tanto, ya que el CSH es lo que confiere la resistencia a la pasta de cemento, si la proporción de  $\text{C}_2\text{S}$  sobre el  $\text{C}_3\text{S}$  aumenta se tiene por consecuencia un incremento en la resistencia máxima, al mismo tiempo se reduce la cantidad de hidróxido de calcio, aumentando también la durabilidad del hormigón.

### Figura 3.1

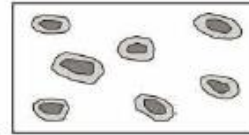
#### Desarrollo de la estructura de la pasta de cemento

La fase C-S-H es la primera. El C<sub>3</sub>A forma un gel más rápido.



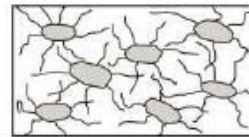
(a)

El volumen de los gránulos de cemento se reduce a medida que se forma un gel en su superficie. Los gránulos del cemento siguen siendo capaces de moverse independientemente, pero a medida que la hidratación progresa, comienzan a aparecer enlaces débiles. Parte del cemento se encuentra en un estado tixotrópico; la vibración puede hacer que esos enlaces débiles se rompan.



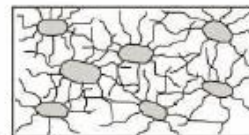
(b)

El fraguado inicial se produce con el desarrollo de un esqueleto débil, que hace que los gránulos de cemento se mantengan en su sitio.



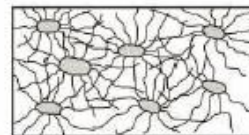
(c)

El fraguado final tiene lugar a medida que el esqueleto se vuelve rígido, lo que hace que las partículas de cemento queden fijadas y que el espaciado entre los gránulos de cemento se incremente, debido a la reducción del volumen de los gránulos.



(d)

Los espacios entre los gránulos de cemento se rellenan con productos de la hidratación, a medida que la pasta de cemento va desarrollando su resistencia y durabilidad.



(e)

**FIGURA 6.3** Desarrollo de la estructura de la pasta de cemento: (a) fase C-S-H inicial, (b) formación de gel, (c) fraguado inicial-desarrollo de un esqueleto débil, (d) fraguado final-desarrollo de un esqueleto rígido, (e) endurecimiento (Hover y Philco, 1990).

Nota. De Materiales para ingeniería civil (p. 218), por M.S. Mamlouk, 2009, Pearson Educación.

Durante las etapas iniciales de la hidratación pueden formarse enlaces débiles, particularmente a partir del C<sub>3</sub>A. Posteriormente la mezcla se va volviendo más rígida, comenzando a bloquear la estructura del material. El fraguado final se produce cuando la fase CSH ha desarrollado una estructura rígida, quedando todos los componentes de la pasta en su lugar e incrementándose el espaciado entre los gránulos a medida que se consumen por hidratación. La pasta se continúa endureciendo y ganando resistencia a medida que progresa la hidratación mientras sigan existiendo partículas de cemento no hidratadas y agua libre.

Debido al crecimiento aleatorio de los cristales, a medida que el cemento se hidrata se forman huecos en la estructura de la pasta. La resistencia y durabilidad se ven afectadas en gran medida por estos huecos, que pueden formarse entre las capas del CSH durante

la hidratación por agua atrapada entre las partículas de CSH, o huecos capilares, que dependen de la proporción de agua con relación al cemento y el nivel de hidratación alcanzado.

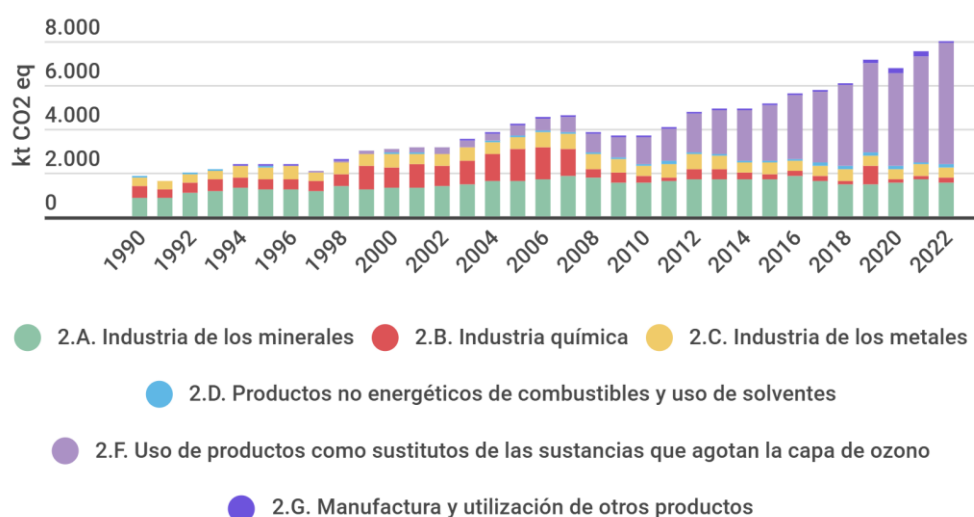
### 3.4 Impacto ambiental de la producción de cemento

La industria del cemento es una de las más contaminantes a nivel global, debido a su alto consumo de energía y emisiones de gases de efecto invernadero. Los principales impactos ambientales asociados a la producción de cemento incluyen altas emisiones de CO<sub>2</sub>, aproximadamente un 8% de las emisiones a nivel global, según el Instituto Mundial de Recursos (WRI, 2020).

Tan sólo en Chile, según la Hoja de Ruta de FICEM-ICH de 2019, las emisiones directas de CO<sub>2</sub> por tonelada de clínker producido en el año 2014 fueron de 893 kg CO<sub>2</sub>/ton clínker, un 6 % por sobre el promedio mundial de 842 kg CO<sub>2</sub>/ton clínker según el GNR (GCCA “Getting the Numbers Right”).

**Figura 3.2**

*Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (kt CO<sub>2</sub> eq) del Sector de Procesos Industriales y Uso de Productos (IPPU), Chile.*



Fuente: Ministerio de Medio Ambiente (MMA)

Estas altas cantidades de emisiones de CO<sub>2</sub> provienen principalmente de dos fuentes:

**Descarbonatación de la caliza:** Durante la calcinación, el carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>) se descompone en óxido de calcio (CaO) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), liberando grandes cantidades de este gas.

**Combustibles fósiles:** Los hornos de cemento requieren altas temperaturas (alrededor de 1450 °C), que se obtienen quemando combustibles como carbón, petróleo o gas natural, lo que genera emisiones adicionales de CO<sub>2</sub>.

Asimismo, la extracción de las materias primas utilizadas trae consigo la degradación de ecosistemas y pérdida de biodiversidad en zonas de extracción y procesado. Junto con aquello, la fabricación del cemento produce residuos sólidos, como polvo y partículas, que pueden contaminar el aire, agua y suelo de las regiones involucradas. Además, los hornos de cemento emiten otros contaminantes atmosféricos como óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>).

Con una producción global que supera los 4 mil millones de toneladas anuales (Global Cement Report, 2023), según la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2021), se estima que, si no se toman medidas, las emisiones de CO<sub>2</sub> de la industria del cemento podrían aumentar un 23% para 2050.

### 3.5 Materiales suplementarios y adiciones al cemento

El contenido de clínker en el cemento representa la principal fuente de CO<sub>2</sub>, por lo que la reducción de su uso en la producción del cemento es uno de los principales objetivos para reducir su impacto ambiental. La incorporación de materiales cementicios suplementarios (SCM) en reemplazo del clínker en el cemento, disminuye proporcionalmente la huella de carbono en el producto final (Hoja de Ruta Chile Cemento y Concreto Net Zero 2050, 2023).

Algunos SCM en el cemento son:

**Ceniza volante:** residuo sólido que se obtiene de los gases de combustión en centrales termoeléctricas a carbón.

Puzolana: material silíceo o aluminio-silíceo que se obtiene de los depósitos de ceniza provenientes de erupciones volcánicas.

Escoria: residuo sólido resultante del proceso de producción de acero en los altos hornos siderúrgicos.

Caliza: roca sedimentaria formada principalmente por carbonato de calcio. Este material se utiliza como relleno (filler).

Arcilla calcinada: se producen mediante calcinación de arcillas y actúan como una puzolana artificial en el cemento.

En Chile, se espera lograr una reducción de 8 puntos porcentuales en el uso de clínker de aquí al año 2050.

**Tabla 3.3**

*Componentes del cemento en Chile*

COMPONENTES DEL CEMENTO	2020	2050
<b>Clínker</b>	<b>71%</b>	<b>63%</b>
Yeso	5%	5%
Escoria	2%	1%
Cenizas	2%	0%
Puzolana	20%	20%
Otras Adiciones	0%	11%

Nota. De Hoja de Ruta Chile Cemento y Concreto Net Zero 2050, Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, 2023

La investigación en nuevos materiales suplementarios, como la ceniza de cáscara de huevo, es esencial para diversificar las opciones disponibles y avanzar hacia una construcción más sostenible.

### 3.6 Ceniza de cáscara de huevo

La cáscara de huevo es un residuo orgánico, compuesto principalmente por carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), que representa alrededor de un 94% del peso total de la cáscara. Contiene además pequeñas cantidades de proteínas, magnesio y otros minerales. Esta composición convierte a la cáscara de huevo en un material potencialmente útil para ser utilizado como sustituto parcial o adición al cemento, ya que el calcio es un componente fundamental en las reacciones de este material.

En Chile, la producción de huevo para consumo alcanza, según el Instituto Nacional de Estadísticas (INE), sobre las 347 millones de unidades anuales a diciembre de 2024, marcando un aumento del 2,5 % respecto al año anterior, por lo que podría considerarse una materia prima bastante abundante para su utilización.

La obtención de la ceniza se realiza mediante un proceso de calcinación, que consiste en someter la cáscara a altas temperaturas, descomponiendo el carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) en óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ).

Las etapas del proceso de calcinación involucran los siguientes procedimientos:

- Limpieza y secado: Las cáscaras se lavan para eliminar impurezas y otros restos orgánicos, y se secan para evitar la acumulación de humedad.
- Trituración: Las cáscaras son trituradas para obtener un tamaño de partículas más pequeño y facilitar así su manejo.
- Calcinación: Las cáscaras trituradas se calcinan en un horno a altas temperaturas, por varias horas.
- Molienda: La ceniza resultante se muele hasta obtener un polvo fino, listo para su uso como adición al cemento.

El óxido de calcio resultante del proceso de calcinación es un componente clave en las reacciones de hidratación del cemento, ya que cuando este se mezcla con agua, forma hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), el cual puede reaccionar con sílice ( $\text{SiO}_2$ ) y alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) presentes en el cemento o en materiales puzolánicos, formando silicatos de calcio hidratados (CSH) y aluminatos de calcio hidratados (CAH), compuestos que mejoran la resistencia y durabilidad del hormigón (Mehta & Monteiro, 2014).

Experiencias en estudios previos como el realizado por Reibán Ojeda (2017), sugieren una temperatura óptima de calcinación para la cáscara de huevo de 1000 °C durante 1 hora en horno, en comparación con las pruebas realizadas a 450 °C y 750 °C, debido a que, a pesar de obtener una mayor pérdida de material, se consigue eliminar un mayor porcentaje de materia orgánica, según lo observado mediante una pistola de fluorescencia de rayos X.

Otros estudios, como el realizado por Ambicho Jauregui (2022), proponen calcinar las cáscaras de huevo en una cacerola en cocina a leña, a una temperatura de más de 700 °C.

En ambas experiencias se pueden observar incrementos en la resistencia del concreto para porcentajes de entre el 10 al 15 % de sustitución con ceniza de cáscara de huevo, lo que permite estimar un comportamiento similar al trabajar de manera aislada la mezcla como pasta de cemento, sin incorporación de agregados pétreos.

### Figura 3.3

*Calcinación en cacerola*



Nota. De Ambicho Jauregui, 2022.

### 3.7 Relación agua cemento

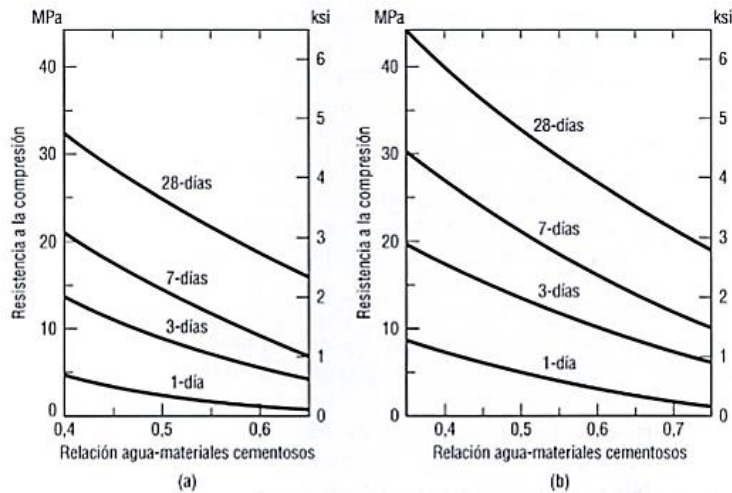
La relación agua cemento (a/c) es uno de los factores más críticos que influyen en la resistencia y durabilidad de la pasta de cemento. Se define como la proporción entre el peso del agua y el peso del cemento en una mezcla. Esta relación tiene un impacto directo en las propiedades mecánicas del cemento.

Una relación a/c baja (típicamente entre 0,35 y 0,45) produce una pasta de cemento más densa y menos porosa, esto se debe a que hay suficiente agua para hidratar los compuestos del cemento, pero no en exceso, lo que reduce la formación de poros capilares. Como resultado, se obtiene una mayor resistencia a la compresión y flexión, ya que la matriz del cemento es más compacta y homogénea. En contraparte, una relación a/c alta (mayor a 0,50) aumenta la trabajabilidad de la mezcla, pero reduce la resistencia. El exceso de agua no participa en la hidratación y se evapora, dejando vacíos

y poros en la matriz del cemento. Estos poros actúan como puntos de debilidad, reduciendo la resistencia mecánica y aumentando la permeabilidad, lo que puede comprometer la durabilidad del hormigón (Mehta & Monteiro, 2014).

**Figura 3.4**

*Relaciones típicas edad/resistencia del hormigón*



Nota. De Materiales para ingeniería civil (p. 223), por M.S. Mamlouk, 2009, Pearson Educación.

### 3.8 Consistencia de la mezcla

La determinación de la consistencia de la mezcla se encuentra definida dentro de la norma NCh 2257, dividida en cuatro partes, siendo consideradas para este ensayo lo indicado en la NCh2257/1 y la NCh 2257/3.

La Norma Chilena NCh 2257/1 establece un método para medir la consistencia de morteros frescos usando una mesa de sacudidas. Para ello se coloca la mezcla de mortero en un molde troncocónico sobre la plataforma, se retira el molde y se aplican 25 sacudidas en 15 segundos. Luego, se registran cuatro diámetros equidistantes y se promedia. Este valor indica la fluidez del mortero, siendo útil para controlar su trabajabilidad en construcción.

La Norma Chilena NCh 2257/3 por su parte, establece el método de ensayo del cono reducido de Abrams, que consiste en llenar un molde troncocónico que tiene una base inferior de 100 mm, una base superior de 50 mm y una altura de 150 mm. Luego del llenado, el molde se levanta cuidadosamente en dirección vertical, para

inmediatamente después medir la disminución de altura del mortero con respecto al molde.

### 3.9 Ensayos de compresión y flexotracción

La norma NCh 158 Of 2009 establece los procedimientos para realizar los ensayos de flexión y compresión para morteros de cementos, así como también definir el proceso de mezcla, moldeado y curado de las probetas rilem. De esta manera, se obtiene la carga máxima aplicada sobre las probetas, lo que permite calcular la resistencia mecánica de estos elementos.

## 4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

### 4.1 Materiales empleados

#### **Ceniza de Cáscara de huevo**

Para la obtención de la ceniza fue necesario recolectar en primer lugar las cáscaras de huevo, provenientes de diversas fuentes, compuesto en su mayor parte por desechos de uso domiciliario. Una vez obtenida la cantidad necesaria, las cáscaras reunidas fueron dejadas secar al sol durante 3 días, para retirar la mayor parte de la humedad que pudiera conservar, así como para secar cualquier resto de materia orgánica que se pudiese haber adherido a las cáscaras.

#### **Figura 4.1**

*Secado de las cáscaras de huevo al sol*



Con las cáscaras una vez secas, se procedió a efectuar una primera molienda, con la finalidad de obtener partículas más finas, que facilitarían el proceso de calcinación. Este procedimiento fue realizado por tandas, de manera manual con una picadora de alimentos.

**Figura 4.2**

*Molienda de las cáscaras de huevo en procesadora*



Con las cáscaras ya molidas, y ante las limitaciones de contar un horno con la capacidad necesaria para la calcinación de las cáscaras, se decidió por realizar este procedimiento en un horno de barro artesanal, controlando periódicamente la temperatura mediante un medidor láser.

**Figura 4.3**

*Calcinación en horno artesanal*



La duración del proceso de calcinación de las cáscaras de huevo fue de un total de 90 minutos, tiempo durante el cual la temperatura controlada al interior del horno, en intervalos de 5 minutos, se presentan en la tabla siguiente:

**Tabla 4.1**

*Control de temperatura de calcinación*

Tiempo [min]	Temperatura [°C]
0	453,7
5	437,4
10	364,9
15	449,7
20	539,6
25	462,5
30	443,9
35	418,2
40	396,3
45	441,7
50	451,6
55	464,7
60	548,7
65	450,7
70	445,2
75	420,8
80	465,4
85	443,6
90	410,5

Nota. Elaboración propia

Finalizado el proceso de calcinación, las cenizas son dejadas enfriar hasta el día siguiente, para posteriormente pasar a una segunda etapa de molienda, con la finalidad de reducir aún más el tamaño de las partículas. Luego de la molienda, se realizó un tamizado de una muestra base de 100 gramos para obtener la distribución granulométrica de nuestra ceniza de cáscara de huevo, representada en la siguiente tabla y gráfico adjuntos:

**Figura 4.4**

*Tamizado de ceniza*



**Tabla 4.2**

*Granulometría de la ceniza*

Tamiz	Peso Retenido [g]
16	0
30	13,2
50	27,4
100	28,3
Bajo #100	30,5

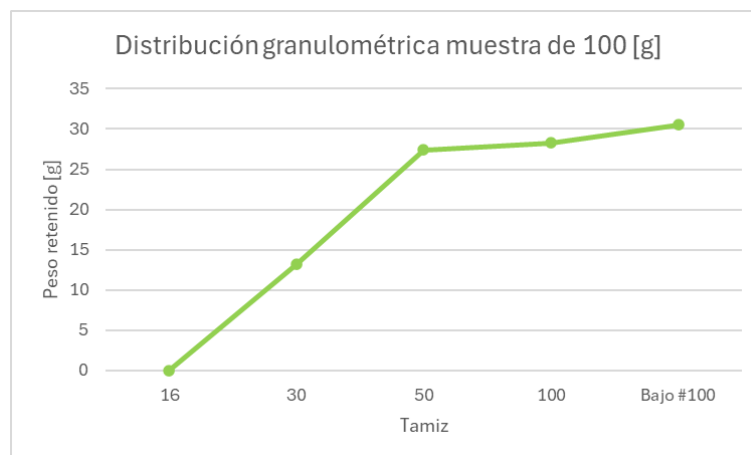
  

Total	99,4
-------	------

Nota. Elaboración propia

**Figura 4.5**

*Curva granulométrica de la ceniza*



Nota. Elaboración propia

## Cemento Corriente y Agua

El cemento utilizado para la fabricación de las muestras corresponde a Cemento Melón Especial, formulado en base a clínker, puzolana y yeso, motivo por el cual se encuentra clasificado como lo indica su ficha técnica, como un cemento de clase puzolánico de grado corriente, según la norma NCh 148 Of 68. La resistencia especificada a compresión para este cemento es de 230 kgf/cm<sup>2</sup> a los 7 días y de 340 kgf/cm<sup>2</sup> a los 28 días. Por otra parte, la resistencia especificada para flexotracción es de 45 kgf/cm<sup>2</sup> a los 7 días y 62 kgf/cm<sup>2</sup> luego de 28 días.

**Tabla 4.3**

*Tiempos de fraguado y resistencias mínimas especificadas según grado del cemento*

Grado	Tiempo de fraguado		Resistencia mínima a la compresión		Resistencia mínima a la flexión	
	Inicial mínimo min	Final máximo h	7 días kg/cm <sup>2</sup>	28 días kg/cm <sup>2</sup>	7 días kg/cm <sup>2</sup>	28 días kg/cm <sup>2</sup>
Corriente	60	12	180	250	35	45
Alta resistencia	45	10	250	350	45	55

Nota. De Norma Chilena NCh 148 Of 68.

## 4.2 Elaboración de las muestras

### Dosificación

Para la fabricación de las probetas se utilizaron dos relaciones de agua cemento, con el fin de poder ampliar el abanico de opciones de manera de encontrar una dosificación óptima en la búsqueda de mejorar la resistencia de la pasta de cemento.

Los porcentajes de ceniza de cáscara de huevo a utilizar son de 0% para la mezcla de referencia, y de un 5%, 10%, 15% y 25% para las muestras a evaluar.

La siguiente tabla muestra las cantidades de material utilizado para cada una de las muestras:

**Figura 4.6**

*Dosificación cemento con reemplazo de ceniza de cáscara de huevo*



**Tabla 4.4**

*Dosificación de las muestras*

Relación agua/cemento	% Ceniza de Cáscara de Huevo	Dosificación		
		Cemento [gr]	Ceniza [gr]	Agua [ml]
R a/c = 0,35	0%	1800	0	630
	5%	1710	90	630
	10%	1620	180	630
	15%	1530	270	630
	25%	1350	450	630
R a/c = 0,4	0%	1800	0	720
	5%	1710	90	720
	10%	1620	180	720
	15%	1530	270	720
	25%	1350	450	720

Nota. Elaboración propia

### **Ensayo de consistencia**

Se realiza un ensayo de consistencia para la pasta de cemento, acorde a la norma NCh 2257, para evaluar cómo se comporta este parámetro en relación con la muestra de referencia sin incorporación de ceniza de cáscara de huevo.

Los resultados del cono invertido de Abrams y en la mesa de sacudida se registran en la tabla siguiente:

**Tabla 4.5**

*Resultados cono invertido de Abrams y mesa de sacudidas*

R a/c	% ceniza cáscara de huevo	Cono reducido [cm]	Ecurrimiento [cm]				
			d1	d2	d3	d4	d prom
0,35	0%	4,2	18,7	18,8	18,8	19,7	19,0
0,35	5%	6,2	19,2	19,3	19,4	19,5	19,4
0,35	10%	6,9	20,5	20,6	20,8	21,1	20,8
0,35	15%	7,8	21,4	21,5	21,5	21,7	21,5
0,35	25%	10,6	22,0	22,4	22,5	22,7	22,4
0,4	0%	7,3	19,0	18,2	19,3	19,4	19,0
0,4	5%	9,6	21,3	21,4	22,5	21,8	21,8
0,4	10%	10,8	22,5	22,5	23,2	23,3	22,9
0,4	15%	11,3	23,0	23,1	23,5	23,9	23,4
0,4	25%	12,7	25,1	25,4	25,5	25,5	25,4

Nota. Elaboración propia

**Figura 4.7**

*Ensayo cono invertido de Abrams*



**Figura 4.8**

*Ensayo de consistencia en mesa de sacudidas*



### Vaciado de la pasta de cemento

Se realiza el vaciado de la mezcla en los moldes de acuerdo con lo indicado en la norma chilena NCh 158 Of 2019, previa aplicación de una delgada capa de desmoldante en cada uno de ellos. El llenado se realiza en dos capas, compactando la mezcla luego de colocar cada una de ellas. Finalmente, la superficie debe ser enrasada para dejarla lo más lisa posible, y cada molde es rotulado con la información de cada una de las muestras en estudio.

### Figura 4.9

*Vaciado pasta de cemento en probetas Rilem*



### 4.3 Ensayo en laboratorio

Luego de llenados los moldes y transcurridas 48 horas desde el vaciado de la mezcla, se procede a desmoldar las probetas, para posteriormente proceder a rotular cada una de ellas con los datos de relación agua cemento, y sus respectivos porcentajes de ceniza de cáscara de huevo incorporada.

### Figura 4.10

*Desmolde de probetas*



A continuación, las muestras son llevadas a laboratorio para ser ensayadas. En este caso se contrataron los servicios de ensayo de materiales de LEPUCV (Laboratorio de Ensayos de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso), ubicado en Camino Internacional 5465, G1 Viña del Mar. Aquí las muestras son sometidas a ensayos de compresión y flexotracción a los 7 y 28 días, bajo altos estándares de calidad, acorde a la norma NCh 158 Of 2019 que regula estos ensayos.

## 5. CÁLCULO Y ANÁLISIS

Tabla comparativa resumen de resistencias a 7 y 28 días para cada porcentaje de sustitución, incluyendo ambas relaciones agua/cemento, añadida como anexo.

### 5.1 Determinación de la resistencia mecánica

Para determinar la resistencia mecánica de las muestras a estudiar, estas son sometidas a ensayos de flexotracción y compresión, definidos según la norma NCh 158 Of 2019.

#### **Resistencia a la Flexotracción**

Para la realización de este ensayo, la probeta es posicionada sobre una de sus caras laterales, apoyada sobre dos rodillos ubicados situados a una distancia de 100 mm. Sobre la cara superior, y ubicado en una posición equidistante a los dos apoyos inferiores, se aplica una carga puntual, de manera gradual y continua, hasta que se produzca la rotura de la probeta. Se registra la carga máxima aplicada al momento de la rotura, donde la resistencia a la flexotracción se encuentra dada por la siguiente fórmula:

$$\sigma_f = \frac{1,5 * F * L}{b * h^2} \quad (5.1)$$

Donde:

$\sigma_f$  : Resistencia a la flexotracción (MPa).

F: Carga máxima aplicada (N).

L: Distancia entre apoyos (110 mm).

b: Ancho de la probeta (40 mm).

h: Altura de la probeta (40 mm).

Los resultados obtenidos para cada una de las muestras se encuentran detallados en la tabla a continuación:

- Para relación agua cemento  $R a/c = 0,35$

**Tabla 5.1**

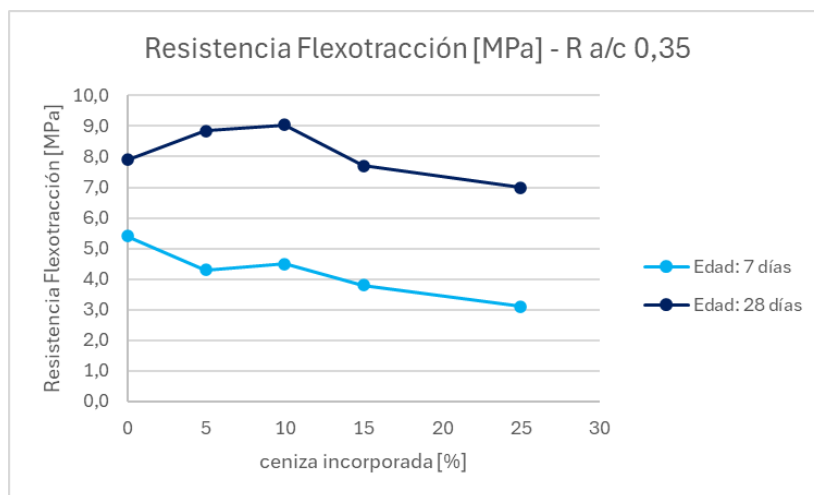
*Resultados resistencia a flexotracción  $R a/c = 0,35$*

% cenizas	Edad: 7 días	Edad: 28 días
	Resistencia a flexión [MPa]	Resistencia a flexión [MPa]
0	5,4	7,9
5	4,3	8,9
10	4,5	9,1
15	3,8	7,7
25	3,1	7,0

Nota. Elaboración propia

**Figura 5.1**

*Resistencia a flexotracción  $R a/c = 0,35$*



Nota. Elaboración propia

- Para relación agua cemento R a/c = 0,4

**Tabla 5.2**

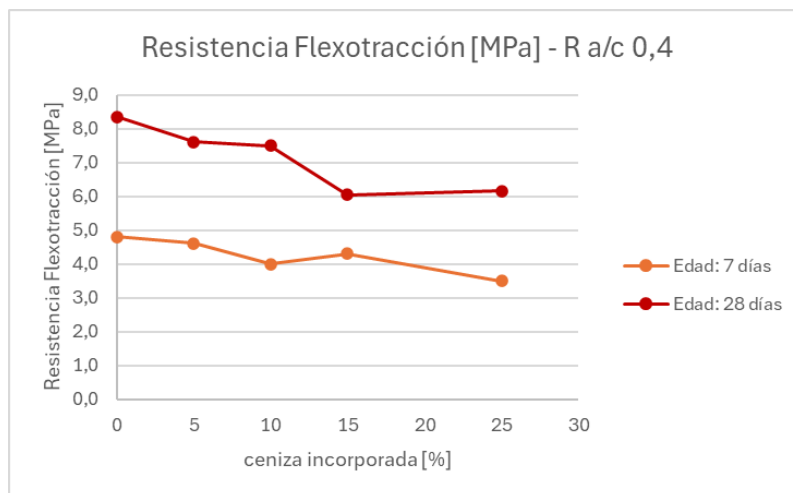
*Resultados resistencia a flexotracción R a/c = 0,4*

% cenizas	Edad: 7 días	Edad: 28 días
	Resistencia a flexión [MPa]	Resistencia a flexión [MPa]
0	4,8	8,4
5	4,6	7,6
10	4,0	7,5
15	4,3	6,1
25	3,5	6,2

Nota. Elaboración propia

**Figura 5.2**

*Resistencia a flexotracción R a/c = 0,4*

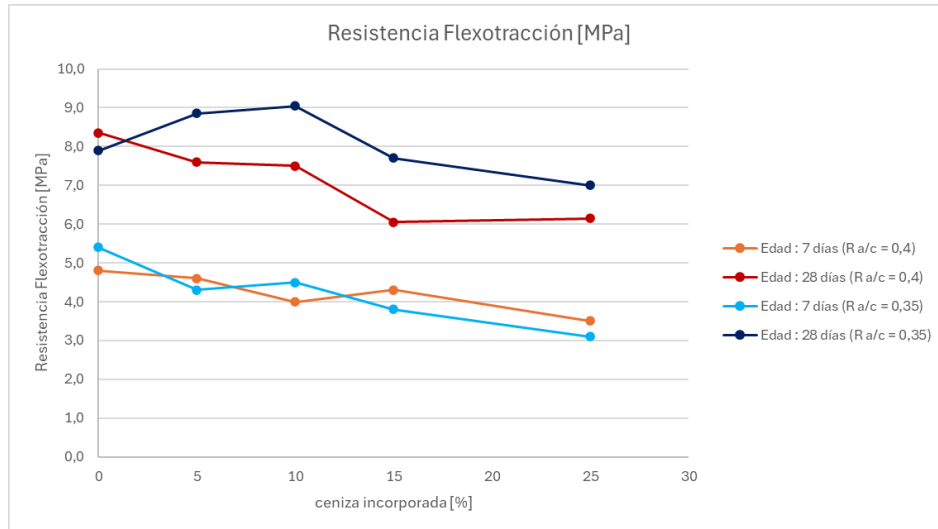


Nota. Elaboración propia

Combinando los gráficos de ambas relaciones agua cemento:

**Figura 5.3**

*Resistencia a flexotracción para ambas R a/c*



Nota. Elaboración propia

### Resistencia a la Compresión

Después del ensayo de flexotracción, cada mitad de la probeta rota se utiliza para ser ensayada a compresión. Para esto se sitúa sobre la máquina de ensayo, aplicándole una carga sobre la cara lateral por medio de dos placas de presión, rectangulares de dimensiones 40 x 40 mm.

Luego la resistencia a la compresión de la muestra queda determinada por la fórmula:

$$\sigma_c = \frac{F}{A} \quad (5.2)$$

Donde:

$\sigma_c$  : Resistencia a la compresión (MPa).

F: Carga máxima aplicada (N).

A: Área transversal de la sección ensayada (40\*40 mm = 1600 mm<sup>2</sup>).

Las resistencias obtenidas para cada una de las muestras se indican en la tabla siguiente:

- Para relación agua cemento  $R_{a/c} = 0,35$

**Tabla 5.3**

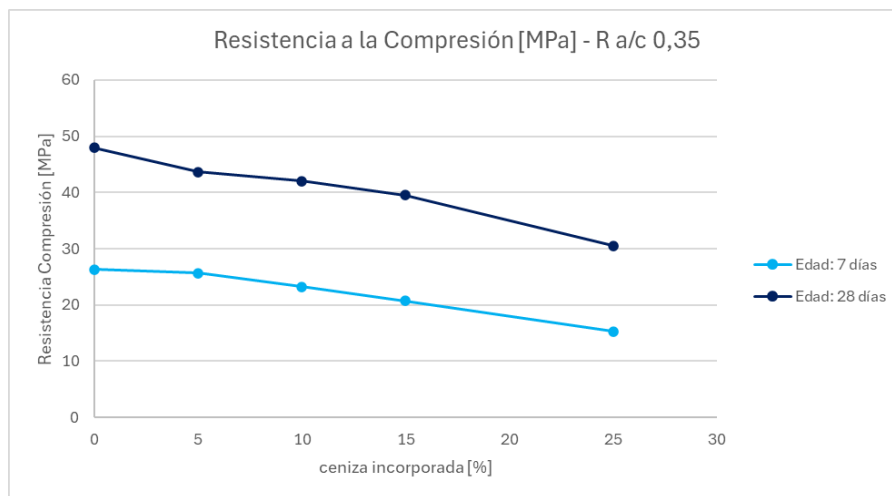
*Resultados resistencia a compresión  $R_{a/c} = 0,35$*

% cenizas	Edad: 7 días	Edad: 28 días
	Resistencia a compresión [MPa]	Resistencia a compresión [MPa]
0	26,3	48,0
5	25,7	43,7
10	23,2	42,0
15	20,7	39,6
25	15,3	30,5

Nota. Elaboración propia

**Figura 5.4**

*Resistencia a compresión  $R_{a/c} = 0,35$*



Nota. Elaboración propia

- Para relación agua cemento  $R_{a/c} = 0,4$

**Tabla 5.4**

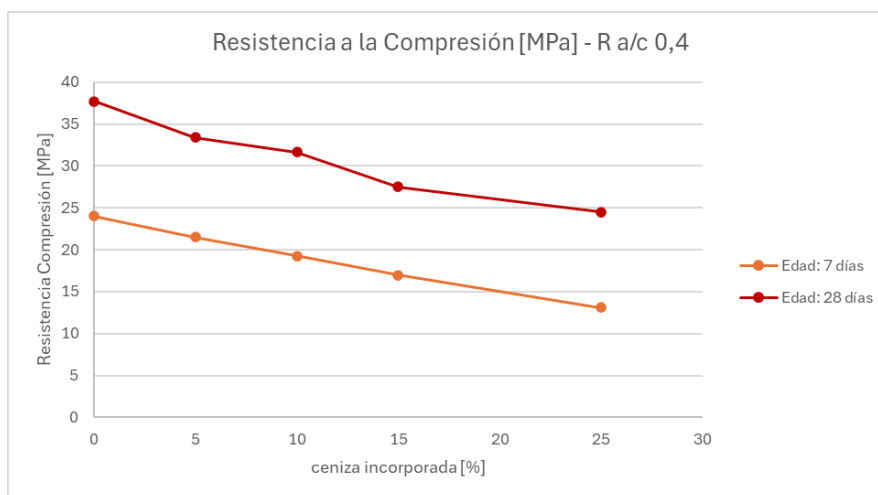
*Resultados resistencia a compresión  $R_{a/c} = 0,4$*

% cenizas	Edad: 7 días	Edad: 28 días
	Resistencia a compresión [MPa]	Resistencia a compresión [MPa]
0	24	37,7
5	21,5	33,4
10	19,3	31,7
15	17	27,5
25	13,1	24,5

Nota. Elaboración propia

**Figura 5.5**

*Resistencia a compresión  $R_{a/c} = 0,4$*

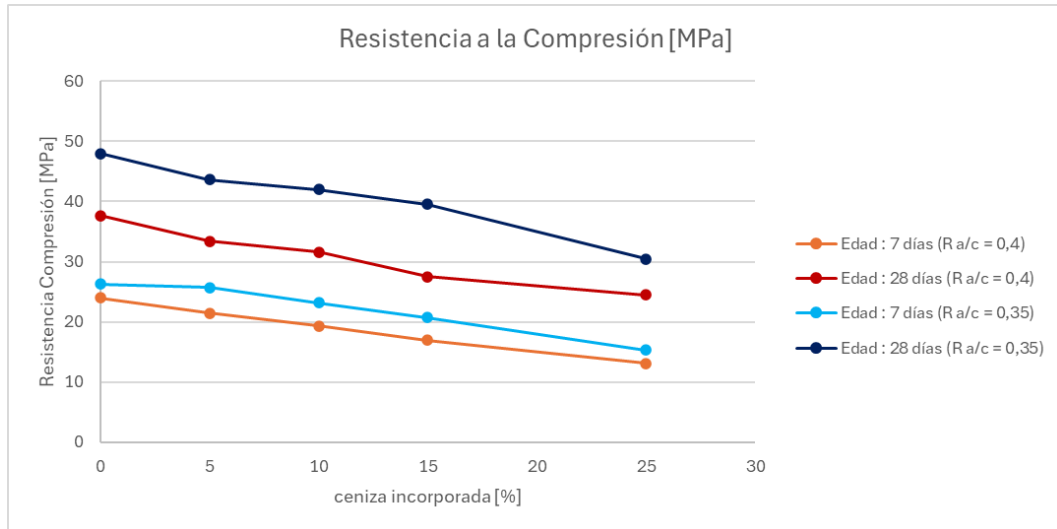


Nota. Elaboración propia

Graficando en conjunto para ambas relaciones de agua cemento se tiene:

**Figura 5.6**

*Resistencia a compresión para ambas R a/c*



Nota. Elaboración propia

## 6. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Considerando los resultados obtenidos, es posible observar que para ambas relaciones de agua cemento la resistencia a compresión disminuyó a medida que se incrementaba el porcentaje de ceniza de cáscara de huevo.

En el ensayo a 7 días con una relación agua cemento de 0,35 la resistencia pasó de 26,3 MPa para la mezcla sin adición de cenizas, a sólo 15,3 MPa para la mezcla con una sustitución del 25%, teniendo así un descenso de alrededor de un 42,3% en la resistencia de la muestra. De la misma manera, para el ensayo a 28 días, la resistencia obtenida cayó de 48 MPa a 30,5 MPa para los porcentajes de sustitución señalados anteriormente. Esto representa una disminución en la resistencia a la compresión de aproximadamente un 36,5%.

Para la relación de agua cemento de 0,4 los resultados fueron menos auspiciosos. Las muestras ensayadas a los 7 días mostraron una disminución en la resistencia de 24 MPa (0% de ceniza) a 13,1 MPa (25% de ceniza). Una disminución de un 45,4% en la resistencia a compresión. A los 28 días la resistencia bajó de 37,7 MPa a 24,5 MPa para los porcentajes de ceniza mencionados, lo que representa un 35% de pérdida en la resistencia de las probetas.

Según lo mostrado en la tabla siguiente, se tiene que la pérdida de resistencia a la compresión, si bien es similar para ambas relaciones agua cemento con un 25% de sustitución, es más gradual para la R a/c de 0,35.

**Tabla 6.1**

*Disminuciones porcentuales en la resistencia a la compresión de las muestras, en relación con la mezcla sin sustitución*

% cenizas	R a/c = 0,35		R a/c = 0,4	
	Edad: 7 días	Edad: 28 días	Edad: 7 días	Edad: 28 días
	% pérdida resistencia	% pérdida resistencia	% pérdida resistencia	% pérdida resistencia
0	0%	0%	0%	0%
5	2%	9%	10%	11%
10	12%	12%	20%	16%
15	21%	18%	29%	27%
25	42%	36%	45%	35%

Nota. Elaboración propia

Se puede observar, por lo tanto, que para porcentajes de reemplazo del cemento por ceniza de cáscara de huevo de entre un 5% y un 10% la pérdida en la resistencia es proporcionalmente bastante menos agresiva que para porcentajes mayores.

De la misma manera, para la resistencia a la flexotracción, los resultados obtenidos muestran una tendencia similar, aunque menos consistentes, ya que para la relación agua cemento de 0,35 se observó un incremento en la resistencia para las sustituciones de 5% y 10% a una edad de 28 días.

**Tabla 6.2**

*Variaciones porcentuales en la resistencia a la flexotracción de las muestras, en relación con la mezcla sin sustitución*

% cenizas	R a/c = 0,35		R a/c = 0,4	
	Edad: 7 días	Edad: 28 días	Edad: 7 días	Edad: 28 días
	% variación resistencia		% variación resistencia	
0	0%	0%	0%	0%
5	-20%	12%	-4%	-9%
10	-17%	15%	-17%	-10%
15	-30%	-3%	-10%	-28%
25	-43%	-11%	-27%	-26%

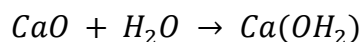
Nota. Elaboración propia

Igualmente se observa en general una disminución en la resistencia a la flexotracción, la cual es mucho más notoria para la relación agua cemento de 0,4 a los 28 días.

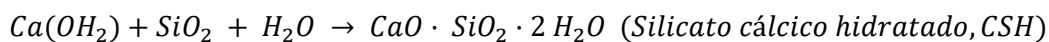
Los resultados indican de manera general que, para porcentajes bajos de ceniza, menores a un 10%, podría ser viable su utilización como sustituto parcial, en particular para relaciones agua cemento en torno al 35%, en especial si se prioriza la resistencia a la flexotracción, ya que es donde mejor comportamiento se obtuvo. Sin embargo, para la resistencia a la compresión, cualquier porcentaje de ceniza redujo las propiedades mecánicas, por lo que su uso debiera estar limitado o bien complementado con aditivos con el fin de no comprometer de sobremanera la resistencia.

Si bien algunos estudios previos como Reibán Ojeda (2017) y Ambicho Jauregui (2022) sugieren que la resistencia del concreto tiende a aumentar con la incorporación de ceniza de cáscara de huevo, es posible que la disminución que se obtuvo en estos ensayos se deba a diversas causas.

La principal causa de esta variación en los resultados radica en una diferencia metodológica fundamental, la ausencia de áridos. Al estudiar exclusivamente la interacción entre la ceniza de cáscara de huevo y la pasta de cemento, se establece un escenario donde el óxido de calcio (CaO) aportado por la ceniza experimenta una hidratación inmediata:



Para que el hidróxido de calcio reaccione correctamente y forme silicatos cálcicos hidratados (CSH) requiere de sílice ( $SiO_2$ ), sin embargo, en ausencia de áridos (que en los estudios previos con hormigón aportan sílice adicional) la reacción se ve limitada por la disponibilidad de  $SiO_2$  proveniente únicamente del cemento, lo que al mismo tiempo reduce la cantidad de sílice disponible para las reacciones propias del cemento, generando un exceso de hidróxido de calcio y una formación insuficiente de CSH.



Se tiene, por lo tanto, que la ausencia de áridos al incorporar la ceniza altera la estequiometría o el balance en las reacciones de hidratación del cemento, al incorporar CaO en exceso, impidiendo la óptima formación de CSH, disminuyendo por consiguiente la resistencia final.

Adicionalmente, se puede observar que los ensayos de consistencia, tanto del cono reducido de Abrams como el ensayo en la mesa de sacudidas mostraron un incremento en la fluidez de la mezcla, reduciendo su consistencia de manera proporcional al incremento en los porcentajes de adición de cenizas. Esto podría verse explicado debido a el tamaño de partículas obtenido luego del proceso de molienda, el cual no logró reducir hasta un tamaño ideal las cáscaras calcinadas, como se observa en la curva granulométrica de la ceniza, a pesar de haber sido pasadas reiteradas veces por la procesadora. Este mayor tamaño de partículas en la ceniza puede afectar de forma directa a la estructura de la mezcla, generando una matriz más porosa y frágil.

De la misma manera, un tamaño de partículas mayor influye en la hidratación de la pasta, ya que podría quedar agua almacenada en los microporos y grietas de las partículas de ceniza, por lo que, en la práctica, no toda el agua agregada en la dosificación de la mezcla estará disponible para la hidratación de los compuestos cementantes. Si esta agua retenida no reacciona químicamente, al evaporarse durante el fraguado genera poros en la matriz de cemento, reduciendo su resistencia.

Bajo este mismo parámetro, para partículas de ceniza idealmente finas se expone una mayor superficie al contacto con el agua y los componentes del cemento, acelerando la formación de CSH. En cambio, para partículas de mayor tamaño, como las obtenidas en este ensayo, estas pueden acabar actuando como filler inerte, ocupando espacios en la matriz que finalmente no contribuyen en las reacciones de hidratación ni en la resistencia. Podrían además generar zonas de debilidad favoreciendo la aparición de grietas, junto a la ya mencionada porosidad.

Otro punto por considerar corresponde al proceso de calcinación, que, si bien intentó emular lo mejor posible lo realizado en las experiencias vistas, sigue siendo un método bastante artesanal, que no permite llevar un control exhaustivo del proceso. Por ejemplo, el uso de un horno artesanal, donde la combustión no se puede controlar de manera precisa, pudo haber introducido elementos contaminantes derivados del humo en la ceniza, afectando su desempeño al incorporarla al cemento.

Dentro de los factores a considerar podría estar el carbono emitido durante la combustión, que al adherirse a las partículas de ceniza pueden actuar como impurezas e interferir en las reacciones del óxido de calcio, retardando las reacciones de hidratación. Igualmente, el CO<sub>2</sub> proveniente del carbono de combustión puede reaccionar con el hidróxido de calcio y generar carbonato de calcio y agua, reacción conocida como carbonatación. Este carbonato de calcio es inerte en las reacciones puzolánicas y no contribuye en la resistencia.



Durante el proceso de calcinación, además, es posible que las fluctuaciones en la temperatura afectaran de manera negativa la ceniza resultante, ya que partes de la cáscara de huevo podrían quedar como carbonato de calcio sin descomponer.

De esta manera, el humo del horno artesanal sí pudo afectar negativamente la calidad de la ceniza, introduciendo contaminantes que redujeran su reactividad y

contribuyendo a la baja de resistencia. Este factor, sumado a la molienda no óptima, podrían ser factores adicionales que expliquen las discrepancias con estudios previos. Sin embargo, la principal causa observable, como se ha mostrado mediante el análisis de las reacciones de hidratación, radica en la ausencia de áridos o agregados ricos en sílice que permitan compensar el exceso de óxido de calcio, generando las reacciones puzolánicas necesarias para formar silicatos de calcio hidratados.

En general, a pesar de la reducción en las propiedades mecánicas observadas, la incorporación de ceniza de cáscara de huevo representa una alternativa sostenible de notable valor ambiental, al aprovechar un residuo orgánico abundante. Los resultados de este estudio, si bien no alcanzan los niveles de resistencia esperados, revelan que la ceniza de cáscara de huevo tiene potencial como adición sostenible en pastas de cemento, teniendo en consideración la necesidad de compensar con alguna fuente complementaria de sílice adicional, para equilibrar las reacciones de hidratación, y siempre que se optimicen de forma más precisa los procesos de molienda y calcinación.

## 7. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos, se puede concluir lo siguiente:

- La incorporación de ceniza de cáscara de huevo en la pasta de cemento reduce la resistencia mecánica en proporción al porcentaje de sustitución aplicado.
- Para bajos porcentajes (<10%) de sustitución y una relación agua/cemento de 0,35, los resultados muestran pérdidas moderadas en compresión y, en algunos casos, mejoras en la flexotracción.
- En porcentajes superiores al 15%, tanto la resistencia a la compresión como la flexotracción disminuyen de forma considerable, limitando su aplicabilidad estructural.
- La ausencia de áridos en la mezcla experimental influyó negativamente, ya que no se aportó sílice adicional para compensar el exceso de CaO de la ceniza, limitando la formación de compuestos resistentes (CSH).
- A pesar de las limitaciones, la ceniza de cáscara de huevo representa una alternativa sostenible y abundante, viable para aplicaciones no estructurales y con potencial de mejora si se optimizan los procesos de calcinación, molienda y se incorporan fuentes complementarias de sílice.

## 8. REFERENCIAS

- World Resources Institute (WRI, 2020). "Emisiones de CO<sub>2</sub> en la industria del cemento."
- Mehta, P. K., PhD, & Monteiro, P. J. M., PhD. (2014). Concrete: Microstructure, Properties, and Materials (4th ed.). McGraw-Hill Education.
- Mamlouk, Michael S. (2009). Materiales para ingeniería civil. Pearson Educación.
- Universitat Politècnica de València. (2017, noviembre). Investigadores de la UPV y la UNESP crean un nuevo tipo de cemento a partir de ceniza de huesos de oliva y escoria de altos hornos.
- Asif, I., Ubair Hussain, M., Arham Khan, A., Ashar, M., Usman, M., & Shahid, Z. (2024). Utilización de Ceniza de Aserrín como aditivo del cemento en hormigón y estudio de sus propiedades mecánicas. Memoria Investigaciones En Ingeniería, (26), 54–69.
- Sagar, P., Afzal, H., Ashish, K., Fanish, K., Mohd, A., Hassan, M., Mohammad, S. (Julio 2023). Sustainable cement replacement using waste eggshells: A review on mechanical properties of eggshell concrete and strength prediction using artificial neural network. Case Studies in Construction Materials, Volume 18. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509523003406#sec0160>.
- Reibán Ojeda, D.V. (2017). Evaluación experimental de las características mecánicas de matrices cementicias con adición de cáscara de huevo pulverizado deshidratado y sus aplicaciones en la arquitectura (Tesis de pregrado). Universidad Técnica Particular de Loja, Loja, Ecuador.

- Ambicho Jauregui, M.S. (2022). Adición de cenizas de cáscara de huevo triturado para mejorar las propiedades del concreto  $f'c= 210 \text{ kg/cm}^2$  en pavimentos (Tesis de pregrado). Universidad César Vallejo, Lima, Perú.
- ICH-FICEM Chile (2023). “Hoja de Ruta Chile – Cemento y Concreto. Net Zero 2050”.
- NCh 158 Of 2019, Cemento – Ensayo de compresión.
- NCh 163 Of 79, Áridos para morteros y hormigones – Requisitos generales.
- NCh 165 Of 77, Áridos para morteros y hormigones – Tamizado y determinación de la granulometría.
- NCh 2256/1 Of 2001, Morteros – Parte 1: Requisitos generales.
- NCh 2257/1 Of 96, Morteros – Determinación de la consistencia – Parte 1: Método del extendido en la mesa de sacudidas.
- NCh 2257/3 Of 96, Morteros – Determinación de la consistencia – Parte 3: Método del asentamiento de cono.

## 9. ANEXOS.

**Tabla 9.1**

*Tabla comparativa resumen de resistencias a 7 y 28 días para cada porcentaje de sustitución*

% cenizas	Resistencia a la flexotracción [MPa]				Resistencia a la compresión [MPa]			
	Edad: 7 días		Edad: 28 días		Edad: 7 días		Edad: 28 días	
	R a/c = 0,35	R a/c = 0,4	R a/c = 0,35	R a/c = 0,4	R a/c = 0,35	R a/c = 0,4	R a/c = 0,35	R a/c = 0,4
0	5,4	4,8	7,9	8,4	26,3	24	48,0	37,7
5	4,3	4,6	8,9	7,6	25,7	21,5	43,7	33,4
10	4,5	4,0	9,1	7,5	23,2	19,3	42,0	31,7
15	3,8	4,3	7,7	6,1	20,7	17	39,6	27,5
25	3,1	3,5	7,0	6,2	15,3	13,1	30,5	24,5

Nota. Elaboración propia