

TESIS DE MAESTRIA:

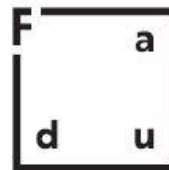
**VALORIZACIÓN DE RESIDUOS CERÁMICOS NACIONALES. ESTUDIO PRELIMINAR DE SU  
CAPACIDAD PUZOLÁNICA.**

AUTOR:  
MARTÍN MÁXIMO SAAVEDRA BORELLI

TUTOR:  
DRA. ARQ. MARÍA ESTHER FERNANDEZ

INSTITUTO DE LA CONSTRUCCIÓN  
FACULTAD DE ARQUITECTURA, DISEÑO Y URBANISMO

MONTEVIDEO, URUGUAY 2019



**Facultad de Arquitectura,  
Diseño y Urbanismo**  
UDELAR



*“Nuestra crisis actual es una crisis de imaginación. Una crisis en la cual, dado que tenemos lo que tenemos y que conocemos lo que conocemos, no somos capaces de imaginar un mundo distinto.*

*Cuando uno está en una situación de privilegio, uno intenta, por lo adictiva que es la vida, perseverar en lo mismo. Cuando uno se encuentra en problemas, es probable que ya no sea tan inteligente repetir la misma fórmula”.*

**Solano Benítez**

## **AGRADECIMIENTOS**

Deseo expresar mi agradecimiento a la FADU, al Instituto de Construcción y a aquellas personas que directa o indirectamente han colaborado en la realización de esta investigación.

Especialmente a María Esther Fernández, por su tiempo y dedicación, guía indispensable durante todo este camino.

A la Comisión Sectorial Científica (CSIC) por el financiamiento a través de su programa Iniciación a la Investigación que permitió la realización de este trabajo.

Por ultimo a mis padres y a mi familia, que siempre alimentaron mi espíritu crítico y por su apoyo incondicional durante toda mi vida.

## RESUMEN

La presente investigación está relacionada con el estudio de la viabilidad de la reutilización de residuos cerámicos como sustitución parcial de cemento Portland. Esta búsqueda aporta a una mejor gestión ambiental, tanto por la reducción de la disposición final de los residuos como también por un menor uso de cemento Portland que conlleva a la disminución de emisiones contaminantes a la atmósfera generadas por su producción.

Uno de los mayores desafíos de la humanidad para este siglo XXI, es afrontar la realidad del cambio climático. El calentamiento global es un hecho y su potencial impacto con efectos irreversibles sobre la vida humana, animal y vegetal es ineludible. Estudios realizados, concluyen que el calentamiento global es producto de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) vinculadas a las actividades humanas que, en caso de no ser mitigadas ni controladas, pueden conducir a efectos devastadores y catastróficos sobre el frágil ecosistema del mundo.

El cemento es uno de los materiales más usados mundialmente y lo seguirá siendo durante el S.XXI. El cemento es fundamental para el desarrollo de las infraestructuras de los países y el desarrollo de estos. La producción mundial de este material se incrementó un 73 % entre los años 2005 a 2013, de 2310 Mt a 4000 Mt, siendo responsable del 5 % al 8 % de las emisiones globales de CO<sub>2</sub>.

5

La sustitución, parcial o total, del Cemento Portland Normal (CPN) por otros materiales, cuyo procesamiento requiera poca energía, es una opción sumamente interesante para reducir sensiblemente esta problemática, y propiciar un ahorro energético con una menor afectación al ambiente.

En este trabajo se caracterizaron las propiedades físicas y químicas de residuos cerámicos nacionales y posteriormente se llevó a cabo un estudio sobre su actividad puzolánica, a través de la evaluación del comportamiento mecánico y micro estructural en morteros de matriz cementicia, con el fin de valorar su empleo como adición al cemento Portland.

El objetivo general de esta investigación fue analizar la viabilidad de utilizar residuos cerámicos, existentes en nuestro medio, como adición puzolánica en matrices a base de cemento Portland.

Para ello se seleccionaron dos tipos de cerámicos de diferente procedencia (método de producción artesanal e industrial). Se optimizó el tamaño de las partículas de los cerámicos para su empleo como adición. Posteriormente se determinó la reactividad de los cerámicos seleccionados mediante la realización de ensayos fisicoquímicos utilizando técnicas de FRX, DRX y TGA/DTA.

Finalmente se realizó el análisis estadístico de los resultados alcanzados para valorar su empleo como adición a cemento Portland.

Luego de analizar y evaluar los resultados experimentales obtenidos, se pueden establecer las siguientes conclusiones en relación con la viabilidad de utilizar residuos cerámicos, existentes en nuestro medio, como adición puzolánica en matrices a base de cemento Portland:

- Los residuos cerámicos estudiados pueden ser catalogados como puzolanas artificiales procedentes de arcillas calcinadas cumpliendo con las especificaciones de la normativa vigente que las caracteriza físico y químicamente.
- No existen diferencias significativas entre la resistencia mecánica de los morteros a edad de 28 días y 56 días con respecto al mortero de referencia con una sustitución del 15 % del cemento en su peso por parte de polvo cerámico.
- En todos los casos el porcentaje de disminución, calculado con respecto al control, es inferior al grado de sustitución de cemento, lo que indica que los materiales de desecho actúan como puzolanas, aportando resistencia mecánica, lo que repercute positivamente en los materiales puestos en obra.

Se concluye que existe una posibilidad de valorización de residuos cerámicos como puzolanas alternativas para cementos y morteros eco eficientes, consiguiendo no solo una mejora ambiental como consecuencia de la utilización de un residuo proveniente de una cadena industrial sino también por las ventajas científico técnicas demostradas.

## **INDICE**

### **1 | INTRODUCCIÓN**

### **2 | ANTECEDENTES**

#### 2.1. Contextualización del estudio.

2.1.1. Cemento

2.1.2. Ladrillo cerámico

2.1.3. Gestión de los Residuos de Obra Civiles

#### 2.2. Adiciones puzolánicas

#### 2.3. Antecedentes en la utilización de residuos cerámicos como material puzolánico.

### **3 | OBJETIVOS**

#### 3.1. Objetivo General

#### 3.2. Objetivos Específicos

7

### **4 | METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

#### 4.1. Materiales

4.1.1. Material Cerámico

4.1.2. Agua

4.1.3. Arena

4.1.4. Cemento

#### 4.2. Equipos

4.2.1. Molienda

4.2.2. Tamizadora

4.2.3. Amasadora

4.2.4. Compactadora

4.2.5. Estufa

4.2.6. Medición de pH y conductividad

- 4.2.7. Prensa
- 4.2.8. Moldes
- 4.2.9. Granulometría por difracción láser (ADL)
- 4.2.10. Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)
- 4.2.11. Difractómetro de rayos X (DRX)
- 4.2.12. Análisis termogravimétrico (TGA/DTA)
- 4.2.13. Fluorescencia de rayos X (FRX)

#### 4.3. Procedimientos

- 4.3.1. Elaboración de matrices cementicias
  - 4.3.1.1. Acondicionamiento de muestras cerámicas
  - 4.3.1.2. Producción de morteros
  - 4.3.1.3. Producción de pastas cementicias y pastas con hidróxido de calcio
- 4.3.2. Análisis de granulometría por difracción de rayos láser (ADL)
- 4.3.3. Determinación de la Resistencia a flexión y compresión
  - 4.3.3.1. Resistencia a la flexión
  - 4.3.3.2. Resistencia a la compresión
- 4.3.4. Valoración de la actividad puzolánica
- 4.3.5. Análisis termogravimétrico y térmico diferencial (TGA/ DTA)
- 4.3.6. Análisis por difracción de rayos X (DRX)
- 4.3.7. Análisis por fluorescencia de rayos X (FRX)
- 4.3.8. Análisis de las matrices cementicias por microscopia electrónica de barrido (SEM)
- 4.3.9. Mediciones de pH y conductividad
- 4.3.10. Mediciones del contenido de humedad
- 4.3.11. Análisis por pérdida por calcinación



## 5 | RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1. Caracterización de los cerámicos

5.1.1. Análisis de granulometría por difracción de rayos láser (ADL)

5.1.2. Ensayo de pérdida por calcinación

5.1.3. Análisis por difracción de rayos X (DRX)

5.1.3.1. Graficas del análisis por difracción de rayos X. Serie 0 %. Muestras cerámicas.

5.1.3.2. Graficas del análisis por difracción de rayos X. Serie 10 % Pastas con adición cerámica.

5.1.3.3. Graficas del análisis por difracción de rayos X. Serie 15 % Pastas con adición cerámica.

5.1.3.4. Graficas del análisis por difracción de rayos X. Serie 30 % Pastas con adición cerámica.

5.1.4. Análisis por fluorescencia de rayos X (FRX)

5.1.5. Mediciones del contenido de humedad

### 5.2. Valoración de la actividad puzolánica en pastas cementicias

5.2.1. Mediciones de pH y conductividad

5.2.2. Análisis termogravimétrico y térmico diferencial (TGA/ DTA)

5.2.2.1. Pastas de cemento portland con adición cerámica.

5.2.2.2. Pastas de hidróxido de calcio con adición cerámica

5.2.3. Caracterización superficial mediante microscopia

5.2.4 Caracterización mecánica de los morteros

5.2.4.1. Resistencia a Flexión

5.2.4.1.1. Resistencia a la flexión de morteros con 5 % de adición cerámica.

5.2.4.1.2. Resistencia a la flexión de morteros con 10 % de adición cerámica.

5.2.4.1.3. Resistencia a la flexión de morteros con 20% de adición cerámica.

5.2.4.1.4. Resistencia a la flexión de morteros con 30 % de adición cerámica.

5.2.4.1.5. Resistencia a la flexión de morteros con 15 % de adición cerámica.

#### 5.2.4.2. Resistencia a Compresión

5.2.4.2.1. Resistencia a la compresión de morteros con 5 % de adición cerámica.

5.2.4.2.2. Resistencia a la compresión de morteros con 10 % de adición cerámica.

5.2.4.2.3. Resistencia a la compresión de morteros con 20 % de adición cerámica.

5.2.4.2.4. Resistencia a la compresión de morteros con 30 % de adición cerámica.

5.2.4.2.5. Resistencia a la compresión de morteros con 15 % de adición cerámica.

5.3. Caracterización según norma UNIT 1047:1999 [21]

## **CAPITULO 6 | CONCLUSIONES**

6.1. Conclusiones generales

6.2. Futuras líneas de investigación

## **CAPITULO 7 | REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS**

## INDICE DE IMÁGENES Y FIGURAS

### 4 | METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

**IMAGEN 4.1.1.1.** – Cerámicos utilizados: ticholo industrial (A), prensa (B) y chorizo (C).

**IMAGEN 4.1.1.2.** – Cerámicos utilizados, tipo artesanal estándar (D), ladrillo artesanal tipo chorizo (E), sección de ladrillo tipo E carbonizado (F).

**FIGURA 4.1.4.** Análisis granulométrico del cemento utilizado, CPN40 Artigas.

**IMAGEN 4.2.1.** Molino de bolas utilizado. Vista general (A), Recipiente cerámico (B) y Bolas de Alúmina (C).

**IMAGEN 4.2.3.** Amasadora Controls, vista general (A).

**IMAGEN 4.2.4.** Compactadora Controls, vista general (A).

**IMAGEN 4.2.5.** Estufa Novus, vista general (A).

**IMAGEN 4.2.6.** Kit de conductividad y pH, vista general (A).

**IMAGEN 4.2.7.** Prensa Controls MCC8 Multitest Utilizada. Bastidor de flexión 100 kN (A), Bastidor a compresión 2000kN (B).

**IMAGEN 4.2.8.** Moldes utilizados para la elaboración de las muestras. Molde de acero (A), y Molde de metacrilato (B).

**IMAGEN 4.3.1.1.** Acondicionamiento de las muestras de cerámico. Acondicionamiento mediante medios mecánicos manuales (A), serie de tamices utilizado (B) y cerámico tamizado (C).

**IMAGEN 4.3.1.2.1.1.** Producción de morteros. (A) Preparación previa al amasado, (B) posicionado de molde en compactadora y (C) compactado finalizado.

**IMAGEN 4.3.1.2.1.2.** Curado de probetas. (A) Mortero en molde 24 horas luego de amasado, (B) probetas desmoldadas e identificadas y (C) curado de probetas dentro de contenedores.

**IMAGEN 4.3.1.3.** Preparación de pastas para ser ensayadas. Molido de muestras en recipiente cerámico (A), Molido de muestras embebida en acetona (B) y filtrado de pastas en kitasato (C) y (D).

**IMAGEN 4.3.3.1.** Ensayo a Flexión. Probeta previa al ensayo (A) y probeta luego de aplicada la fuerza (B).

**IMAGEN 4.3.3.2.** Ensayo a Compresión. Bastidor a compresión de 2000 KN (A) y probeta previa a aplicación de la fuerza a compresión (B).

**IMAGEN 4.3.5.** Grafica con curva TG y DTG para pasta de cemento [1].

### 5 | RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**FIGURA 5.1.1.1.** Análisis granulométrico del ladrillo industrial tipo ticholo (muestra A).

**FIGURA 5.1.1.2.** Análisis granulométrico del ladrillo industrial de prensa (muestra B).

**FIGURA 5.1.1.3.** Análisis granulométrico del ladrillo artesanal tipo “chorizo” (muestra C).

**FIGURA 5.1.1.4.** Análisis granulométrico del ladrillo artesanal estándar (muestra D).

**FIGURA 5.1.3.1.** Resultados DRX. Cerámico tipo A.

**FIGURA 5.1.3.2.** Resultados DRX. Cerámico tipo B.

**FIGURA 5.1.3.3.** Resultados DRX. Cerámico tipo C.

**FIGURA 5.1.3.4.** Resultados DRX. Cerámico tipo D.

**FIGURA 5.1.3.5.** Resultados DRX. Cerámico tipo A.

**FIGURA 5.1.3.6.** Resultados DRX. Cerámico tipo B.

**FIGURA 5.1.3.7.** Resultados DRX. Cerámico tipo C.

**FIGURA 5.1.3.8.** Resultados DRX. Cerámico tipo D.

**FIGURA 5.1.3.9.** Resultados DRX. Cerámico tipo A.

**FIGURA 5.1.3.10.** Resultados DRX. Cerámico tipo B.

**FIGURA 5.1.3.11.** Resultados DRX. Cerámico tipo C.

**FIGURA 5.1.3.12.** Resultados DRX. Cerámico tipo D.

**FIGURA 5.1.3.13.** Resultados DRX. Cerámico tipo A.

**FIGURA 5.1.3.14.** Resultados DRX. Cerámico tipo B.

**FIGURA 5.1.3.15.** Resultados DRX. Cerámico tipo C.

**FIGURA 5.1.3.16.** Resultados DRX. Cerámico tipo D.

**FIGURA 5.2.2.1** DTA de pastas de cemento con 10 % de sustitución cerámica a 28 días.

**FIGURA 5.2.2.2** DTA de pastas de cemento con 15 % de sustitución cerámica a 28 días.

**FIGURA 5.2.2.3** DTA de pastas de cemento con 30 % de sustitución cerámica a 28 días.

**FIGURA 5.2.2.2.1.** Valores de Cal fijada. Sustitución del 20 % por adición cerámica.

**FIGURA 5.2.2.2.2.** Valores de Cal fijada. Pastas con sustitución del 30 % por adición cerámica.

**FIGURA 5.2.2.2.3.** DTA de pastas de cal con 20 % de sustitución cerámica tipo A a 7, 28 y 56 días.

**FIGURA 5.2.2.2.4.** DTA de pastas de cal con 20 % de sustitución cerámica tipo D a 7, 28 y 56 días.

**FIGURA 5.2.2.2.5.** DTA de pastas de cal con 30 % de sustitución cerámica tipo A a 7, 28 y 56 días.

**FIGURA 5.2.2.2.6.** DTA de pastas de cal con 30 % de sustitución cerámica tipo D a 7, 28 y 56 días.

- FIGURA 5.2.3.1.** Microscopia (SEM) de la muestra A por 1000 aumentos. Gel C-S-H.
- FIGURA 5.2.3.2.** Microscopia (SEM) de la muestra B por 1000 aumentos. Gel C-H-S.
- FIGURA 5.2.3.3.** Microscopia (SEM) de la muestra C por 55 aumentos. Partícula de árido.
- FIGURA 5.2.3.4.** Microscopia (SEM) de la muestra D por 55 aumentos. Partícula de árido.
- FIGURA 5.2.3.5.** Microscopia (SEM) de la muestra A por 10000 aumentos. Cristales de Portlandita.
- FIGURA 5.2.3.6.** Microscopia (SEM) de la muestra D por 1000 aumentos. Fisura.
- FIGURA 5.2.3.7.** Microscopia (SEM) de la muestra F por 1000 aumentos. Fisura
- FIGURA 5.2.3.8.** Microscopia (SEM) de la muestra A por 10000 aumentos.
- FIGURA 5.2.3.9.** Microscopia (SEM) de la muestra B por 10000 aumentos
- FIGURA 5.2.3.10.** Microscopia (SEM) de la muestra F (Patrón) por 10000 aumentos.
- FIGURA 5.2.3.11.** Microscopia (SEM) de la muestra F (Patrón) por 55 aumentos.
- FIGURA 5.2.3.12.** Microscopia (SEM) de la muestra A por 55 aumentos.
- FIGURA 5.2.3.13.** Microscopia (SEM) de la muestra B por 55 aumentos.
- FIGURA 5.2.3.14.** Microscopia (SEM) de la muestra C por 55 aumentos.
- FIGURA 5.2.4.1.** Resistencia a la flexión de morteros con 5 % de adición cerámica.
- FIGURA 5.2.4.2.** Resistencia a la flexión de morteros con 10 % de adición cerámica.
- FIGURA 5.2.4.3.** Resistencia a la flexión de morteros con 20% de adición cerámica.
- FIGURA 5.2.4.4.** Resistencia a la flexión de morteros con 30 % de adición cerámica.
- FIGURA 5.2.4.5.** Resistencia a la flexión de morteros con 15 % de adición cerámica.
- FIGURA 5.2.4.6.** Resistencia a la compresión de morteros con 5 % de adición cerámica.
- FIGURA 5.2.4.7.** Resistencia a la compresión de morteros con 10 % de adición cerámica.
- FIGURA 5.2.4.8.** Resistencia a la compresión de morteros con 20 % de adición cerámica.
- FIGURA 5.2.4.9.** Resistencia a la compresión de morteros con 30 % de adición cerámica.
- FIGURA 5.2.4.10.** Resistencia a la compresión de morteros con 15 % de adición cerámica.

## **INDICE DE TABLAS**

### **4 | METODOLOGÍA EXPERIMENTAL**

**TABLA 4.1.3.** Composición granulométrica de la arena utilizada.

**TABLA 4.1.4.** Composición química del cemento CPN40 Artigas

## 5 | RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**TABLA 5.1.1.** Resultados de análisis de granulometría de las muestras cerámicas y CPN40.

**TABLA 5.1.2.** Resultados del ensayo por pérdida de calcinación.

**TABLA 5.1.3.1.** Análisis por difracción de rayos X. Serie 100 %. Muestras cerámicas.

**TABLA 5.1.3.2.** Análisis por difracción de rayos X. Serie 90 % Pastas con adición cerámica.

**TABLA 5.1.3.3.** Análisis por difracción de rayos X. Serie 85 % Pastas con adición cerámica.

**TABLA 5.1.3.4.** Análisis por difracción de rayos X. Serie 70 % Pastas con adición cerámica.

**TABLA 5.1.4.1.** Análisis por fluorescencia de rayos X. Serie 0 %. Muestras cerámicas.

**TABLA 5.4.1.2.** Calculo de óxidos. Serie 0 % de adición cerámica.

**TABLA 5.4.1.3.** Análisis por fluorescencia de rayos X. Serie con 10 % pastas con adición cerámica.

**TABLA 5.4.1.4.** Análisis por fluorescencia de rayos X. Serie con 15 % pastas con adición cerámica.

**TABLA 5.4.1.5.** Análisis por fluorescencia de rayos X. Serie con 30 % pastas con adición cerámica.

**TABLA 5.1.5.** Resultados de las mediciones de contenido de humedad de muestras cerámicas.

**TABLA 5.1.5.** Resultados de las mediciones de pH y conductividad en suspensión acuosa.

**TABLA 5.2.2.1.** Resultados obtenidos del ensayo termogravimétrico para pastas a 28 días de edad.

**TABLA 5.2.2.2.** Resultados obtenidos del ensayo termogravimétrico para pastas con cal a 7, 28 y 56 días de edad.

**TABLA 5.2.4.6.** Índice de actividad puzolánica. Pastas con 5 % de adición cerámica.

**TABLA 5.2.4.7.** Índice de actividad puzolánica. Pastas con 10 % de adición cerámica.

**TABLA 5.2.4.8.** Índice de actividad puzolánica. Pastas con 20 % de adición cerámica.

**TABLA 5.2.4.9.** Índice de actividad puzolánica. Pastas con 15 % de adición cerámica.

**TABLA 5.3.1.** Requisitos físicos según la norma 1047:1999 [2].

**TABLA 5.3.2.** Requisitos físicos según la Norma UNIT 1047:1999 [2].

**TABLA 5.3.3.** Requisitos químicos según la Norma UNIT 1047:1999 [2].

## 1 | INTRODUCCIÓN

La presente Tesis de Maestría ha sido realizada en el marco del programa de Maestría en Construcción de Obras de Arquitectura, perteneciente al Instituto de la Construcción de la Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo – Udelar, Uruguay. Cabe desatacar que el desarrollo de la investigación ha sido posible gracias al financiamiento del Programa Iniciación a la Investigación otorgado por la Comisión Sectorial de Investigación Científica – CSIC.

El Instituto de la Construcción viene investigando desde hace años la reutilización de residuos provenientes de sectores productivos, tanto industriales como agrícolas en la incorporación a matrices cementicias con el fin del estudio y desarrollo de nuevos materiales.

Siguiendo la misma línea de investigación, la propuesta de la presente tesis está relacionada con el estudio de la valorización de residuos cerámicos de arcilla cocida. En pos de una mejor gestión ambiental, tanto sea por la reducción de la disposición final de los residuos como también la utilización de los mismos como sustituto parcial del cemento Portland y se busca lograr un impacto ambiental con la disminución de emisiones contaminantes a la atmósfera generadas en su producción.

En este trabajo se caracterizaron las propiedades físicas y químicas de residuos cerámicos nacionales y posteriormente se llevó a cabo un estudio sobre su actividad puzolánica, a través del comportamiento mecánico y micro estructural en morteros a base de cemento portland, con el fin de valorar su empleo como adición al cemento Portland.

Uno de los mayores desafíos de la humanidad para este siglo XXI, es afrontar la realidad del cambio climático. El calentamiento global es un hecho y su potencial impacto con efectos irreversibles sobre la vida humana, animal y vegetal es ineludible. Según estudios realizados, concluyen que el calentamiento global es producto de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) vinculadas a las actividades humanas que, en caso de no ser mitigadas ni controladas, pueden conducir a efectos devastadores y catastróficos sobre el frágil ecosistema del mundo [3].

El protocolo de Kioto (1997) se firmó dentro de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) y la XXI conferencia de Paris (2015) fueron diversos acuerdos globales, ratificados por la mayoría de los países en un compromiso de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y limitar el calentamiento global por debajo de 1,5 °C para el año 2100 [4].

Los efectos devastadores del cambio climático urgen a los gobiernos y a la industria dedicar tiempo y presupuesto para estudiar la viabilidad de reducir y disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero hacia la atmosfera. El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) es el gas con mayor abundancia

e impacto dentro del conjunto de gases de efecto invernadero, contribuyendo principalmente al fenómeno del calentamiento global.

Según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), las emisiones de CO<sub>2</sub> procedente de la combustión de combustibles fósiles y los procesos industriales contribuyeron en torno al 78 % del aumento total de emisiones de GEI, a pesar del creciente número de políticas de mitigación del cambio climático. Las emisiones antropógenas de GEI en 2010 alcanzaron la cifra de (49 ± 4,5) GtCO<sub>2</sub> eq/año con una estimación de crecimiento anual del 1,6 %. Además la IPCC predice que las emisiones de GEI para el 2030 van haberse incrementado entre un 25 % y 90 % comparado con el año 2000 [5].

El cemento es uno de los materiales más usados mundialmente y lo seguirá siendo durante el S.XXI. Es fundamental para el desarrollo de las infraestructuras de los países y el desarrollo de estos. Su producción mundial se incrementó un 73 % entre los años 2005 a 2013, de 2310 Mt a 4000 Mt [6], siendo responsable del 5 % al 8 % de las emisiones globales de CO<sub>2</sub>. [7].

Desde el 2006, se estima que la producción mundial de cemento aumenta entre un 0,8 % y 1,2 % anualmente, previéndose que alcance la cifra de 3,7 – 4,4 billones de toneladas para el 2050 principalmente por la demanda global de cemento como principal material de construcción y el constante crecimiento demográfico mundial (Banco Interamericano de Desarrollo (IDB), 2010).

16

La generación de CO<sub>2</sub> en la producción del cemento se debe principalmente al consumo intensivo de energía para su producción del orden de 100 - 150 kWh/ton de cemento producido. Y en una primera instancia donde, en el precalentamiento de la piedra caliza alrededor de los 550 °C, se genera en una reacción química inicial la descomposición del CaCO<sub>3</sub> a CaO y CO<sub>2</sub>.

En resumen, por cada tonelada de cemento producido se emiten a la atmosfera aproximadamente 950 kg de CO<sub>2</sub>. La producción de cemento involucra también el transporte de las materias primas y su extracción desde las canteras donde se consume 1,7 toneladas de materia prima por tonelada de cemento elaborado [8].

Los aspectos medioambientales involucrados en la producción de cemento son de creciente importancia. Por ello, la sustitución, parcial o total, del Cemento Portland Normal (CPN) por otros materiales cuyo procesamiento requiere menor energía, es una opción sumamente interesante para reducir sensiblemente esta problemática, y propiciar un ahorro energético con una menor afectación al ambiente. En los últimos años han surgido a nivel mundial distintas iniciativas para controlar la gestión de los residuos y su destino final en vertederos con el objetivo de incentivar opciones de minimización y reciclado.



En este sentido la actual preocupación nacional es establecer normas que regulen una gestión ambientalmente adecuada de los residuos, incluidos los residuos cerámicos. La presente situación genera la necesidad de analizar las opciones de destino final para los mismos, que permitan disminuir su disposición en vertederos.

Hasta la fecha se ha realizado un gran progreso con la reglamentación para la gestión ambiental de residuos sólidos industriales tras haberse aprobado el Decreto N° 182/013 en junio del 2013, pero se continúa trabajando y es de esperar, que, en un futuro, exista una legislación sobre la gestión de residuos de obras civiles (ROC) y residuos de construcción y demolición (RCD), que permita disminuir considerablemente su disposición final en los vertederos existentes.

Los ROC son considerados materiales inertes por tener un poder de contaminación relativamente bajo, pero sin embargo dichos residuos poseen un elevado impacto visual y ocupan un gran volumen. El sector está caracterizado por una alta informalidad donde no existe control sobre su disposición final, produciéndose relleno de zonas inundables o realizándose rellenos con ROC contaminados con residuos sólidos urbanos (RSU), residuos peligrosos u otros residuos, generando el riesgo de contaminar el sitio de relleno.

Tomando como referencia los datos proporcionado en la Plan Director de Residuos Sólidos de Montevideo y Área Metropolitana, en el 2003 los residuos de construcción dispuestos en vertederos eran de 443.000 ton/año, que representaba el 30 % de los residuos sólidos producidos, siendo el 87 % los correspondientes a Montevideo. Este documento estima que para el año 2025 estos residuos serán de 669.000 ton/año en el área metropolitana correspondiendo el 86 % a Montevideo. Además, agrega que la composición de estos residuos (RCD), se estima que hasta el 45 % de los mismos corresponden a materiales cerámicos (ladrillos, ticholos, tejas, etc.) [9][10].

Estos volúmenes de residuo cerámico se ven incrementados con los provenientes de la propia industria cerámica. Defectos de calidad en la producción, como pueden ser variaciones en las dimensiones o fallas relativas a una temperatura de cocción inadecuada, son descartados y enviados a disposición final pero que podrían perfectamente tener otro uso si su valorización fuera más conveniente.

Históricamente se han utilizado diferentes tipos de adiciones en morteros de tal forma de incrementar sus propiedades aglomerantes e hidráulicas. Existen grandes obras de la antigüedad donde se utilizaron diferentes adiciones, como por ejemplo cascara de arroz en el mortero utilizado en la muralla china para otorgarle mayor resistencia, o morteros puzolánicos con ceniza de Puzol en termas y acueductos romanos que permitían al mortero fraguar y endurecer bajo agua [11].

Los materiales puzolánicos son materiales silíceos o silico aluminosos que, por si solos, poseen poca o ninguna actividad aglomerante y que, cuando están finamente divididos y en presencia de

agua, reaccionan con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades aglomerantes.

Las adiciones puzolánicas tienen la capacidad de reaccionar con el hidróxido de calcio, producido por la hidratación del cemento, formando compuestos estables con poder cementante [10].

En la actualidad, diversos grupos de investigaciones estudian la utilización de diferentes residuos industriales para su incorporación como adición puzolánica, como, por ejemplo, la ceniza volante proveniente de industrias termoeléctricas, la ceniza de cáscara de arroz y otros, cuya composición química favorece la actividad puzolánica.

En general, los residuos cerámicos, se componen de materiales silíceos, que en presencia de estos en estado amorfo contribuyen a la formación de compuestos hidratados, mejorando el rendimiento de morteros y hormigones.

En la presente investigación se trabajó con cuatro muestras de cerámicos fabricados mediante distintos procedimientos de producción (industrial y artesanal) para su caracterización y posterior análisis.

Teniendo en cuenta los planteamientos realizados por diversos autores, así como el hecho de que el consumo de cemento va a continuar aumentando, este trabajo se encuadra perfectamente dentro de las alternativas propuestas, y busca estudiar la viabilidad de utilización de residuos cerámicos rojos nacionales como adición mineral activa en la producción de matrices de cemento Portland.

## 2 | ANTECEDENTES

En el presente Capítulo se documenta un resumen del estado del arte sobre los principales temas abordados a lo largo de la Tesis: en primer lugar, contextualización del estudio y a continuación, el uso de adiciones puzolánicas en conglomerantes a base de cemento Portland y el uso de residuos cerámicos como puzolana en morteros cementicios.

### 2.1. Contextualización del estudio.

#### 2.1.1. Cemento

El proceso de fabricación del cemento es un proceso complejo que requiere grandes cantidades de energía para la transformación de la materia prima al cemento Portland y durante el mismo se generan gases contaminantes que son emitidos directamente a la atmosfera [12].

Para la producción de cemento se extrae la materia prima, principalmente piedra caliza, carbonato de magnesio, sílice, alúmina y óxido de hierro de canteras o minas. Se extraen aproximadamente 1,7 ton por cada tonelada de Clinker a producir [13].

Luego la materia prima es molida y mezclada hasta que la granulometría del polvo sea 50  $\mu\text{m}$ . Luego de obtener la finura necesaria y la composición requerida, el polvo es precalentado en un horno a 550 °C donde la piedra caliza y carbonato de magnesio se descompone en  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgO}$  y  $\text{CO}_2$ . El proceso de precalentado continua hasta llegar a 950 °C. A continuación, en un proceso de calcinación dentro del horno, ocurren múltiples reacciones físicas y químicas [14].

En el rango de los 900 °C y 1250 °C, se forma uno de los componentes del cemento ( $\text{C}_2\text{S}$ ). Entre 1200 °C y 1280 °C los restantes componentes se producen ( $\text{C}_3\text{S}$ ,  $\text{C}_3\text{A}$  y  $\text{C}_4\text{AF}$ ). Finalmente, superados los 1280 °C el Clinker solido es fundido, formando una mezcla homogénea, tomando forma de Clinker nodular [15].

Se continúa elevando la temperatura del horno hasta que alcanza los 1450 °C y se refrigera a 100 °C dejándose enfriar a temperatura ambiente para posteriormente un molido final hasta llegar a un tamaño de partícula aproximado a los 20  $\mu\text{m}$  donde es mezclado con un regulador de fraguado para controlar y regular la hidratación del cemento [12].

Como se expresó anteriormente en la producción del cemento, por cada tonelada de cemento producido se emiten a la atmosfera aproximadamente 950 kg de  $\text{CO}_2$  [8]. Es por ello que los aspectos medioambientales involucrados en la producción de cemento son de creciente importancia. Por ello, la sustitución, parcial o total, del Clinker del cemento por otros materiales, que su procesamiento requiere poca energía, es una opción sumamente interesante para reducir

sensiblemente esta problemática, y propiciar un ahorro energético con una menor afectación al ambiente.

Adicionalmente a los beneficios ambientales del uso de adiciones minerales al cemento Portland para la producción de morteros y/u hormigones, se encuentra el impacto positivo en reducción de problemas de durabilidad de estos materiales. Su utilización favorece la disminución de porosidad, por lo cual los ataques por parte de agentes físicos y químicos se ven detenidos otorgando una mayor vida útil a las estructuras [16].

Esta reducción de porosidad se debe principalmente a dos factores. En primer lugar, el tamaño de las partículas de las adiciones es menores a 45  $\mu\text{m}$ , formando una mezcla más compacta [17]. En segundo lugar, es la capacidad de las puzolanas en reaccionar con el hidróxido de calcio, generando productos de hidratación relacionados al endurecimiento de la pasta de cemento, es decir, el desarrollo de resistencia que sigue a la solidificación, dando lugar silicatos hidratados de calcio formando un gel rígido que se indica como S-C-H. Ambas acciones en conjunto han permitido mejorar el desempeño de morteros y hormigones [18][19].

### **2.1.2. Ladrillo cerámico.**

20

El ladrillo es uno de los materiales de construcción más antiguos del mundo y su historia se remonta a los orígenes de la civilización. Los primeros registros del uso de ladrillo de barro o adobe datan de los años 10000 y 8000 a.C [11].

El ladrillo ha acompañado al desarrollo de la civilización y cada una fue perfeccionando la técnica y el uso del ladrillo. Durante generaciones hasta nuestros días, los avances tecnológicos permitieron lograr una economía de escala, reduciendo costos y convirtiendo al ladrillo en el material de construcción más democrático de la sociedad que cruza todos los espectros sociales y abarca construcciones programáticas de todos los estilos.

La forma de producción del ladrillo afecta su color, forma, textura, dureza, resistencia al fuego, así como la resistencia a los agentes atmosféricos y al paso del tiempo.

Hoy en día, la producción de ladrillos cocidos ha alcanzado un alto grado de mecanización y automatización en muchos países, pero los métodos tradicionales de producción a pequeña escala están todavía muy extendidos en la mayoría de los países en desarrollo. El proceso de producción comprende varias etapas que se describen a continuación, al mismo tiempo resaltaremos las diferencias entre los distintos tipos de tecnificación en las formas de producir.

En una primera instancia se realiza la extracción de la materia prima, extrayéndose de una cantera a cielo abierto y se deposita en un terreno nivelado para luego limpiarla de las impurezas, como material vegetal, piedras y guijarros que no es apta para la producción ladrillera. Químicamente la arcilla está compuesta de sílice ( $\text{SiO}_2$ ), alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ) [20].

La arcilla permanece a la intemperie por unos quince días, siendo sometida a la meteorización que es responsable de limpieza de la mezcla de tierra de sales e impurezas. También puede ser sometida a un proceso de putrefacción donde la arcilla es colocada en un sitio con poca luz y sin circulación de aire a una humedad constante, que por medio de la fermentación se genera un gel aglomerante entre partículas que le otorga mayor plasticidad a la mezcla.

Luego se procede a la preparación y dosificación de la pasta en la cual se mezcla la arcilla, el agua y desengrasantes de tal manera que forme una pasta homogénea, sin impurezas y finamente dividida para que no haya fragmentos de grandes tamaños. En caso de la producción artesanal se utiliza un pisadero con desengrasantes (paja o cuero) y un 40 % de agua donde se amasa la pasta durante 3 horas y un día antes del moldeado. Mientras que en procesos industriales se trabaja con un molino de rulos que tritura, tamiza, mezcla y amasa con un 20 % de agua.

Para el moldeado de los ladrillos existen dos alternativas principales dependiendo de la calidad que se desea obtener y tipo de proceso industrial o artesanal.

21

**Moldeado a mano:** Es una técnica rudimentaria y arcaica donde se utiliza un molde de madera llamado gradilla que tiene capacidad de producir 2 ladrillos por vez. El molde se rellena con adobe y se retira, formando ladrillos crudos asentados en el suelo. Esta técnica le confiere a la superficie del ladrillo una terminación rugosa.

**Moldeado a máquina:** La mezcla arcillosa es sometida a un tratamiento de vacío constante, donde se comprime la pasta y se quita el aire contenido dentro de la misma, obteniéndose una mezcla homogénea de humedad uniforme y con una superficie lisa. El tratamiento de vacío reduce la cantidad de agua de la pasta evitándose la formación de burbujas y poros y debido a la unión íntima de las partículas le confiere a la pasta una plasticidad suplementaria. La máquina extruye la pasta a través del molde formando el ladrillo requerido. Las pastas resultantes son menos porosas, más impermeables y con texturas más uniformes y compactas. Con respecto a las pastas comunes, la resistencia a la compresión es un 10 % superior.

Posteriormente al modelo se realiza el proceso de secado, el cual consiste en aplicar energía térmica a la pieza para liberar el agua retenida y lograr que salga a la superficie para que se evapore.

Durante la eliminación del agua, se produce la contracción del volumen del ladrillo que va a ser proporcional al agua eliminada, generándose huecos intersticiales. El agua superficial se evapora, produciéndose una aproximación de las moléculas y con ello una diferencia de presión en la pieza con respecto a su núcleo. La diferencia de presiones hace que el agua fluya desde el interior hasta la superficie del ladrillo.

Una vez que el secado se haya completado se procede a la cocción de la arcilla, siendo una etapa fundamental donde el ladrillo obtiene sus principales propiedades debido a la vitrificación del material, reduciendo su permeabilidad y aumentando la resistencia.

El tratamiento térmico está dividido en varias etapas con un aumento constante de la temperatura. Primeramente, se hace un secado final, evaporando la humedad residual que puede haber quedado a una temperatura de 204 °C, luego corresponde la etapa de deshidratación a partir de los 204 °C hasta los 982 °C donde los minerales de la arcilla se rompen y se libera el agua de los compuestos químicos, posteriormente la etapa de la oxidación que queda comprendida entre los 538 °C a 982 °C, en el cual se forman los óxidos y finalmente la etapa de vitrificación que se produce a partir de los 871 °C hasta los 1316 °C donde los ladrillos finalmente toman su color característico [21].

Por último, después que la temperatura llega a su pico y se mantiene según el tiempo prescripto, empieza el proceso de enfriado.

22

En el caso de la producción artesanal, se utiliza un horno llamado "hormiguero" que se confecciona con el mismo material a cocer. A continuación, se enciende por las distintas bocas y se deja que el fuego avance a través del "hormiguero", primero una etapa de calentamiento durante unas 4 horas, tiempo en el cual se evapora el vapor de agua del ladrillo, luego se incrementa la temperatura hasta alcanzar los 850 °C y varía hasta unos 1000 °C, manteniendo el nivel calórico durante 6 a 24 horas como según las condiciones del horno, cantidad de bocas, cantidad de combustible, tipo de arcilla y tamaño del horno. En general es método que consume mucha energía por la combustión de la leña y el carbón.

Una vez frío, se retiran los ladrillos progresivamente, desmontándose el conjunto. La cocción es variable en cada uno de acuerdo con su posición en el "hormiguero" y por tanto las propiedades de los ladrillos cocidos son variables. Se obtienen ladrillos con resultados diversos, donde aquellos que fueron posicionados exteriormente quedan crudos y claros, los que fueron posicionados en el centro resultan frágiles, violetas y los posicionados en el medio resultan ser los más homogéneos y de mejor calidad con tonos rojos [22].

La variabilidad entre los productos cerámicos cocidos por métodos artesanales e industriales son significativas. Mientras que en el proceso industrial la cocción se realiza en un ambiente

controlado, de manera uniforme, con poca variabilidad y a temperaturas entre los 1100 °C – 1300 °C, obteniendo un producto homogéneo y uniforme según las especificaciones requeridas, los productos cerámicos cocidos de forma artesanal son diversos ya que el proceso de cocción es realizado a temperaturas 850°C – 1000 °C, con una alta variabilidad según el combustible utilizado, la posición del cerámico relativo al fuego, horas de cocción, tipo de arcilla y humedad relativa del ambiente así como otros factores, resultando productos de calidades y resistencias heterogéneas.

En los países que se ha investigado sobre la temática, no se ha abordado el estudio de las propiedades puzolánicas de los cerámicos de producción artesanal, por lo que no se han encontrado antecedentes que muestren como la diferencia de temperatura de cocción mencionada afecta a las propiedades puzolánicas del residuo resultante. Por este motivo, en nuestro medio, resulta fundamental analizar el comportamiento de estos residuos con la variedad de composición y grados de cocción que los caracteriza.

Asimismo, partiendo de la base que los cerámicos están elaborados con arcillas procedentes del lugar de fabricación, y que las características de estas varían en el territorio, incluso dentro del mismo país, es que los datos extraídos de los antecedentes solo sirven de referencia y es necesario determinar si los materiales disponibles en Uruguay presentan características puzolánicas que permitan su utilización como adición mineral.

### **2.1.3. Gestión de los Residuos de Obra Civiles**

Actualmente en los Sitios de Disposición Final se clasifican los ROC según los siguientes criterios establecidos en el Plan Director:

- ROC sucio: si es contaminado con RSU u otros residuos.
- ROC limpio: si no es contaminado con RSU u otros residuos, pero contiene metales incorporados en la estructura, como por ejemplo armadura.
- ROC inerte: compuestos de materiales inertes que no experimentan transformaciones físicas, químicas o biológicas y de los cuales la eco toxicidad del residuo y su lixiviabilidad son insignificantes (ladrillos, cerámicos etc.)

El 35% de los RCD que se generan en el área Metropolitana de Montevideo se dispone de manera formal. Montevideo, representa el 85 % del total de RCD según los registros del Sitio de Disposición Final Felipe Cardoso. De las 23.000 ton/año de RCD que se disponen en Felipe Cardoso, solo el 17 % son RCD inertes limpios que se aprovechan para relleno de caminería interna, como a su vez relleno de terrenos y para recuperar pasivos ambientales. El 83 % de los RCD restantes, no están clasificados y contienen Residuos Sólidos Urbanos (RSU), cuales son dispuestos junto a ellos [10].

La posibilidad de reciclaje de la mayor parte de los ROC y la necesidad de reducir el volumen de residuos a disponer hacen que las prácticas de valorización de los ROC sean relevantes por los

impactos positivos referidos a la reducción de la contaminación y a la revalorización de los residuos en nuevas aplicaciones y usos.

## 2.2. Adiciones puzolánicas

Según la norma UNIT 1047:1999 [2] define a los materiales Puzolánicos como *“materiales silicosos o sílico aluminosos que, por si solos, poseen poca o ninguna actividad aglomerante y que, cuando están finamente divididos y en presencia de agua, reaccionan con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades aglomerantes”*. Adicionalmente la norma realiza una clasificación de las diferentes puzolanas según su origen, produciéndose una primera subdivisión entre naturales y artificiales.

Las puzolanas naturales son aquellas de origen volcánico, generalmente de carácter petrográfico ácido (> 65 % de SiO<sub>2</sub>) o de origen sedimentario con actividad puzolánica, con composición química y mineralógica adecuadas.

Por otra parte, las puzolanas artificiales son aquellos materiales provenientes del tratamiento térmico o subproductos industriales con actividad puzolánica. Dentro de estas se encuentran las arcillas calcinadas que son materiales provenientes de la calcinación de ciertas arcillas sometidas a temperaturas entre 500 °C y 900 °C, de modo de garantizar su reactividad con el hidróxido de calcio. Dentro de este grupo encontramos las cenizas volantes que son residuos finamente divididos que resultan de la combustión de carbón mineral pulverizado o granulado con actividad puzolánica. Y por último aquellos materiales no tradicionales, como escorias siderúrgicas ácidas, cenizas de residuos vegetales o residuos de carbón vegetal [2].

24

Se especifica que las puzolanas deben estar compuestas principalmente por SiO<sub>2</sub> y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> reactivos; así como pequeñas cantidades de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y otros óxidos.

La utilización de adiciones minerales en la preparación de morteros y hormigones no es una tecnología reciente, remontándose a la antigüedad la aplicación de este tipo de materiales.

Estudios indican que fueron los romanos, los primeros que agregaban adiciones minerales a los morteros de cal con el fin de dotarlos de propiedades hidráulicas. Como menciona James Campbell en Ladrillo. Historia Universal, *“La puzolana es una piedra volcánica muy desmenuzada que, al añadirla al mortero de cal, reacciona hidráulicamente, obteniéndose un mortero que acelera el proceso de secado e incluso se seca dentro del agua, hecho que lo convierte en muy útil para la construcción de puentes, puertos y acueductos”* [11].

La ceniza volcánica descubierta por los romanos en la región de Puzol, tenía esta propiedad y de ahí el nombre de puzolana. Desde entonces, se ha aplicado como aditivo a los morteros de cal, como también se utiliza el polvo de ladrillo, que tiene el mismo efecto puzolánico [11].



Históricamente, el uso de puzolanas se limitó a la zona de Italia y Grecia, donde existen considerables reservas de puzolanas naturales. En otros países el interés por este tipo de materiales es relativamente reciente y ha aumentado, por la necesidad de reutilizar residuos industriales como son la ceniza volante o el humo de sílice [23]. En cualquier caso, dichos materiales mejoran tanto las propiedades mecánicas como la durabilidad frente a agentes agresivos [24] [25].

La utilización de adiciones minerales en la producción de morteros y hormigones implican numerosos beneficios como, por ejemplo, en el ámbito de lo económico, las adiciones minerales pueden reemplazar parcialmente al cemento portland, de modo que la sustitución permite una reducción sustancial en el precio final del producto sin alterar las propiedades finales del mortero u hormigón.

Entre los efectos físicos y químicos producidos por la adición mineral en conglomerantes cementicios se destacan el aumento de la resistencia mecánica, el incremento de la durabilidad frente a ataques químicos, como también pueden ser utilizados para disminuir el calor de hidratación [26] [27].

A su vez, una gran cantidad de adiciones minerales son generadas como residuos industriales de otros sectores productivos. Su incorporación contribuye tanto al ahorro de materia prima, de energía generada por parte de los combustibles fósiles para la producción de cemento, con la consiguiente reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> y a la disposición final de estos materiales inertes en vertederos.

La necesidad de ahorrar energía para reducir costos en la producción de conglomerantes minerales, y la preservación del medio ambiente, ha llevado a los investigadores a estudiar una manera de reutilizar subproductos industriales: escoria de alto horno granulada, cenizas volantes, microsílíce, ceniza de cáscara de arroz, entre otros [28].

En general, estos subproductos se componen de materiales silíceos o silico aluminosos, que, contribuyen a la formación de compuestos hidratados, mejorando el rendimiento de morteros y hormigones. Estas propiedades cementantes y puzolánicas de los subproductos son explotados mediante la incorporación de ellos como adiciones al cemento Portland, tanto en su producción como en el momento de elaboración de morteros y hormigones.

Las adiciones puzolánicas tienen la capacidad de reaccionar con el hidróxido de calcio, formando compuestos estables con poder cementante, tales como silicatos y aluminatos cálcicos hidratados. Por lo tanto, el hidróxido de calcio liberado por la hidratación del silicato reacciona con la puzolana utilizada como una sustitución parcial del cemento, lo que resulta en una producción extra de

silicatos de calcio hidratados, que son los productos similares a los formados en la hidratación del cemento [29].

Según la naturaleza de las puzolanas y la calidad de estas en cuanto a sus fases activas, podemos determinar los factores que inciden directamente en la actividad puzolánica. Uno es la cantidad de cal combinada con la puzolana y otro es la velocidad en la que se consume dicha cal [23].

Se considera que la cantidad de cal fijada depende de:

- la naturaleza de las fases activas
- el contenido en puzolana
- el contenido de  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$  amorfo
- la relación cal/puzolana de la mezcla
- edad de curado.

A su vez, la velocidad de combinación depende de:

- la superficie específica de la puzolana
- la relación agua/ cemento
- temperatura

26

Señala Mehta y Monteiro, *"Ingeniería, Economía, Energía, Ecología, el aumento de la incorporación de subproductos industriales que tienen características puzolánicas se convierte en crucial. Por lo tanto, hay una necesidad de desarrollar metodologías comunes menos prescriptivas y principalmente en metodologías de ensayos que evalúen el rendimiento real de puzolana cuando se añade al hormigón y mortero"* [30].

### **2.3 Antecedentes en la utilización de residuos cerámicos como material puzolánico**

La generación de residuos de la construcción (RCD), tanto sea de la construcción y demolición como los provenientes del rechazo de materiales defectuosos, y la preocupación que lleva el destino final de los mismos, ha producido la necesidad de buscar soluciones prácticas para su reciclaje y reutilización, principalmente en la misma industria de la construcción como insumo para la fabricación de nuevos materiales.

Considerando solamente la fracción cerámica que compone estos residuos los antecedentes sobre sus posibles empleos están orientados a la aplicación como áridos en morteros y hormigones, como adición puzolánica en matrices cementicias, y más recientemente como sustituto total del cemento a través de su activación alcalina.

Respecto al campo de la Ingeniería Civil varios son los grupos de investigación a nivel mundial que realizan estudios sobre el uso de estos residuos como adición puzolánica. A continuación, se detalla a grandes rasgos las líneas de investigación principales que desarrollan dichos grupos.

**Año:** 1990

**Título del Artículo:** "Pozzolanic activity of calcined moler clay"

**Autores:** S. Johansson, P. J. Andersen

**Revista:** Cement and Concrete Research

En el artículo el grupo de investigación realiza una caracterización las propiedades de la arcilla molida calcinada a 900 °C proveniente de residuos de la producción ladrillera bajo los parámetros de la norma ASTM C 618. Los resultados demuestran que la composición química, la fineza de las partículas, la actividad puzolánica y la reactividad con los álcalis del cemento fueron acorde a la norma. Concluyeron que la arcilla calcinada molida utilizada en este trabajo, tiene propiedades comparables a la micro sílice y es una excelente puzolana para ser adicionada a la producción de cemento [31].

**Año:** 2000

**Título del Artículo:** "The use of waste ceramic tile in the cement production"

**Autores:** N. Ay, M. Unal

**Revista:** Cement and Concrete Research

El artículo estudia la utilización de tejas cerámicas molidas como puzolana. Se adiciona al cemento un 25 %, 30 %, 35 % y 40 % de su peso, polvo finamente molido de teja cerámica. Realizaron una caracterización según la norma ASTM C 618 y estudiaron la resistencia a compresión en las edades de 1, 2, 7 y 28 días de las probetas con las adiciones mencionadas.

Los estudios concluyen, que el residuo de teja molida utilizada tiene propiedades puzolánicas y de acuerdo a los resultados de resistencia mecánica, era posible sustituir hasta un 35 % del peso del cemento con residuos cerámicos finamente divididos antes que la resistencia a los 28 días falle [32].

**Año:** 2001

**Título del Artículo:** "Viabilidad de utilización de materiales de desecho procedentes de productos cerámicos en prefabricados de hormigón"

**Autores:** M.I. Sánchez de Rojas, F.P. Marín, M. Frías, J. Rivera

**Revista:** Materiales de construcción – CSIC

Sánchez de Rojas et al plantean investigaciones sobre la actividad puzolánica de materiales de desecho procedentes de arcilla cocida y posteriormente el estudio de la viabilidad de la utilización de residuos cerámicos en prefabricados de hormigón.

Estudiaron tres productos procedentes de diferentes materiales cerámicos calcinados a distintas temperaturas. Producto A, material cerámico a temperatura de cocción adecuada. Producto B, material cocido a temperatura superior y por último Producto C, cocinado a una temperatura inferior. A través del ensayo de Fluorescencia de Rayos X (FRX), determinaron que los materiales presentan un fuerte carácter ácido, con predominio de sílice, alúmina y óxido de hierro.

Realizaron dos dosificaciones utilizando el residuo cerámico, en primer lugar, como árido, sustituyendo un 20 % de la arena y, en segundo lugar, como puzolana incorporando en 15 % en sustitución de cemento. Realizaron un mortero de referencia con 100 % de cemento y luego una serie de morteros utilizando los productos A, B y C con sustituciones del 15 %.

Con respecto a las resistencias mecánicas de los morteros, resistencia a flexión, no encontraron diferencias significativas a las 24 horas, sin embargo, a los 28 días, en todos los casos obtuvieron valores ligeramente inferiores. En las resistencias a compresión tampoco se encontraron diferencias importantes. Así, a los 28 días observaron que se experimenta un 8,6 % de aumento en el caso del producto B y una disminución de 2,6 % con el producto A. Para el resto de los morteros con un 15 % de sustitución, las resistencias disminuyeron ligeramente, pero los porcentajes de disminución (6 % y 8 %) fueron inferiores al grado de sustitución, lo que mostró que los materiales de desecho actuaron como puzolanas, aportando resistencia.

En cuanto a la porosidad, los materiales de desecho no provocaron un aumento significativo de la porosidad total. Sin embargo, estos ligeros aumentos de porosidad no afectaron la densidad aparente ni al diámetro medio de poro.

El estudio concluye que los desechos industriales pueden ser utilizados en la elaboración de prefabricados de hormigón, ya sea como árido, o como adición activa en sustitución del cemento. Los ensayos mostraron que los morteros con productos cerámicos presentaban resistencias mecánicas y porosidades semejantes al mortero de referencia [25].

**Año:** 2006

**Título del Artículo:** "Strength and chemical resistance of mortars containing brick manufacturing clays subjected to different treatments"

**Autores:** M. O' Farrel, B.B. Sabir, S. Wild

**Revista:** Cement and Concrete Composites

O' Farrell et al presentan los resultados de su investigación sobre las propiedades de los morteros utilizando sustituciones parciales de arcilla calcinada como puzolana en remplazo del cemento Portland. Prepararon morteros sustituyendo en peso de cemento por un 10 %, 20 % y 30 % de puzolana cerámica, realizando ensayos de resistencias durante 90 días de curado. La dosificación utilizada para todos los morteros fue de 1:3:0,5 (cemento, arena, agua).

El trabajo demuestra que, a los 90 días, las resistencias de los morteros con puzolana cerámica son iguales o mayores al mortero de referencia para aquellos morteros que sustituían hasta el 20 %. También demuestran que las arcillas con tratamientos térmicos son efectivas en reducir la expansión de los morteros que son sometidos a la exposición de agua de mar y a soluciones de sulfato de sodio.

A modo de conclusión, establecen que la resistencia mecánica decrece a medida que el porcentaje de sustitución por puzolana aumenta, determinando un porcentaje de sustitución máximo de un 20 % por puzolana cerámica [33].

**Año:** 2007

**Título del Artículo:** "Utilização do resíduo da indústria cerâmica para produção de concretos"

**Autores:** J. Pereira Goncalves

**Revista:** Engenharia Civil

29

El artículo muestra los resultados del estudio de la viabilidad técnica de la sustitución de cemento por un 20 % de residuo cerámico. El autor estudió el comportamiento tensión versus deformación, la resistencia a la compresión, resistencia a tracción por flexión y por compresión diametral a los 28 días de edad.

Concluye, que una sustitución del 20 % de cemento por residuo cerámico, promueve una reducción del módulo de elasticidad de los hormigones. A su vez, la presencia de residuos cerámicos no influenció significativamente en la resistencia a compresión, flexión, tracción ni compresión diametral independientemente de la relación agua/cemento. Los resultados avalan la presentación de una alternativa para la producción de cemento con la incorporación de residuos de la industria cerámica y con beneficios ambientales [34].

**Año:** 2007

**Título del Artículo:** "Potential for use of crushed waste calcined-clay brick as a supplementary cementitious material in Brazil"

**Autores:** R. D. Toledo Filho, J.P. Goncalves, B.B. Americano, E.M.R. Fairbairn

**Revista:** Cement and Concrete Research

El artículo estudia la potencialidad del uso de residuos de la industria cerámica como sustituto del cemento. Estudiaron morteros con sustituciones del 10 %, 20 %, 30 % y 40 % del cemento. Ensayos de resistencias mecánicas, caracterización de poros y test de durabilidad fueron realizados a las diferentes probetas.

Realizaron morteros con dosificaciones 1:1,5: 0,4 / 0,5 (cemento-arena-agua) para los diferentes porcentajes de sustituciones. El estudio concluye que, la adición de residuos cerámicos no tuvo influencia en la resistencia a la compresión ni en el módulo elástico para morteros hasta un 20 %. Para aquellos mayores, con 30 % y 40 % de sustitución, las resistencias y módulos de elasticidad fueron menores al mortero de referencia. Este comportamiento se vio incrementado en aquellos que tenían mayor relación agua/cemento.

A su vez, la adición de puzolana cerámica redujo la capacidad de absorción de agua de las mezclas. Este efecto lo atribuyen a una disminución del tamaño del poro en la microestructura de los morteros al igual que la disminución de la penetración de iones de cloruro en aquellos morteros expuestos 200 días en una solución al 5 % de sulfato de magnesio.

Por último, estiman una reducción del 10 % de las emisiones de CO<sub>2</sub> en Brasil a partir de la incorporación de residuos cerámicos como sustituto de cemento y promueven la posibilidad de generar créditos a través del Mecanismo de Desarrollo Limpio, establecido en el protocolo de Kioto. Además de la reducción de emisiones, el uso de puzolanas cerámicas tendría un beneficio ambiental por el hecho del reciclaje de un producto de desecho de la industria que de otra manera sería descartado en vertederos [16].

**Año:** 2008

**Título del Artículo:** "Aprovechamiento del cascote cerámico como material puzolánico"

**Autores:** M.I. Sánchez de Rojas, F.P. Marín, M. Frías, J. Rivera

**Revista:** Cemento Hormigón

Sánchez de Rojas et al investigan la posibilidad del aprovechamiento del cascote cerámico como material puzolánico utilizado como materia prima en la fabricación de tejas de hormigón, como sustituto de cemento o formando parte de los áridos incorporados.

Estos estudios confirmaron que las adiciones confieren a los cementos características positivas ya que contribuyen a la resistencia mecánica en el mediano y largo plazo, aumentando la resistencia química frente a medios agresivos. Cabe destacar, que si bien a los 28 días, obtuvieron valores de resistencia ligeramente inferiores al mortero de referencia, en todos los casos el porcentaje de disminución fue inferior al grado de sustitución de cemento [27].

**Año:** 2009

**Título del Artículo:** "Reusing ceramic waste in concrete"

**Autores:** F. Pacheco-Torgal, S. Jalali

**Revista:** Construction and Building materials

En este artículo, se estudió la posibilidad de utilizar residuo cerámico como sustitución de cemento Portland y como agregado natural en sustitución de arena para la realización de morteros. Realizaron probetas para ambos casos y estudiaron su resistencia mecánica y performance en durabilidad.

Los resultados demuestran que, utilizando polvo de cerámica como sustituto parcial de Clinker de cemento, a pesar de una leve disminución en la resistencia a la compresión a los 28 días, los morteros obtuvieron un incremento en la durabilidad debido a las propiedades puzolánicas. A su vez utilizando arena cerámica, no se obtuvieron disminuciones de resistencias y se alcanzó una durabilidad superior en los diferentes morteros [35].

**Año:** 2009

**Título del Artículo:** "Use of waste brick as a partial replacement of cement in mortar"

**Autores:** A. Naceri, M. C. Hamina

**Revista:** Waste Management

31

Naceri et al publican sobre el uso de residuos cerámicos como sustitución parcial del Clinker del cemento en diferentes proporciones (0 %, 5 %, 10 %, 15 % y 20 %) en la producción de morteros cementicios, estudiando su resistencia mecánica a los 7, 28 y 90 días, así como su microestructura mediante microscopia electrónica de barrido (SEM).

En la investigación realizaron cinco tipos de morteros utilizando en sustitución del Clinker de cemento las proporciones anteriormente mencionadas en una dosificación de 1:3:0,5 (cemento, arena, agua).

El artículo concluye que el comportamiento mecánico a los 90 días fue igual en los morteros con puzolana comparado con los morteros de referencia y a su vez, desatacan la formación de cristales de Portlandita en los vacíos de la microestructura del mortero con puzolanas. Confirman que el residuo cerámico se puede utilizar parcialmente (hasta un 10 %) para la sustitución de cemento en morteros [36].

**Año:** 2011

**Título del Artículo:** "Empleo de residuos cerámicos como materia prima alternativa en la fabricación de cemento portland"

**Autores:** I. Garcia-Diaz, F. Puertas Maroto

**Revista:** Consejo Superior de Investigaciones Científicas

La fabricación de cemento Portland se inicia con la preparación de un crudo a partir de unas materias primas determinadas (calizas y margas o arcillas), que en sus dosificaciones adecuadas constituyen el crudo de cemento.

F. Puertas et al publicaron estudios confirmando la viabilidad técnica en la utilización de residuos cerámicos como materia prima para la fabricación de cemento Portland.

El objetivo de su investigación fue estudiar la influencia del tamaño de partícula de los residuos cerámicos sobre la reactividad y la aptitud a la cocción de crudos aptos para la obtención del Clinker de cemento.

Para la preparación de los crudos utilizaron tres tipos de residuos cerámicos: baldosas con arcillas de cocción rojas, baldosas con arcilla de cocción blanca y baldosas con arcillas rojas y blancas, sin gestión de residuos. Para cada uno, prepararon tres fracciones granulométricas diferentes: una fracción donde todas las partículas fueron inferiores a 45  $\mu\text{m}$ , otra donde las partículas tenían un tamaño comprendido entre los 45  $\mu\text{m}$  y 90  $\mu\text{m}$  y por último una fracción donde las partículas tenían un tamaño superior a los 90  $\mu\text{m}$ .

32

El estudio, concluye que la reactividad de los crudos que contenían los residuos cerámicos con un tamaño de partícula menor a 90  $\mu\text{m}$ , es buena. La composición y distribución de los minerales en los clinkers obtenidos a partir de esos residuos son comparables a la de un Clinker fabricado a partir de materias primas convencionales. También concluyeron que la cocción de los crudos con residuos cerámicos disminuyen la emisión de  $\text{CO}_2$  en el entorno del 2,3 % al 4 % [37].

**Año:** 2014

**Título del Artículo:** “Efeito do pó resíduo cerâmico como adição ativa para o concreto”

**Autores:** A. T. Costa Sales, R. dos Santos Alferes Filho

**Revista:** Ambiente Construído

Teresa Costa et al presenta en su estudio los resultados de la sustitución parcial de cemento con polvo de residuo cerámico para la producción de hormigones. Produjeron morteros con una sustitución del 10 %, 20 % y 40 % y realizaron ensayos de resistencia mecánica.

La actividad puzolánica la determinaron por el cálculo del cociente entre la resistencia media de los morteros con puzolana sobre la resistencia de los morteros de referencia, obteniendo un resultado de 76,9 %, superior al mínimo del 75 % que se establece para considerar la reacción puzolánica. El estudio destaca que hasta un 20 % de sustitución no obtuvieron diferencias significativas en la resistencia de compresión con respecto al mortero de control.



A su vez, observan que no hay grandes variaciones en la porosidad y el índice de vacíos se mantuvo constante en las diferentes proporciones de los morteros realizados. Estos resultados los lleva a suponer que la adición de puzolana en morteros no generaría problemas en la durabilidad de las estructuras causado por sustancias agresivas presentes en el ambiente. A pesar de ello, la adición puzolánica produjo a una reducción de la alcalinidad del hormigón pudiendo resultar en una menor protección química contra la corrosión en las armaduras [38].

**Año:** 2017

**Título del Artículo:** "High performance concrete incorporating ceramic waste powder as large partial replacement of Portland cement"

**Autores:** Dima M. Kannan, Sherif H. Aboubakr, Amr S. EL-Dieb, Mahmoud M. Reda Taha

**Revista:** Construction and Building materials

Kannan et al, publican los resultados de su estudio, donde sustituyen en hormigones de alta resistencia, un 10 % y un 40 % de su peso por polvo cerámico, proveniente de residuos de la industria cerámica.

A través de diferentes análisis micro estructurales, mecánicos y de durabilidad, concluyen que los hormigones con una sustitución del 20 % y del 40 % por residuo cerámico, en edades tempranas tienen una resistencia mecánica menor, pero ya en edades más avanzadas los hormigones, desarrollan una resistencia comparable al hormigón de referencia.

Sin embargo, la durabilidad de aquellos hormigones con alto porcentaje de sustitución, es mayor a aquellos que no tenían. Verificándose una reducción en la permeabilidad del hormigón a iones de cloruro.

A niveles micro estructurales, no encontraron diferencias significativas entre los hormigones con polvo cerámico y aquellos que no contenían. Por último, destacan los efectos del residuo cerámico, por un lado, como efecto de filler en la masa del hormigón, creándose estructuras densas que favorecen la performance del hormigón. Y por otro, el efecto puzolánico que se pronuncia en edades avanzadas en comparación con los hormigones de edades más tempranas [39].

### **3 | OBJETIVOS**

#### **3.1. Objetivo General**

El objetivo general de esta investigación es analizar la viabilidad de utilizar residuos cerámicos, existentes en nuestro medio, como adición puzolánica en matrices a base de cemento Portland.

#### **3.2. Objetivos Específicos**

Para alcanzar este objetivo general se plantean los siguientes objetivos específicos a cumplir:

- Seleccionar dos tipos de cerámicos rojos de diferente procedencia (artesanal e industrial).
- Optimizar el tamaño de partículas de los cerámicos para su empleo como adición.
- Acondicionar los cerámicos seleccionados sometiéndolos a la optimización desarrollada en este proyecto.
- Determinar la reactividad de los cerámicos seleccionados mediante la realización de ensayos fisicoquímicos.
- Estudiar estadísticamente los resultados alcanzados y valorar su empleo como adición al cemento Portland.

## 4 | METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En este Capítulo se procede a detallar la metodología empleada para el desarrollo del trabajo experimental. En primer lugar, se presentarán los materiales utilizados a lo largo del trabajo. A continuación, la descripción de los equipos utilizados y por último los procedimientos realizados en la investigación.

### 4.1. Materiales

#### 4.1.1. Material Cerámico

El material cerámico fue elegido según su procedencia y proceso de elaboración. Se seleccionaron tres tipos de cerámicos de producción artesanal y dos tipos de producción industrial disponibles en el mercado nacional.

**Tipo A:** Ticholo industrial de 10 bocas. Dimensiones (10 x 25 x 25) cm. Imagen 4.1.1.1.

**Tipo B:** Ladrillo industrial de prensa. Dimensiones (5,5 x 12 x 25) cm. Imagen 4.1.1.1.

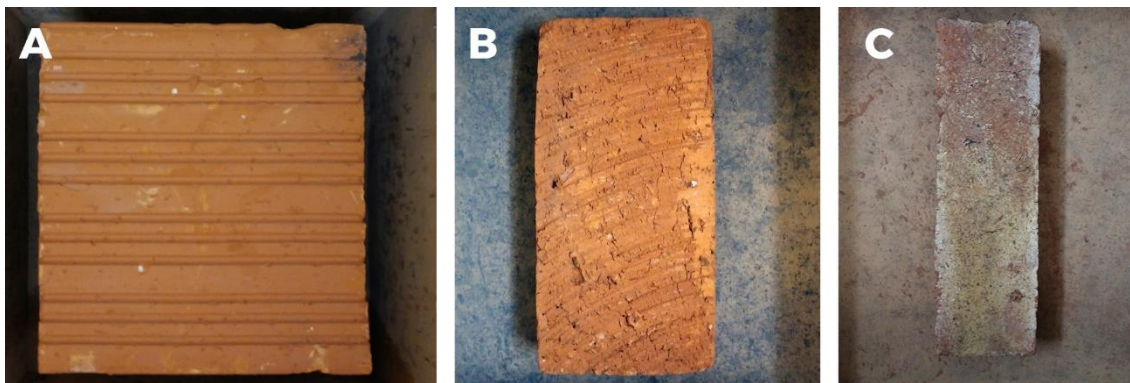
**Tipo C:** Ladrillo artesanal tipo “chorizo”. Dimensiones (5 x 5 x 24) cm. Imagen 4.1.1.1.

**Tipo D:** Ladrillo artesanal estándar. Dimensiones (5 X 11 X 24) cm. Imagen 4.1.1.2.

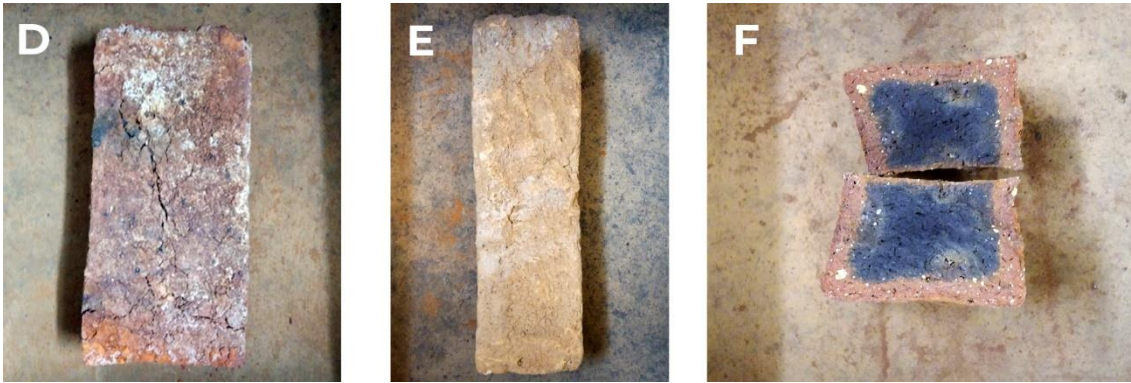
**Tipo E:** Ladrillo artesanal tipo “chorizo” con interior carbonizado. Dimensiones (5 x 5 x 24) cm. Imagen 4.1.1.2.

35

**IMAGEN 4.1.1.1.** – Cerámicos utilizados: ticholo industrial (A), prensa (B) y chorizo (C).



**IMAGEN 4.1.1.2.** – Cerámicos utilizados, tipo artesanal estándar (D), ladrillo artesanal tipo chorizo (E), sección de ladrillo tipo E carbonizado (F).



#### 4.1.2. Agua

El agua utilizada en la preparación de pastas y morteros proviene de la red potable que O.S.E. suministra al Instituto de la Construcción – Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo.

#### 4.1.3. Arena

36

Para la elaboración de los morteros se utilizó arena de río y procedió a elaborar una granulometría con porcentajes dentro de los márgenes establecidos para la arena normalizada en la norma UNIT ISO: 679:2009 [40]. Cabe mencionar que, la arena utilizada no fue normalizada con respecto a la resistencia mecánica, pero se entendió que los resultados son igualmente válidos ya que las comparaciones realizadas entre las pastas, morteros y la muestra patrón, fueron elaborados con la misma arena.

La composición granulométrica quedó definida según la Tabla 4.1.3.

**TABLA 4.1.3.** Composición granulométrica de la arena utilizada.

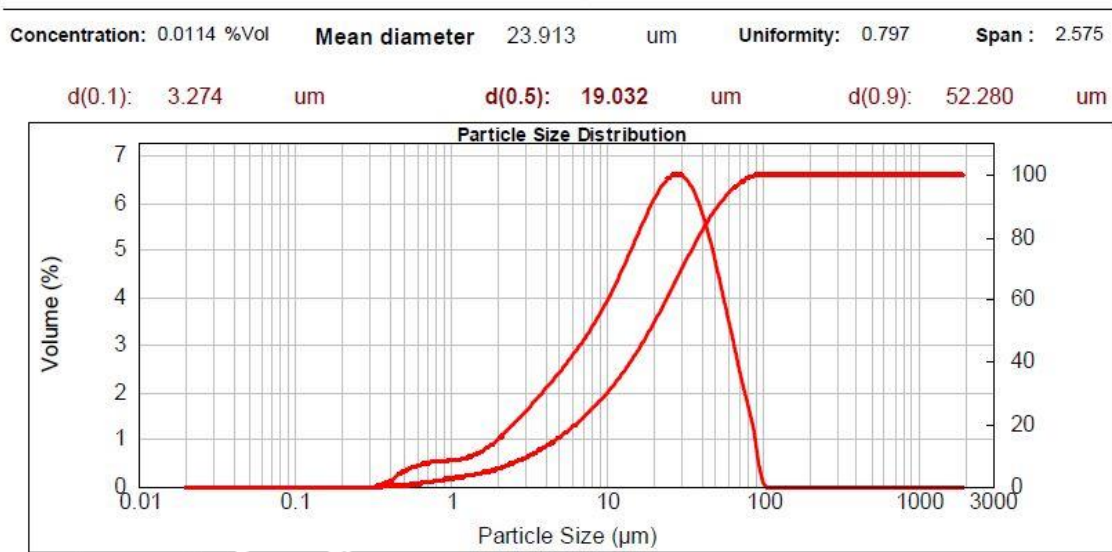
N° tamiz	Parcial [%]	Acumulado [%]	Gramos [gr]
2 mm	0	0	0
1,6 mm	7	7	95
1 mm	21	28	284
0,5 μm	44	72	594
0,16 μm	20	92	270
0,08 μm	8	100	108
<b>Total</b>			<b>1350</b>

#### 4.1.4. Cemento

El cemento portland utilizado en la elaboración de los morteros, es cemento Portland Normal 40 (CPN40) producido por la empresa ARTIGAS S.A caracterizado según la norma UNIT 20:2017 [41].

En la Tabla 4.1.4. se presentan la composición química del mismo. La elección responde a que es uno de los más usuales en el mercado nacional. La caracterización granulométrica del cemento utilizado CPN40, presenta un diámetro medio de 23,91  $\mu\text{m}$ . Por otra parte, el 90 % de sus partículas están por debajo de los 52,28  $\mu\text{m}$  y el 50 % presentan un diámetro inferior a 19,03  $\mu\text{m}$ , como puede apreciarse en la Figura 4.1.4.

FIGURA 4.1.4. Análisis granulométrico del cemento utilizado, CPN40 Artigas



**TABLA 4.1.4.** Composición química del cemento CPN40 Artigas.

<b>COMPOSICION QUIMICA TIPO DE CEMENTO: CPN 40 ARTIGAS</b>			
SiO <sub>2</sub>	19 ± 2 %	Ti	1077 ± 105 µg/g
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	< 2 %	Cu	7,2 ± 0,5 µg/g
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,9 ± 0,2 %	Zn	46,5 ± 4,5 µg/g
MnO	351 ± 35 µg/g	Pb	17,2 ± 1,5 µg/g
MgO	3,1 ± 0,9 %	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	< 2 %
CaO	55,2 ± 5,0 %	Cl	0,15%
Na <sub>2</sub> O	0,22 ± 0,05 %	Perdida a 105°C	0,6 ± 0,1 %
K <sub>2</sub> O	1,2 ± 0,1 %	Materia volátil (a 500°C)	0,7 ± 0,1 %
SO <sub>3</sub>	2,50%	Perdida por calcinación (a 1000°C)	4,6 ± 0,4 %

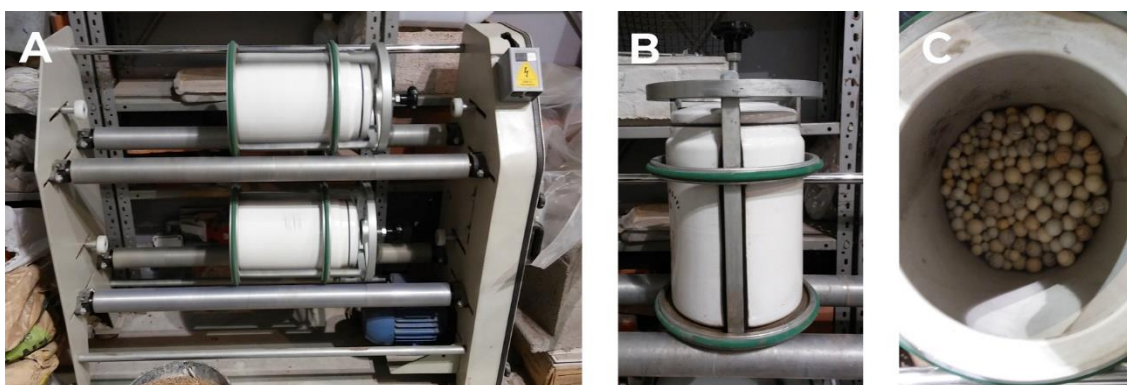
## 4.2. Equipos

### 4.2.1. Molienda

38

Para la molienda de las adiciones originales se utilizó un molino de bolas marca DOIS ANDARES modelo CT 240/B. Consiste en dos rodillos que sostienen un recipiente de cerámica de cinco litros de capacidad, en el cual se introducen bolas de alúmina de 2 cm de diámetro y el material original a moler. El molino se puede apreciar en la Imagen 4.2.1.

**IMAGEN 4.2.1.** Molino de bolas utilizado. Vista general (A), Recipiente cerámico (B) y Bolas de Alúmina (C).



#### 4.2.2. Tamizadora

Se utilizó una tamizadora marca Controls de 30 litros de capacidad, con un juego de tamices rectangulares de (457 x 660 x 75) mm con aberturas en malla según serie normalizada de 2 mm, 1,5 mm, 1mm, 500  $\mu\text{m}$ , 160  $\mu\text{m}$  y 80  $\mu\text{m}$ .

#### 4.2.3. Amasadora

La amasadora de morteros de cemento utilizada marca Controls, modelo 65-L0005, compuesta por un recipiente de acero inoxidable de una cantidad aproximada de 5 l, como se muestra en la Imagen 4.2.3.

A su vez, cuenta con una pala de acero inoxidable, que es accionada por un motor eléctrico de velocidades controladas, con movimientos de rotación sobre su propio eje, y con un movimiento planetario alrededor del eje del recipiente según los establecido en la norma UNIT-ISO 679:2009 [40]. La velocidad lenta tiene una rotación de  $140 \pm 5 \text{ min}^{-1}$  y un movimiento planetario de  $62 \pm 5 \text{ min}^{-1}$  mientras que la velocidad rápida tiene una rotación de  $285 \pm 10 \text{ min}^{-1}$  y un movimiento planetario de  $125 \pm 10 \text{ min}^{-1}$ .

**IMAGEN 4.2.3.** Amasadora Controls, vista general (A)



#### 4.2.4. Compactadora

La compactadora de probetas para morteros marca Controls modelo 65-L0012/E, está compuesto por una mesa rectangular unida rígidamente por dos brazos ligeros a un eje de rotación. Durante el funcionamiento, la mesa es levantada por una leva que le permite una caída libre desde una altura de 15,0 mm, entre el martinete y el yunque. En la Imagen 4.2.4 se muestra la misma.

**IMAGEN 4.2.4.** Compactadora Controls, vista general (A)



#### 4.2.5. Estufa

Para el secado de las pastas molidas, luego de filtradas, que fueron utilizadas en el ensayo de termogravimetría, se utilizó una estufa marca NOVUS, modelo N480D. Permite el control de temperatura de 0 °C a 200 °C con una precisión de 1 °C y con una capacidad de 160 l contando también, con ventilación forzada. La misma se puede apreciar en la Imagen 4.2.5.

40

**IMAGEN 4.2.5.** Estufa Novus, vista general (A)





#### 4.2.6. Medición de pH y conductividad

Las medidas de pH y de conductividad eléctrica se realizaron con un kit de conductividad y pH/ OD Modelo D0610 EXSTIK II de la marca EXTECH. En la Imagen 4.2.6 se muestra el mismo.

IMAGEN 4.2.6. Kit de conductividad y pH, vista general (A)

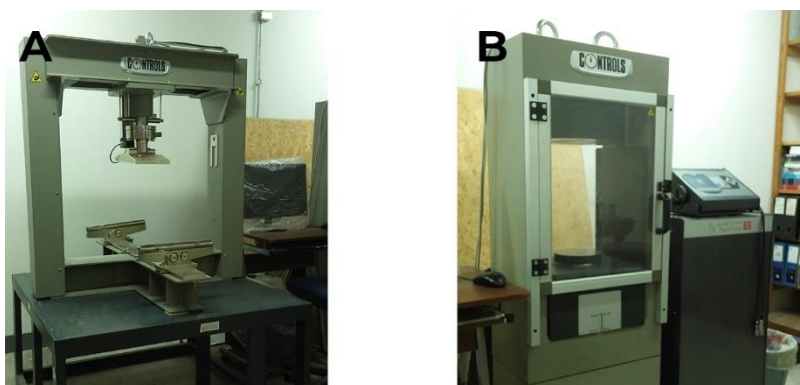


#### 4.2.7. Prensa

41

Para la determinación de la resistencia a flexión y compresión de todas las muestras analizadas se ha utilizado una prensa CONTROLS, MCC8 MULTITEST, con velocidad y deformación controlada la cual cuenta con bastidores de 2000 kN y 100 kN de carga máxima. En la Imagen 4.2.7 se puede apreciar la misma.

IMAGEN 4.2.7. Prensa Controls MCC8 Multitest Utilizada. Bastidor de flexión 100 kN (A), Bastidor a compresión 2000kN (B).



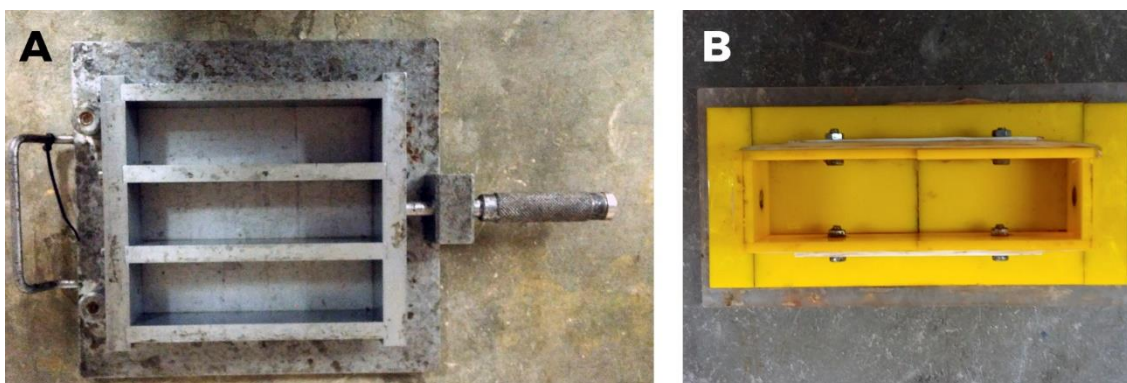
#### 4.2.8. Moldes

Para la preparación de las diferentes probetas se han utilizado dos tipos de moldes según las características del ensayo a realizar. A continuación, se detallan los mismos.

Para las probetas necesarias para los ensayos de flexión y compresión, se utilizaron moldes prismáticos de acero de (40 x 40 x 160) mm<sup>3</sup> según lo establecido en la Norma UNIT-ISO: 679:2009 [40] y representado en la Imagen 10.

El resto de las matrices cementicias fueron realizadas en moldes prismáticos de metacrilato de (25 x 25 x 100) mm<sup>3</sup>, como puede apreciarse en la Imagen 4.2.8.

**IMAGEN 4.2.8.** Moldes utilizados para la elaboración de las muestras. Molde de acero (A), y Molde de metacrilato (B)



#### 4.2.9. Granulometría por difracción láser (ADL)

Para la determinación de la distribución de tamaños de partículas del cemento y adiciones se enviaron las muestras a analizar a la Universidad Politécnica de Valencia, España donde utilizaron un analizador de tamaños de partícula Mastersizer 2000 de Malvern Instruments.

#### 4.2.10. Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)

Para la observación microscópica electrónica se barrido se enviaron las muestras a analizar a la Facultad de Ciencias, Universidad de la Republica, Montevideo, donde utilizaron para realizar el recubrimiento con oro, el equipo DESK II DENTOM VACUUM y el equipo de microscopia de barrido utilizado fue JEOL JSM 5900LV.

#### **4.2.11. Difractómetro de rayos X (DRX)**

Para el análisis por difracción de rayos X se enviaron las muestras a analizar a Facultad de Química, donde utilizaron el difractómetro de rayos X de polvo modelo Ultima IV, Marca Rigaku. Geometría de Operación Bragg-Brentano, operando con radiación Cu-K $\alpha$ =1.54184Å. Las mediciones se realizaron en un intervalo de 10 °C a 60 °C con un intervalo escalonado de 0,02 °C y un tiempo de acumulación de 2 segundos.

#### **4.2.12. Análisis termogravimétrico (TGA/DTA)**

Para el análisis termogravimétrico se enviaron las muestras a analizar a la Facultad de Química, Universidad de la Republica, Montevideo, donde utilizaron un módulo TGA equipo SHIMADZU TGA 50 y DTA 50, que permite medir simultáneamente la curva termogravimétrica y la curva de análisis térmico-diferencial (DTA). Las mediciones se realizaron en un intervalo de 10 °C a 600 °C con un intervalo escalonado de 0,02 °C y un tiempo de acumulación de 2 segundos.

#### **4.2.13. Fluorescencia de rayos X (FRX)**

Para el análisis por fluorescencia de rayos X para en la determinación de la composición elemental de los cementos, residuos cerámicos y morteros con diferentes porcentajes de adiciones minerales, las muestras fueron enviadas a la Universidad de Córdoba, Argentina donde el equipo utilizado fue un FEG-SEM Karl Zeiss Modelo Sigma, con un detector EDS Oxford de 80mm<sup>2</sup>.

### 4.3. Procedimientos

#### 4.3.1. Elaboración de matrices cementicias

Se realizaron tres tipos de matrices cementicias para los diferentes requerimientos de los ensayos propuestos.

Para la determinación de la resistencia a la flexión y a la compresión se realizaron morteros según el punto 4.3.1.2. Mientras que para la observación por microscopia de barrido (SEM), fluorescencia de rayos X (FRX), difracción de rayos X (DRX) y termogravimetrías (TGA/DTA) y mediciones de pH y conductividad se utilizaron pastas cementicias sin áridos y por último se realizaron pastas con hidróxido de calcio para ser analizadas a través de termogravimetrías según el punto 4.3.1.3.

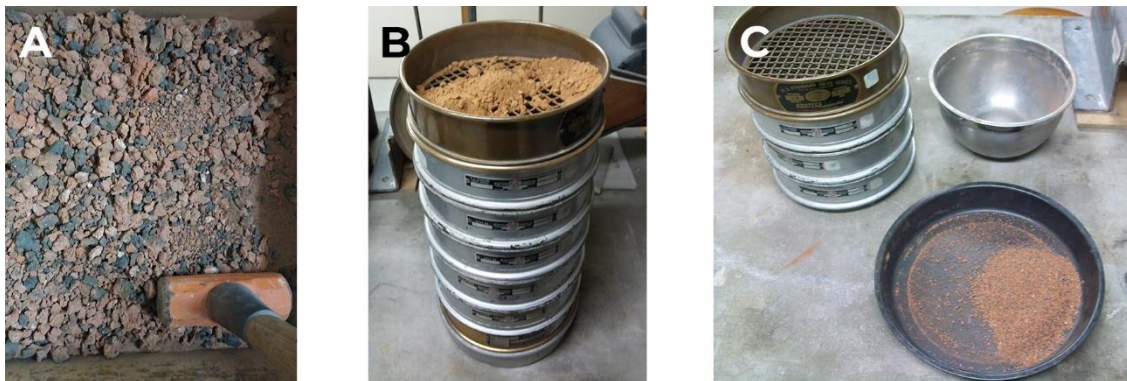
##### 4.3.1.1. Acondicionamiento de muestras cerámicas

El acondicionamiento de los cerámicos para su uso como puzolanas se realizó en primera instancia mediante medios mecánicos manuales hasta llegar a partículas de 1,0 cm de diámetro máximo aproximadamente. Posteriormente, se tamizaron las diferentes muestras en la tamizadora mecánica presentada en el punto 4.2.2 durante 3 minutos. Descartándose el material retenido en el tamiz 4,76 mm.

44

A continuación, las muestras fueron sometidas a un proceso de trituración y molienda en el molino de bolas descrito en el punto 4.2.1, de 65 revoluciones por minutos, en jarros de volumen de 5 litros. Los mismos se llenaron hasta el 60 % del volumen, aproximadamente con un 1,5 Kg de material, y con 6,5 Kg de bolas de alúmina. Se hizo funcionar el molino durante seis horas para lograr un tamaño medio de partícula menor o igual 20 micras según lo confirman los resultados de la granulometría láser realizada al producto obtenido de la molienda que se presentan en el punto 5.1.1.

**IMAGEN 4.3.1.1.** Acondicionamiento de las muestras de cerámico. Acondicionamiento mediante medios mecánicos manuales (A), serie de tamices utilizado (B) y cerámico tamizado (C).



#### 4.3.1.2. Producción de morteros

La elaboración y dosificación de los morteros se realizaron según la norma UNIT ISO: 679:2009 [40]. La dosificación en peso establecida para los morteros es: 1 parte de cemento (500 gr), 3 de arena (1500 gr) y con una relación agua/cemento de 0,5 (250 ml). Con estas cantidades se obtiene material para el llenado de un molde de tres probetas (40 x 40 x 160) cm<sup>3</sup>.

Los materiales cerámicos, luego de acondicionados se utilizaron como adiciones, determinando los porcentajes de sustitución a partir de investigaciones similares realizadas en otros países. Tomando en cuenta los trabajos de investigación anteriores, se determinó 4 porcentajes de sustitución del 5 %, 10 %, 20 % y 30 % en el peso del cemento por los distintos cerámicos.

Los morteros y pastas realizados fueron curados dentro de contenedores en una solución de agua saturada de hidróxido de calcio CA(OH)<sub>2</sub> a temperatura ambiente del laboratorio (20 °C ± 1 °C) durante 3, 7, 28 y 56 días.

Para la elaboración de los diferentes morteros realizados se procedió a lo establecido en la mencionada norma:

En primer lugar, se colocó el agua y el cemento dentro del recipiente de la amasadora, evitando pérdidas de agua o de cemento; en caso de morteros mixtos la puzolana se homogeneizó con el cemento previamente e incorporó en este punto. Luego inmediatamente después de entrar en contacto el agua y el cemento, se puso en marcha la amasadora a velocidad lenta iniciándose los tiempos de amasado. Después de 30 segundos de amasado, se añadió regularmente la arena durante los 30 segundos siguientes. En casos de morteros sin áridos, se saltea este paso continuando con el amasado a velocidad lenta. Posteriormente se puso la amasadora a velocidad rápida y se continuó con el amasado durante otros 30 segundos.

Luego se detuvo la amasadora durante 90 segundos y en los primeros 30 segundos, se retiró el molde de acero inoxidable y por medio de una espátula de goma se mezcló la pasta y se colocó el recipiente nuevamente en la amasadora para continuar con el amasado a velocidad rápida durante otros 60 segundos más.

Finalmente, con el molde lubricado y colocado en la mesa de la compactadora, se rellenó en dos fases. En la primera se rellenó hasta la mitad del molde aplicándosele una compactación con 60 golpes. Posteriormente se introdujo la segunda capa de mortero y se compactó con otros 60 golpes como se puede ver en la Imagen 4.3.1.2.1.1.

Luego se retiró con cuidado el molde de la mesa de sacudidas e inmediatamente se quitó el exceso de mortero con una regla plana. Se limpió el molde eliminando el mortero que había quedado como consecuencia del enrasado y se colocó sobre él una lámina de vidrio de aproximadamente de (21 x 18,5 x 0,6) cm<sup>3</sup>.

Durante las 24 horas después del llenado de los moldes, se conservaron en una habitación con atmosfera controlada a 20 °C y una humedad del 56 %. Transcurrido ese periodo de tiempo se realizó el desmolde, identificando cada probeta con una crayola resistente al agua.

**IMAGEN 4.3.1.2.1.1.** Producción de morteros. (A) Preparación previa al amasado, (B) posicionado de molde en compactadora y (C) compactado finalizado.



**IMAGEN 4.3.1.2.1.2.** Curado de probetas. (A) Mortero en molde 24 horas luego de amasado, (B) probetas desmoldadas e identificadas y (C) curado de probetas dentro de contenedores.



#### 4.3.1.3. Producción de pastas cementicias y pastas con hidróxido de calcio

Adicionalmente se prepararon pastas con adición cerámica en las mismas proporciones y siguiendo el mismo procedimiento que las descritas en el punto 4.3.1.2. pero sin áridos. El curado y almacenamiento se realizó de la misma forma que el presentado en el punto 4.3.1.2.1.

A su vez, en la presente investigación, se prepararon pastas en relaciones 2:8 y 3:7, tanto cemento/puzolana como cal/puzolana para las edades de 7, 28 y 56 días con el objetivo de estudiar sus curvas termogravimétricas y realizar el análisis de las reacciones que se producen, con especial atención al hidróxido de calcio, observando su variación en las diferentes edades.

El procedimiento realizado para estas pastas fue el mismo anteriormente descrito con la excepción que el curado se realizó dentro de una cámara húmeda a una temperatura de 20 °C y una humedad  $\geq 95$  %. Para estas mezclas se utilizó hidróxido de calcio en forma de pasta, con una pureza del 95 % de la empresa Carlo Erba.

Ambas pastas antes de ser ensayadas, con el objetivo de detener los procesos de hidratación a la edad correspondiente, fueron molidas en un mortero de cerámica embebidas en acetona. A continuación, se filtraron las pastas en un kitasato conectado a una bomba de vacío, y se llevó las muestras a estufa durante 20 min a 60 °C.

Para finalizar la etapa de preparación de las muestras, se tamizó la muestra en un tamiz de 105  $\mu\text{m}$ . El material pasante fue almacenando pipetas Eppendorf de un gramo y enviado al servicio correspondiente para su posterior ensayo.

**IMAGEN 4.3.1.3.** Preparación de pastas para ser ensayadas. Molido de muestras en recipiente cerámico (A), Molido de muestras embebida en acetona (B) y filtrado de pastas en kitasato (C) y (D).



#### 4.3.2. Análisis de granulometría por difracción de rayos láser (ADL)

La granulometría laser es un método rápido para determinar distribuciones de tamaños de partícula. Para la determinación de la distribución de tamaños de partículas del cemento y adiciones se utilizó el analizador de tamaños de partícula Mastersizer 2000 de Malvern Instruments.

El principio de la difracción por rayos laser consiste en hacer pasar una muestra pulverenta a través de un rayo láser monocromático. Según la teoría de Fraunhofer se origina una figura de difracción en el detector cuando un frente de luz monocromática incide sobre la partícula que va a ser analizada se produce la dispersión del frente de luz, siendo esta captada por detectores ópticos. La información es procesada aplicando unos modelos ópticos, que consideran las partículas como esferas, de este modo se consigue obtener la distribución del tamaño de las partículas [42].

### 4.3.3. Determinación de la Resistencia a flexión y compresión

El ensayo para determinar la resistencia de compresión y flexión se realizó de acuerdo con la norma UNIT ISO: 679:2009 [40].

Las resistencias mecánicas de morteros fueron realizadas en probetas prismáticas de dimensiones de (40 x 40 x 160) mm<sup>3</sup> de acuerdo con lo establecido en la norma. Cabe mencionar que para cada edad de rotura fueron ensayadas tres probetas, obteniéndose tres valores de resistencia a flexión y seis valores de resistencia a compresión. A partir de estos datos fue calculado el valor medio de dichos y el error es representado por la desviación estándar.

#### 4.3.3.1. Resistencia a la flexión

Para la determinación de la resistencia a la flexión se siguió el procedimiento establecido en la Norma UNIT ISO: 679:2009 [40] mencionada, que consiste en el método de carga a 3 puntos como se aprecia en las figuras 4.3.3.1 y 4.3.3.2.

Se posicionó la probeta en la máquina de ensayo, con una cara lateral sobre los rodillos soporte separados a (100,0 ± 0,5) mm y su eje longitudinal normal a los soportes; se le aplicó una carga central vertical mediante un rodillo en la cara lateral opuesta a la de apoyo y se incrementó uniformemente a una velocidad de (50 ± 10) N/s hasta la rotura. Posteriormente se mantuvo las mitades del prisma cubiertas con un paño húmedo hasta el ensayo de compresión.

Para finalizar se calculó el valor de la Resistencia a flexión,  $\sigma_{Fmax}$ , en mega pascales mediante la siguiente fórmula:

$$\sigma_{Fmax} = \frac{1.5 F_{max} \times L_s}{w^3}$$

**Ecuación 1**

Donde:

$\sigma_{Fmáx}$  es la resistencia máxima a flexión, en MPa;

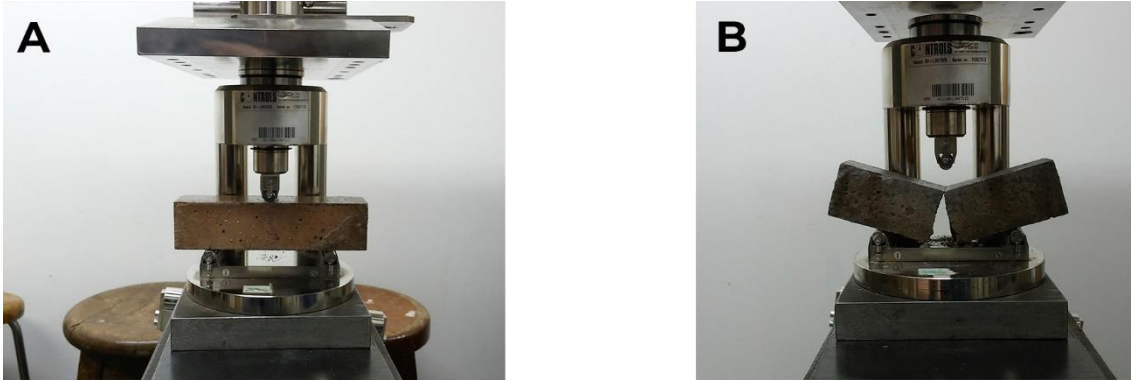
$w$  es el ancho, lado de la sección cuadrada del prisma, en mm;

$F_{máx}$  es la carga aplicada del prisma en la rotura, en N;

$L_s$  es la distancia entre soportes, en mm.



**IMAGEN 4.3.3.1.** Ensayo a Flexión. Probeta previa al ensayo (A) y probeta luego de aplicada la fuerza (B).



#### 4.3.3.2. Resistencia a la compresión

El ensayo se realizó siguiendo el procedimiento indicado en Norma UNIT ISO: 679:2009 [40] para los semi-prismas obtenidos en el ensayo a flexión de probetas prismáticas lineales.

49

Se colocó el semi-prisma en el templete de ensayos a compresión. Centrado lateralmente con relación a los platos de acero del templete a  $\pm 0,5$  mm; luego se le aplicó una carga uniforme a una velocidad de  $(2400 \pm 200)$  N/s hasta la rotura.

Finalmente se calculó la resistencia máxima a compresión,  $\sigma_{Cmáx}$ , en mega pascales, mediante la siguiente fórmula:

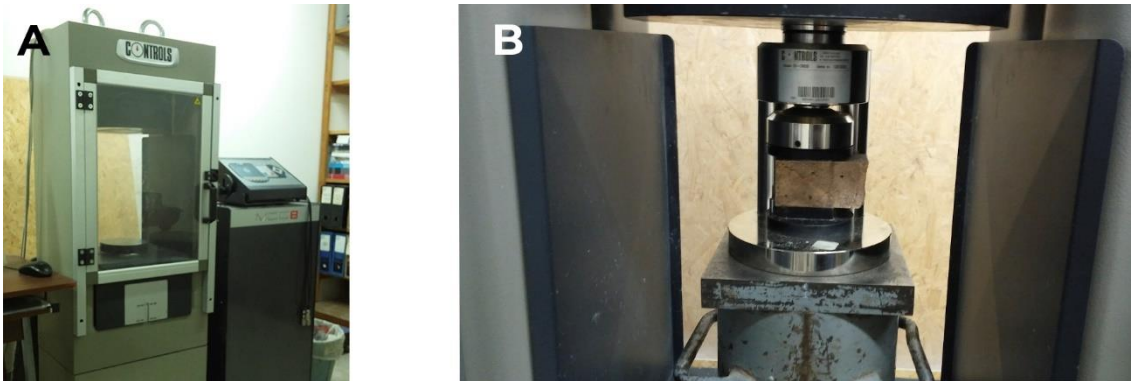
$$\sigma_{Cmax} = \frac{F_{cmax}}{a \times b}$$

**Ecuación 2**

Donde:

- $\sigma_{Cmáx}$  es la resistencia máxima a compresión, en MPa;
- $a$  es el ancho de la sección en contacto con los platos, en mm;
- $b$  es el largo de la sección en contacto con los platos, en mm;
- $F_{Cmáx}$  es la carga máxima aplicada registrada, en N;

**IMAGEN 4.3.3.2.** Ensayo a Compresión. Bastidor a compresión de 2000 KN (A) y probeta previa a aplicación de la fuerza a compresión (B).



#### 4.3.4. Valoración de la actividad puzolánica

La evaluación de la viabilidad de una adición mineral activa en morteros y hormigones se hace a través del estudio de la actividad puzolánica, que es la capacidad de una adición mineral de reaccionar con el hidróxido de calcio, para formar compuestos cementantes similares a los generados durante la hidratación del cemento Portland.

50

La valoración de la reactividad puzolánica se estudió de las siguientes maneras:

En primer lugar, se tomó como referencia la norma UNIT 1035:1998 [41], para la determinación del índice de puzolaneidad que posteriormente se verificará con el requisito planteado en la norma UNIT 1047:1999 [2] a los 28 días, los morteros realizados deben superar el 75 % de la resistencia mecánica a compresión en contraposición con la resistencia a compresión obtenida del mortero de control (100 % cemento).

En segundo lugar, la valoración se realizó a través de la técnica instrumental de termogravimetría (TGA/DTA) para la cuantificación del porcentaje de fijación de cal como se explica en el punto 4.3.5.

#### 4.3.5. Análisis termogravimétrico y térmico diferencial (TGA/ DTA)

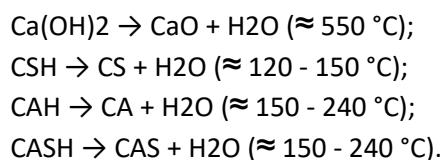
El análisis termogravimétrico es una técnica instrumental que se basa en la medida de la variación de masa que sufre un material en función de la variación de la temperatura, bajo una atmosfera controlada. La representación gráfica de la variación de la masa o del porcentaje de masa en función del tiempo o de la temperatura se denomina termograma o curva de descomposición térmica [1] [28].

La reacción del cemento Portland con agua, genera productos de hidratación y libera Portlandita. Esta Portlandita liberada, en presencia de materiales puzolánicos activos puede dar lugar a la

formación de nuevos productos de hidratación, similares a los formados en la hidratación del cemento.

Mediante el análisis de la curva termogravimétrica se puede determinar la pérdida de masa debida a las reacciones de deshidratación de los compuestos. Lo que nos permite la cuantificación en porcentaje de hidróxido de calcio presente en las pastas y podemos inferir entonces, la actividad puzolánica de las pastas cemento/puzolana y cal/puzolana.

Las reacciones de deshidratación que sufren las pastas de cemento/puzolana y las pastas de cal/puzolana están representadas a continuación.



Donde:

CSH son los silicatos cálcicos hidratados;

CAH son los aluminatos cálcicos hidratados;

CASH son los silicoaluminatos cálcicos hidratados

51

*“Cuando se hace referencia a la química del cemento hidratado, las pérdidas de masa suelen ser debidas a la deshidratación de los productos formados por la reacción del cemento Portland con el agua”[28].*

En la Imagen 4.3.5. se representa la curva termogravimétrica y de la curva derivada para una pasta de cemento. Graficándose la descomposición de los productos hidratados formados en la hidratación del cemento Portland. A los 150 °C aparece un pico atribuible a la descomposición de los productos de CSH hidratado y de la etringita. A los 200 °C, la descomposición del CASH y por último entre los 520 °C y los 600 °C corresponde a la deshidroxilación del  $\text{Ca(OH)}_2$  [1].

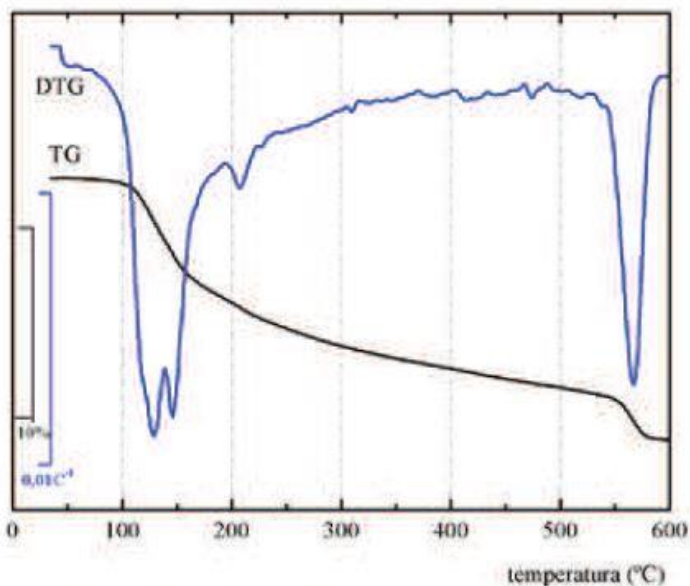
A partir de los datos extraídos de estas curvas se pueden determinar tanto la cantidad de cal presente en las muestras, como el porcentaje fijado por la puzolana, cuando corresponda, según el siguiente proceso:

La deshidroxilación del CH responde a la reacción:



**Ecuación 3**

IMAGEN 4.3.5. Grafica con curva TG y DTG para pasta de cemento [1].



“Esta deshidroxilación se puede calcular en base a los datos de pérdida de peso producida en el intervalo de temperaturas entre 500 °C y 600 °C para cada una de las muestras. Por tanto, la cantidad de agua combinada con los productos de reacción, el porcentaje de Portlandita, así como el hidróxido cálcico consumido por la reacción puzolánica, cuando corresponde, fueron calculados de acuerdo con las siguientes ecuaciones” [28]:

$$\% \text{ H}_2\text{O combinada} = P_t - P_{\text{CH}} \tag{Ecuación 4}$$

$$\% \text{ CH presente} = P_{\text{CH}} \cdot (PM_{\text{CH}} / PM_{\text{H}_2\text{O}}) \tag{Ecuación 5}$$

$$\% \text{ Portlandita consumida} = ((\text{CH}_c \cdot C) - \text{CH}_p / \text{CH}_c \cdot C) \cdot 100 \tag{Ecuación 6}$$

Donde:

PT es la pérdida de masa total obtenida por el calentamiento a temperaturas entre 35 °C y 600 °C después de un tiempo de curado “t”;

P<sub>CH</sub> es la pérdida de masa relacionada con la deshidratación de la Portlandita; ocurrida a temperaturas entre 500 ° y 600 °C después de el mismo tiempo de curado;

PM<sub>CH</sub> y PM<sub>H<sub>2</sub>O</sub> son los pesos moleculares de la Portlandita y agua respectivamente;

CH<sub>c</sub> es el contenido de Portlandita en la pasta control, de cemento Portland en este caso;

CH<sub>p</sub> es el contenido de portlandita en la pasta a evaluar, con adición de puzolanas;

C es la proporción de cemento en el conglomerante de la pasta mixta.

Para la realización de los cálculos se tomó un  $PM_{CH}$  de 74 g/moles y  $PM_{H_2O}$  de 18 g/moles. Para ser analizadas, las muestras se colocaban dentro de crisoles, de aluminio. Para los ensayos realizados hasta 950 °C se utilizaron crisoles de aluminio de 100  $\mu$ l.

Para identificar y cuantificar los procesos de deshidratación de los conglomerantes, el ensayo fue realizado en un intervalo de temperatura entre 10 °C y 950 °C con una velocidad de calentamiento de 10 °C/min en atmósfera de aire corriente (flujo de 50 mL / min).

#### 4.3.6. Análisis por difracción de rayos X (DRX)

La técnica de difracción de rayos X se utiliza para identificar la mineralogía de los materiales puesto que cada sustancia cristalina genera una única figura de difracción. En el presente trabajo, esta técnica fue utilizada para caracterizar las muestras de cerámicos y también las matrices cementicias de referencia, así como con diferentes porcentajes de adición mineral.

El ensayo consiste en medir la desviación que sufre un haz primario de rayos X cuando incide sobre una muestra. El objetivo del ensayo es averiguar las coordenadas en x, y y z para cada átomo. Para lograrlo es necesario, en primer lugar, determinar la relación entre la red cristalina y la geometría del patrón de difracción y, en segundo lugar, obtener las posiciones de los átomos a partir de la intensidad de la difracción. Su posterior análisis por medios matemáticos permite obtener una representación a escala atómica de los átomos y moléculas del material estudiado. *“Los ángulos de desviación están íntimamente relacionados con la distancia entre los planos de la red cristalina del material, siguiendo la ley de Bragg:  $n \cdot \lambda = 2d \cdot \sin \theta$ ” [1].*

Donde:

n es un número entero (orden de reflexión);

$\lambda$  es la longitud de onda de los rayos X;

d es la distancia interplanar entre dos planos atómicos paralelos sucesivos en el cristal;

$\theta$  es el ángulo formado con el plano atómico entre el haz incidente y el reflejado.

#### 4.3.7. Análisis por fluorescencia de rayos X (FRX)

La fluorescencia de rayos X es utilizada para determinar la composición elemental de un material sólido.

La técnica consiste en la emisión de rayos X secundarios o fluorescentes, que se consigue al excitar una muestra irradiándoles un haz de rayos X procedente de un tubo o de una fuente radiactiva. Con esta técnica, los elementos de la muestra se excitan como consecuencia de la absorción del haz primario y emiten sus propios rayos X fluorescentes característicos.

La radiación incidente o primaria expulsa electrones ligados en los orbitales internos del átomo. Entonces, la estructura electrónica del átomo queda en condición inestable y los electrones de capas más externas descienden al orbital más bajo y para luego ocupar los huecos de los electrones desprendidos. Esta transición genera energía que se disipa en forma de fotones. Por lo tanto, el material emite la llamada radiación X fluorescente o secundaria, característica de los átomos componentes del material. Esta radiación de fluorescencia es característica para cada elemento químico.

*“Por lo tanto, es posible identificar un elemento dentro del espectro de la muestra si se conoce la energía entre los orbitales atómicos implicados (longitud de onda). La concentración de cada elemento se detecta midiendo la intensidad de la energía asociada a cada transición de electrones” [1].*

#### **4.3.8. Análisis de las matrices cementicias por microscopia electrónica de barrido (SEM)**

La microscopia electrónica de barrido (SEM) es una técnica instrumental que permite producir imágenes de alta resolución de la superficie de una muestra utilizando las interacciones electrón-materia mediante un haz de electrones. Esta técnica ayuda a caracterizar y analizar la morfología de las partículas en la superficie de los sólidos, así como visualizar posibles formaciones de estructuras cristalinas debido a las reacciones que pueden ocurrir en los procesos de hidratación de los conglomerantes.

54

*“...Para obtener una imagen por microscopia electrónica, la superficie de una muestra sólida es barrida según un modelo ráster con un haz de electrones muy fino. Un ráster es un modelo de barrido similar al utilizado en un tubo de rayos catódicos, en el que un haz de electrones barre la superficie en línea recta, vuelve a la posición inicial y es desplazado hacia abajo a una distancia establecida...Este proceso se repite hasta que el área deseada de la superficie ha sido barrida. Al barrer la superficie con una pistola de electrones de energía elevada se producen diversos tipos de señales. Estas señales incluyen electrones retro dispersados, secundarios, además, fluorescencia de rayos X y otros fotones de diversas energías. Todas estas señales se han utilizado en estudios de superficies, pero las más usuales son las que corresponden a electrones retro dispersados y secundarios, que sirven de base a la microscopia de barrido de electrones y a la fluorescencia de rayos X, que se utiliza en el análisis con microsonda de electrones...” [1].*

La microscopia electrónica de barrido fue utilizada en el análisis de la morfología de las partículas correspondientes a las pastas cemento/puzolana en las diferentes proporciones establecidas.

Para la realización del ensayo, las muestras debieron ser previamente metalizadas para facilitar la conductividad eléctrica de las mismas. El recubrimiento de dichas muestras se realizó con oro, para obtener imágenes más nítidas que con carbono.

#### 4.3.9. Mediciones de pH y conductividad

Las medidas de pH y conductividad eléctrica en suspensión acuosa se realizaron para evaluar la reactividad puzolánica de distintas adiciones minerales a los 28 días. Utilizando un agitador magnético modelo 24-D0448 Marca Controls, se agitó la solución preparada con agua destilada y un gramo de cada muestra cerámica triturada, por quince minutos, dentro de un recipiente con veinte gramos de agua desionizada antes de realizar las mediciones de pH y conductividad.

#### 4.3.10. Mediciones del contenido de humedad

El ensayo se realizó siguiendo el procedimiento indicado en Norma UNIT NM: 24:2004 [43] para la determinación del contenido de humedad de las muestras cerámicas, con el fin de verificar los requisitos químicos de la Norma UNIT 1047:1999 [10] referente a la caracterización de puzolanas. El mismo se realizó de la siguiente manera:

En primera instancia se pesó 1 gr de muestra con una aproximación de 0,001 gr en un crisol de masa conocida. Luego se colocó el crisol en la estufa a una temperatura de  $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  por un periodo inicial de 30 minutos. Luego se colocaron las muestras a secar a temperatura ambiente en un desecador y se realizó una pesada inicial. Posteriormente se colocaron las muestras en la estufa por 3 periodos de 10 minutos cada uno y luego de cada periodo de estufa se volvieron a dejar secar a temperatura ambiente dentro del desecador hasta que la diferencia entre dos pesadas sucesivas fuera menor a 0,001 gr, logrando un estado de masa constante para realizar el pesado.

El cálculo del contenido de humedad en las muestras cerámicas se realizó mediante la siguiente ecuación.

$$U = \frac{(m_1 - m_2)}{m_1} \cdot 100$$

**Ecuación 7**

Donde:

U es la humedad de la muestra en porcentaje

$m_1$  es la masa de la muestra antes del secado en gramos

$m_2$  es la masa de la muestra luego del secado en gramos

#### 4.3.11. Análisis por pérdida por calcinación

El ensayo de pérdida por calcinación fue realizado en el laboratorio de Tecno gestión perteneciente al Ministerio de Industria, Energía y Minería según método de referencia ASTM C 114 – 07 “Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement” 16.1 Loss on Ignition – Portland Cement. Con la finalidad de verificar los requisitos químicos de la Norma UNIT 1047:1999 [2] referente a la caracterización de puzolanas.

## 5 | RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Este capítulo reúne los resultados obtenidos de los distintos ensayos realizados para la caracterización y valorización de los residuos cerámicos nacionales como adición mineral del cemento Portland. Se realizó una caracterización físico-química de los cerámicos utilizados, a través de análisis de granulometría por difracción de rayos laser, ensayo de calcinación, análisis por difracción de rayos X, fluorescencia de rayos X y finalmente mediciones del contenido de humedad.

Posteriormente, con el fin de evaluar la viabilidad de uso de una adición mineral en la producción de morteros y pastas cementicias, se analizó la actividad puzolánica de la misma. Mediante distintas técnicas instrumentales recopilamos diversa información para la comprensión de sus propiedades físico-mecánicas. El estudio buscó evaluar la capacidad de fijación de cal y formación de hidratos por parte del residuo cerámico en pastas y morteros cementicios mediante estudios por termogravimetría. Del mismo modo se realizaron ensayos de resistencia mecánica de flexión y compresión a morteros cementicios según los procedimientos descritos en el Capítulo 4 de la presente Tesis.

Por último, en virtud de los resultados obtenidos se realizó la caracterización de los materiales puzolánicos según los requisitos solicitados en la norma UNIT 1047:1999 [2].



## 5.1. Caracterización de los cerámicos

### 5.1.1. Análisis de granulometría por difracción de rayos láser (ADL)

El análisis granulométrico por difracción de rayos láser proporciona información sobre la distribución granulométrica del material.

En la Tabla 5.1.1 se recogen los valores de diámetro medio de las muestras de cerámico estudiadas y también los percentiles  $d(0,1)$ ,  $d(0,5)$  y  $d(0,9)$ , primordiales a la hora de caracterizar la adición cerámica, ya que se desea que la distribución de la granulometría sea lo más uniforme posible.

**TABLA 5.1.1.** Resultados de análisis de granulometría de las muestras cerámicas y CPN40.

TIPO DE MUESTRA	DIAMETRO MEDIO [ $\mu\text{m}$ ]	PERCENTILES		
		$d(0,1)$	$d(0,5)$	$d(0,9)$
MUESTRA A (TICHOLO)	25,84	3,08	17,27	59,83
MUESTRA B (PRENSA)	15,13	1,46	11,34	34,30
MUESTRA C (CHORIZO ART)	21,65	1,70	16,07	50,62
MUESTRA D (ARTESANAL)	16,81	1,67	13,86	36,68

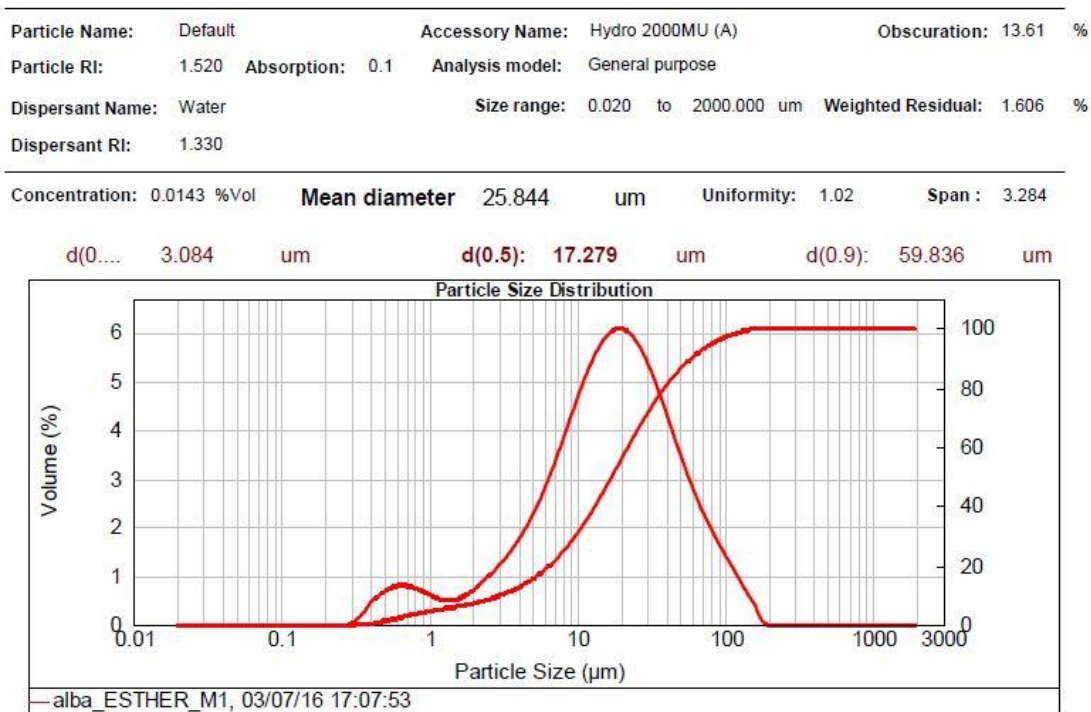
Como se puede observar, la muestra A, presenta un diámetro medio de 25,84  $\mu\text{m}$ . Por otra parte, el 90 % de sus partículas están por debajo de los 59,83  $\mu\text{m}$  y el 50 % presentan un diámetro inferior a 17,27  $\mu\text{m}$ . La grafica queda representada en la Figura 5.1.1.1.

En tanto, la muestra B, presenta un diámetro medio de 15,13  $\mu\text{m}$ . Por otra parte, el 90 % de sus partículas están por debajo de los 34,30  $\mu\text{m}$  y el 50 % presentan un diámetro inferior a 11,34  $\mu\text{m}$ . La grafica queda representada en la Figura 5.1.1.2.

La muestra C, presenta un diámetro medio de 21,65  $\mu\text{m}$ . Por otra parte, el 90 % de sus partículas están por debajo de los 50,62  $\mu\text{m}$  y el 50 % presentan un diámetro inferior a 16,07  $\mu\text{m}$ . La grafica queda representada en la Figura 5.1.1.3.

Mientras que la muestra D, presenta un diámetro medio de 16,81  $\mu\text{m}$ . Por otra parte, el 90 % de sus partículas están por debajo de los 36,68  $\mu\text{m}$  y el 50 % presentan un diámetro inferior a 13,86  $\mu\text{m}$ . Se expone la gráfica en la Figura 5.1.1.4

FIGURA 5.1.1.1. Análisis granulométrico del ladrillo industrial tipo ticholo (muestra A).



58

FIGURA 5.1.1.2. Análisis granulométrico del ladrillo industrial de prensa (muestra B)

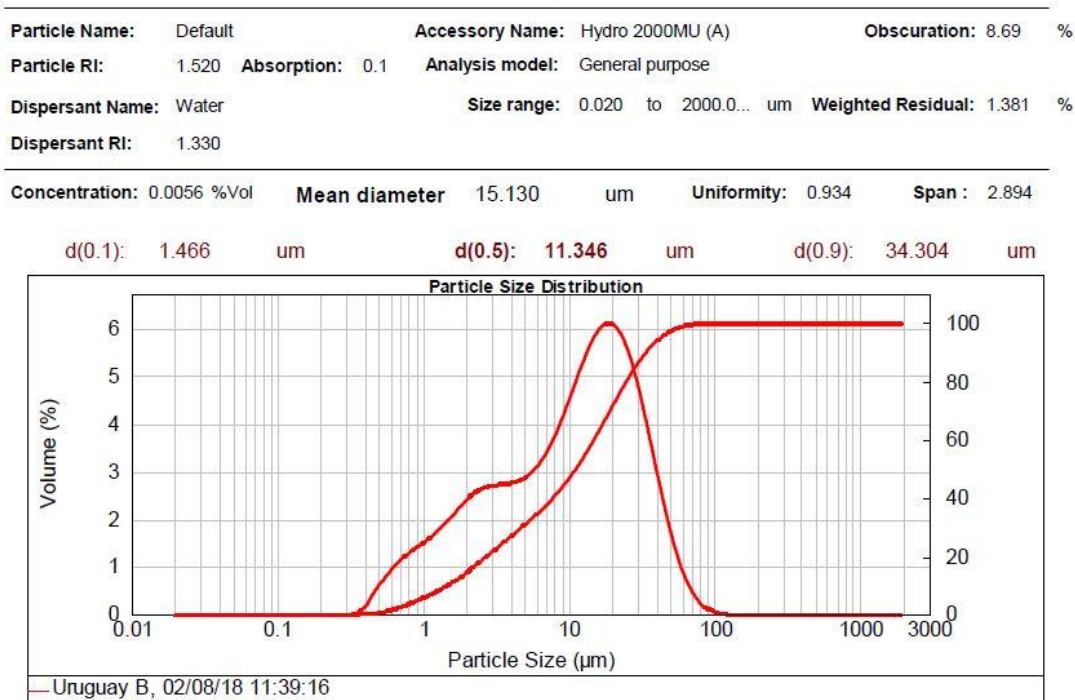
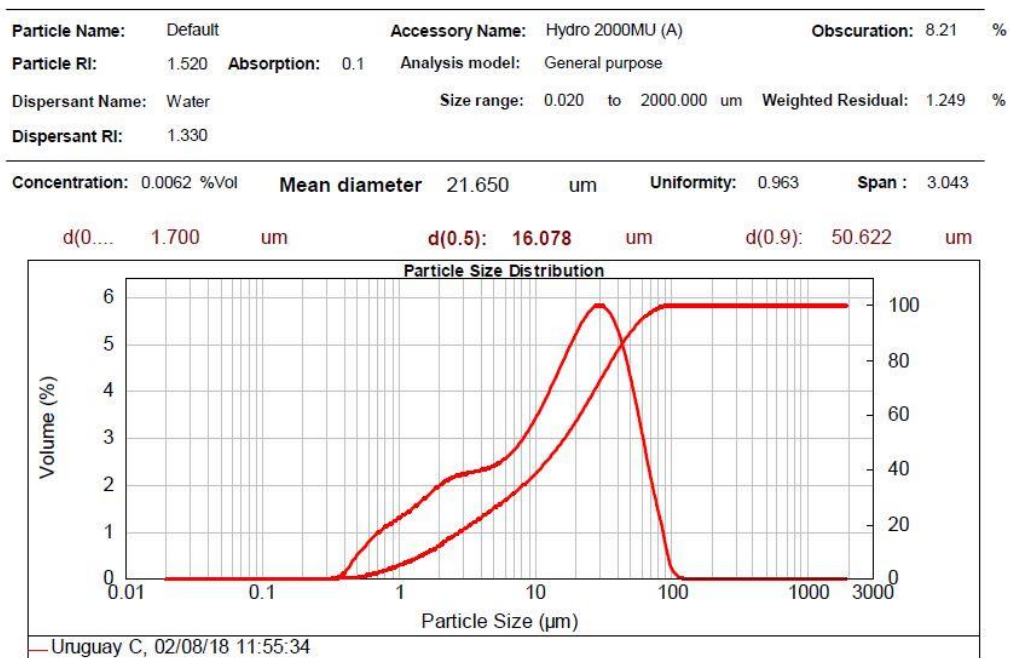
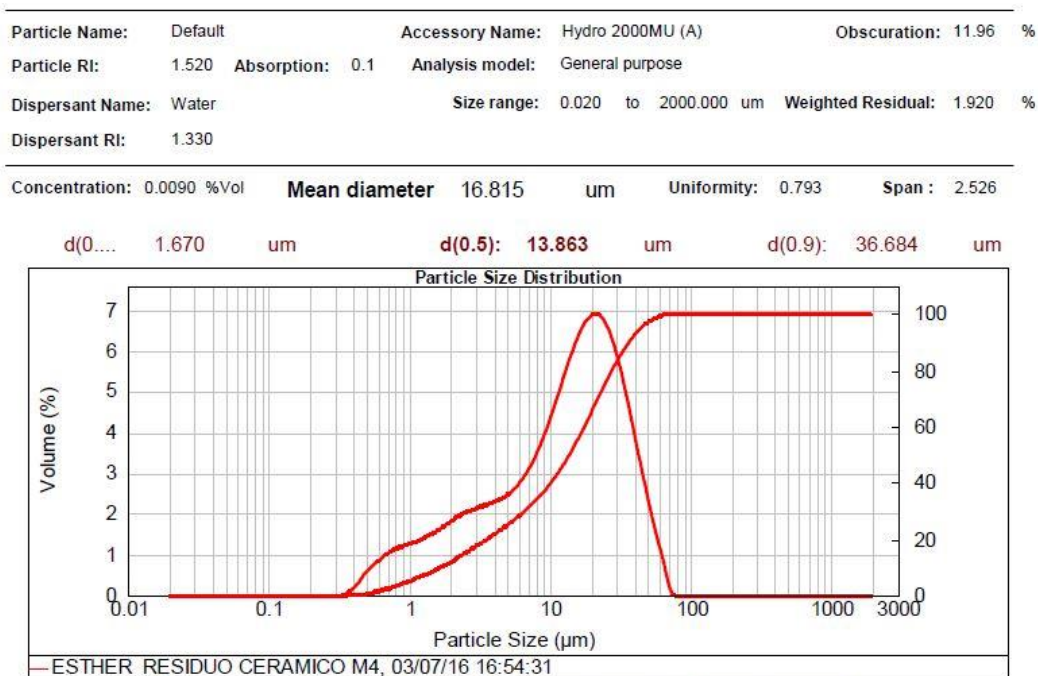


FIGURA 5.1.1.3. Análisis granulométrico del ladrillo artesanal tipo “chorizo” (muestra C).



59

FIGURA 5.1.1.4. Análisis granulométrico del ladrillo artesanal estándar (muestra D).



### 5.1.2. Ensayo de pérdida por calcinación

Según la metodología indicada en el punto 4.3.11. se determinó la pérdida por calcinación en dos porciones de ensayo, codificando cada porción como 1 y 2. Los resultados se expresan en la Tabla 5.1.2, incluida la desviación estándar de cada muestra, que indica qué tan dispersos están los datos con respecto a la media.

Como se observa en la Tabla 5.1.2, la muestra perteneciente al ticholo industrial (muestra A) tuvo una pérdida del  $(1 \pm 0,1)$  % en promedio mientras que el ladrillo de prensa industrial (muestra B) presentó una pérdida en promedio del  $(0,6 \pm 0,1)$  %. Tanto el ladrillo artesanal “chorizo” (muestra C) y el ladrillo artesanal estándar (muestra D) presentaron una pérdida del  $(4,1 \pm 0,1)$  % y  $(0,6 \pm 0,1)$  % respectivamente.

**TABLA 5.1.2.** Resultados del ensayo por pérdida de calcinación.

MUESTRA	MASA INICIAL [g]	MASA REMANENTE [g] a 950 +- 50° C	PERDIDA POR CALCINACION [%]	MEDIA [%]	DESUDIO ESTANDAR [%]
MUESTRA A 1 (TICHOLO)	1,2976	1,2864	0,9	1	0,1
MUESTRA A 2 (TICHOLO)	1,2058	1,1942	1		
MUESTRA B 1 (PRENSA)	1,1868	1,179	0,7	0,6	0,1
MUESTRA B 2 (PRENSA)	1,2389	1,233	0,5		
MUESTRA C 1 (CHORIZO)	1,3731	1,3181	4	4,1	0,1
MUESTRA C 2 (CHORIZO)	1,2015	1,1527	4,1		
MUESTRA D 1 (ART. ESTANDAR)	1,2045	1,1983	0,5	0,6	0,1
MUESTRA D 2 (ART. ESTANDAR)	1,2085	1,2014	0,6		

### 5.1.3. Análisis por difracción de rayos X (DRX)

El estudio por Difracción de Rayos X (DRX) proporciona información sobre la mineralogía de las muestras cerámicas (serie 100 %) y de las pastas mixtas compuestas de cemento y adición cerámica. Los resultados de la caracterización por método de difracción de rayos X quedan expresados en la Tablas 5.1.3.1 a 5.1.3.4 y los difractogramas correspondientes quedan graficados en las figuras 5.1.3.1 a 5.1.3.8.

Los resultados presentan un listado de los compuestos identificados en los diferentes difractogramas de rayos X. Debido a la capacidad del equipo, los diferentes compuestos no pudieron ser cuantificados.

En la tabla 5.1.3.1. Podemos observar la presencia de óxido de silicio en todas las muestras cerámicas.

En los resultados del análisis por difracción de las pastas de con adición de un 10 % (Tabla 5.1.3.2), 15 % (Tabla 5.1.3.2) y 30 % (Tabla 5.1.3.4), podemos observar la presencia de óxido de silicio, portlandita y en el caso de las muestras con adición del 15 % se detectaron picos de etringita en las muestras C y D, pudiendo evidenciar de la reacción puzolánica entre el cemento y la cerámica.

**TABLA 5.1.3.1.** Análisis por difracción de rayos X. Serie 100 %. Muestras cerámicas.

SERIE 100 %	FORMULA	MUESTRA A	MUESTRA B	MUESTRA C	MUESTRA D	MUESTRA E
OXIDO DE SILICIO	Si O <sub>2</sub>	SI	SI	SI	SI	SI
SILICATO ALUMINIO Y CALCIO	Ca0.88 Å0.12 Al1.77 Si2.23 O8	SI	SI	NO	SI	NO

**TABLA 5.1.3.2.** Análisis por difracción de rayos X. Serie 90 % Pastas con adición cerámica.

SERIE 90 %		MUESTRA A	MUESTRA B	MUESTRA C	MUESTRA D
PORTLANDITA	Ca ( O H ) <sub>2</sub>	SI	SI	SI	SI
OXIDO DE SILICIO	Si O <sub>2</sub>	SI	SI	SI	SI
SILICATO DE CALCIO	Ca <sub>2</sub> Si O <sub>4</sub>	SI	SI	NO	NO
SILICATO DE CALCIO HIDRATADO	Ca1.5 Si O3.5 ·x H2 O	NO	NO	SI	SI
SILICATO DE POTASIO Y MAGNESIO	K2 Mg Si O4	NO	NO	SI	NO

**TABLA 5.1.3.3.** Análisis por difracción de rayos X. Serie 85 % Pastas con adición cerámica.

SERIE 85%		MUESTRA A	MUESTRA B	MUESTRA C	MUESTRA D
PORTLANDITA	Ca ( O H ) <sub>2</sub>	SI	SI	SI	SI
OXIDO DE SILICIO	Si O <sub>2</sub>	SI	SI	SI	SI
CALCITA	Mg.064 Ca.936 ) ( C O3 )	SI	SI	NO	NO
SILICATO DE CALCIO	Ca <sub>2</sub> Si O <sub>4</sub>	NO	NO	SI	SI
ETRINGITA	Ca6 ( Al ( O H )6 )2 ( S O4 )3 ( H2 O )26	NO	NO	SI	SI

**TABLA 5.1.3.4.** Análisis por difracción de rayos X. Serie 70 % Pastas con adición cerámica.

SERIE 70 %		MUESTRA A	MUESTRA B	MUESTRA C	MUESTRA D
PORTLANDITA	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	SI	SI	SI	SI
OXIDO DE SILICIO	$\text{SiO}_2$	SI	SI	SI	SI
HIDROXIDO DE SILICATO DE SODIO	$\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	SI	NO	SI	SI

**5.1.3.1. Graficas del análisis por difracción de rayos X. Serie 0 %. Muestras cerámicas.**

**FIGURA 5.1.3.1.** Resultados DRX. Cerámico tipo A

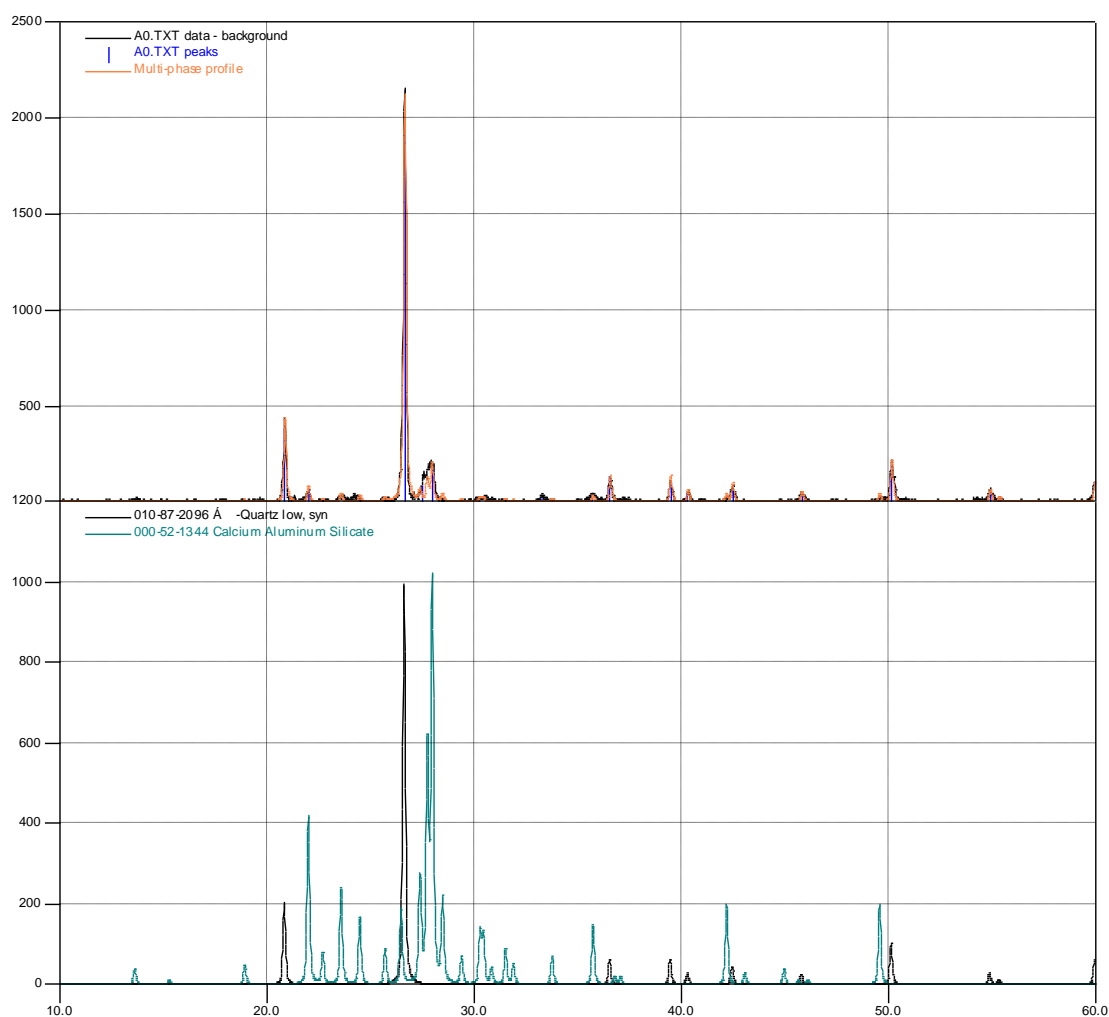


FIGURA 5.1.3.2. Resultados DRX. Cerámico tipo B

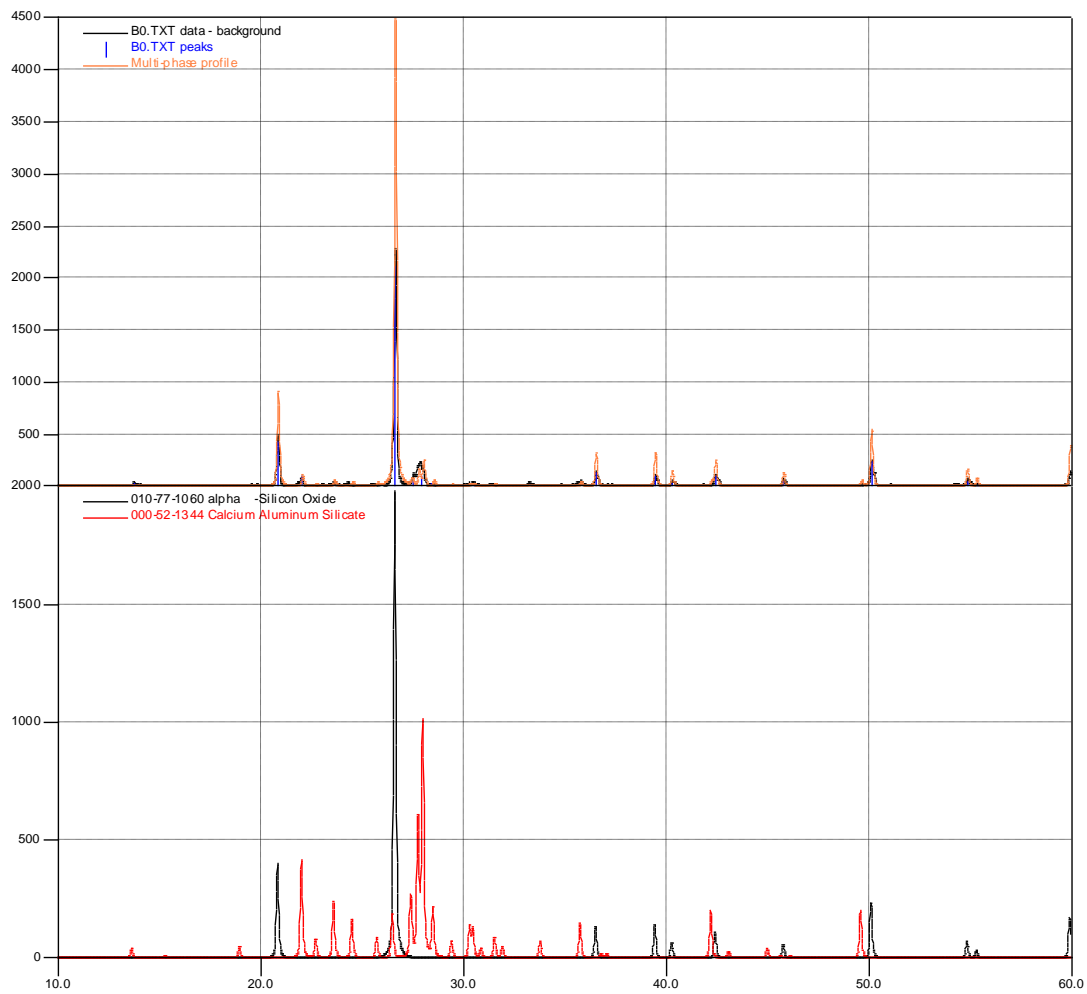


FIGURA 5.1.3.3. Resultados DRX. Cerámico tipo C

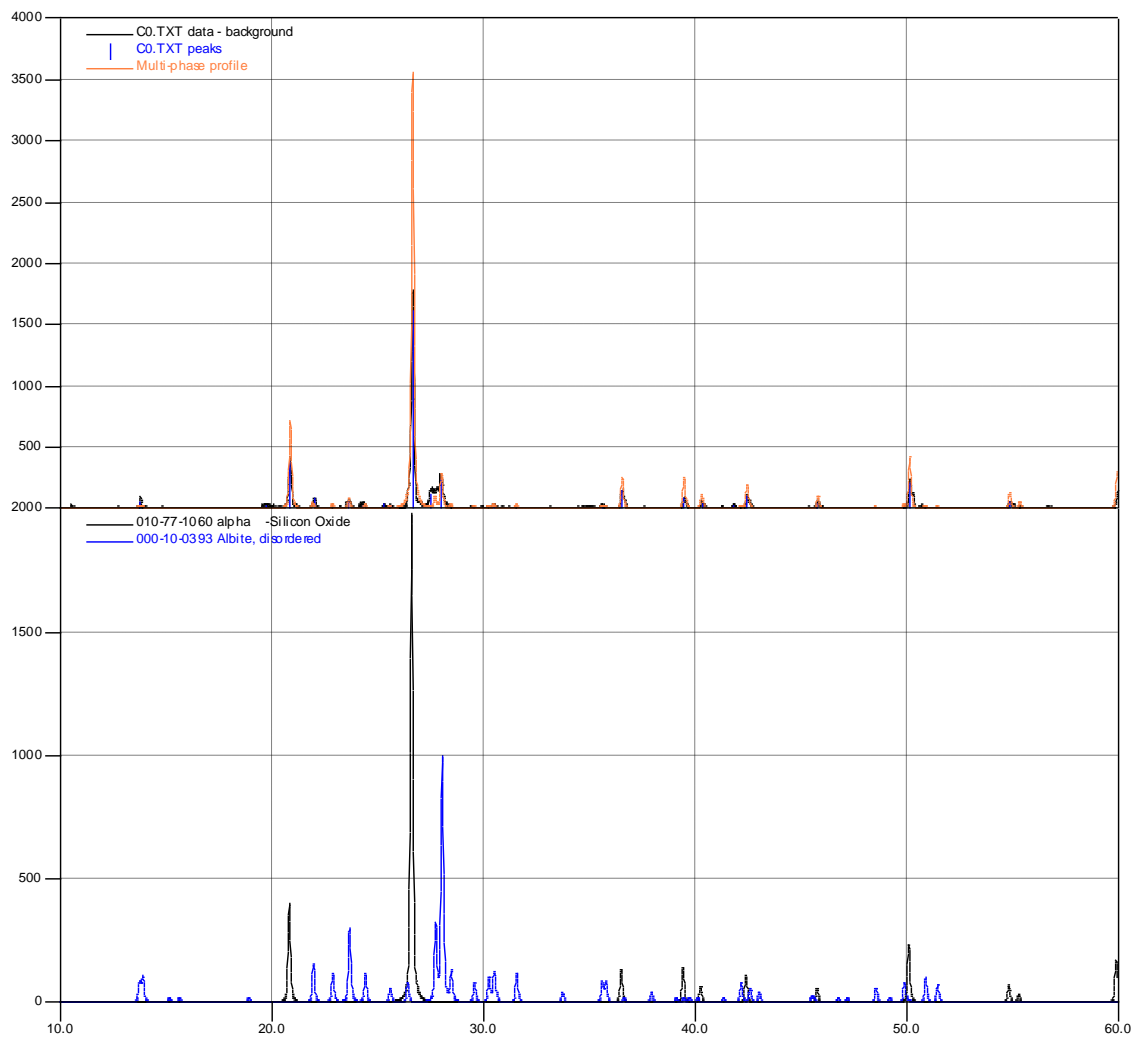
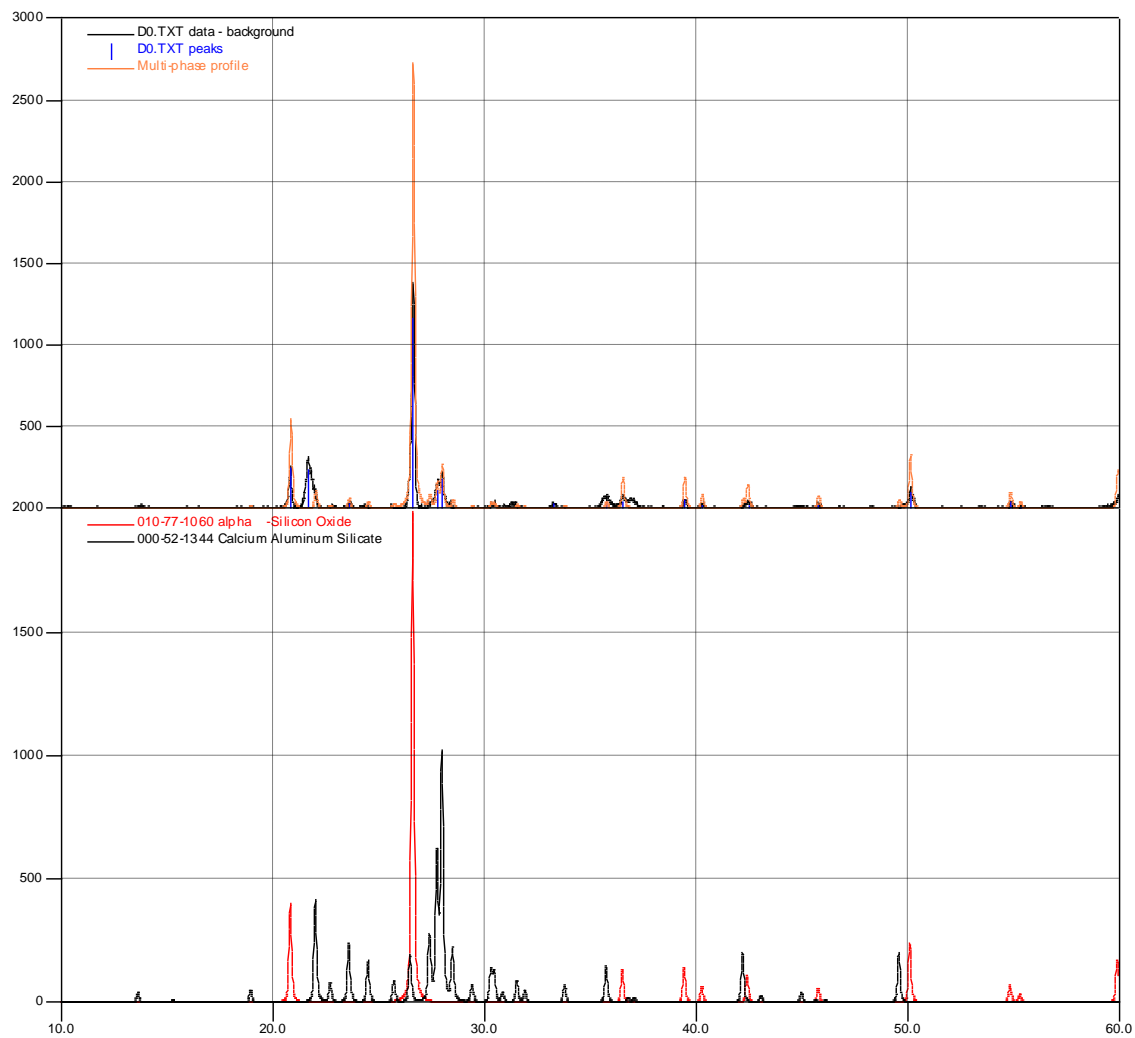




FIGURA 5.1.3.4. Resultados DRX. Cerámico tipo D



### 5.1.3.2. Graficas del análisis por difracción de rayos X. Serie 10 % Pastas con adición cerámica.

FIGURA 5.1.3.5. Resultados DRX. Cerámico tipo A

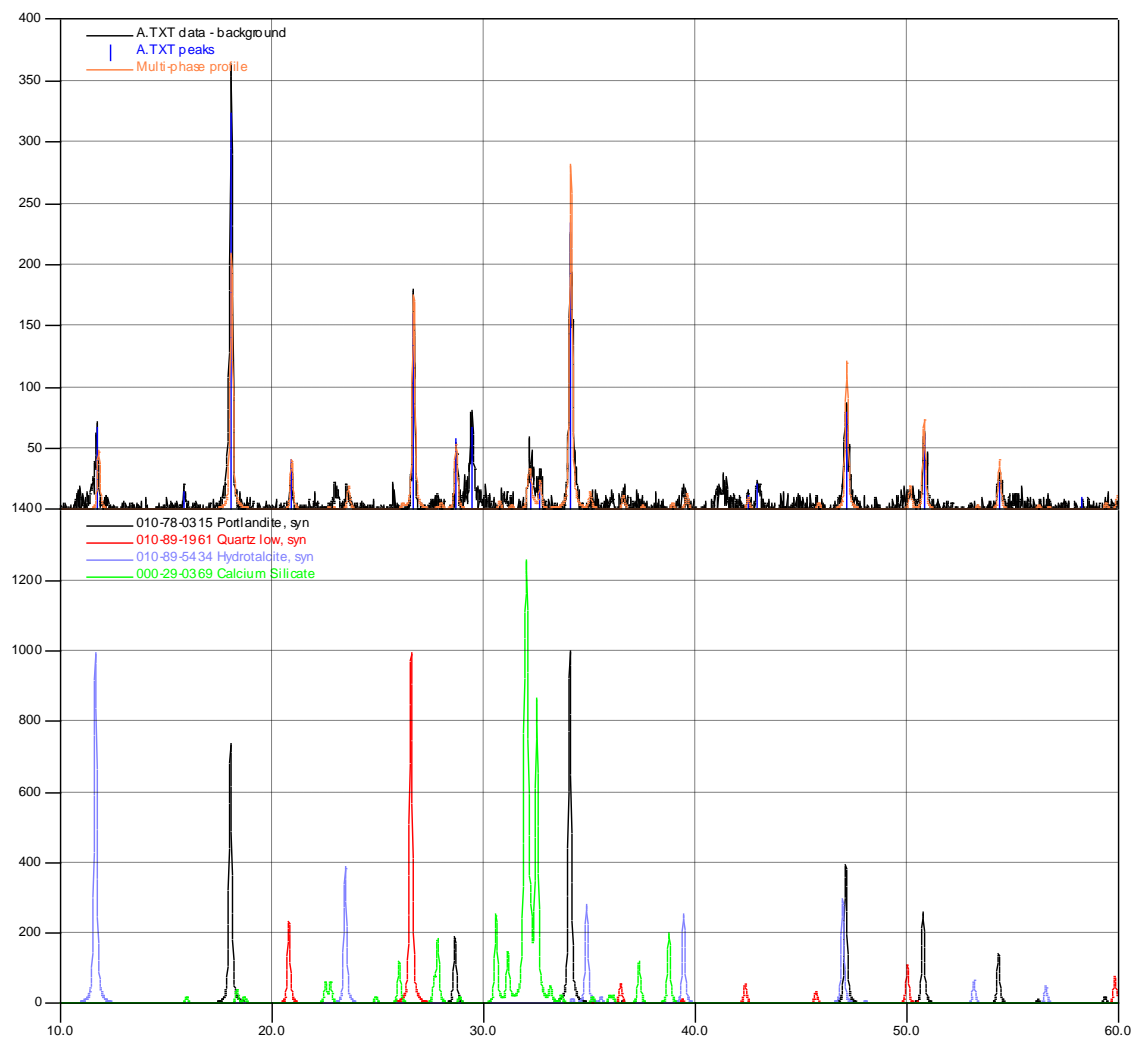


FIGURA 5.1.3.6. Resultados DRX. Cerámico tipo B

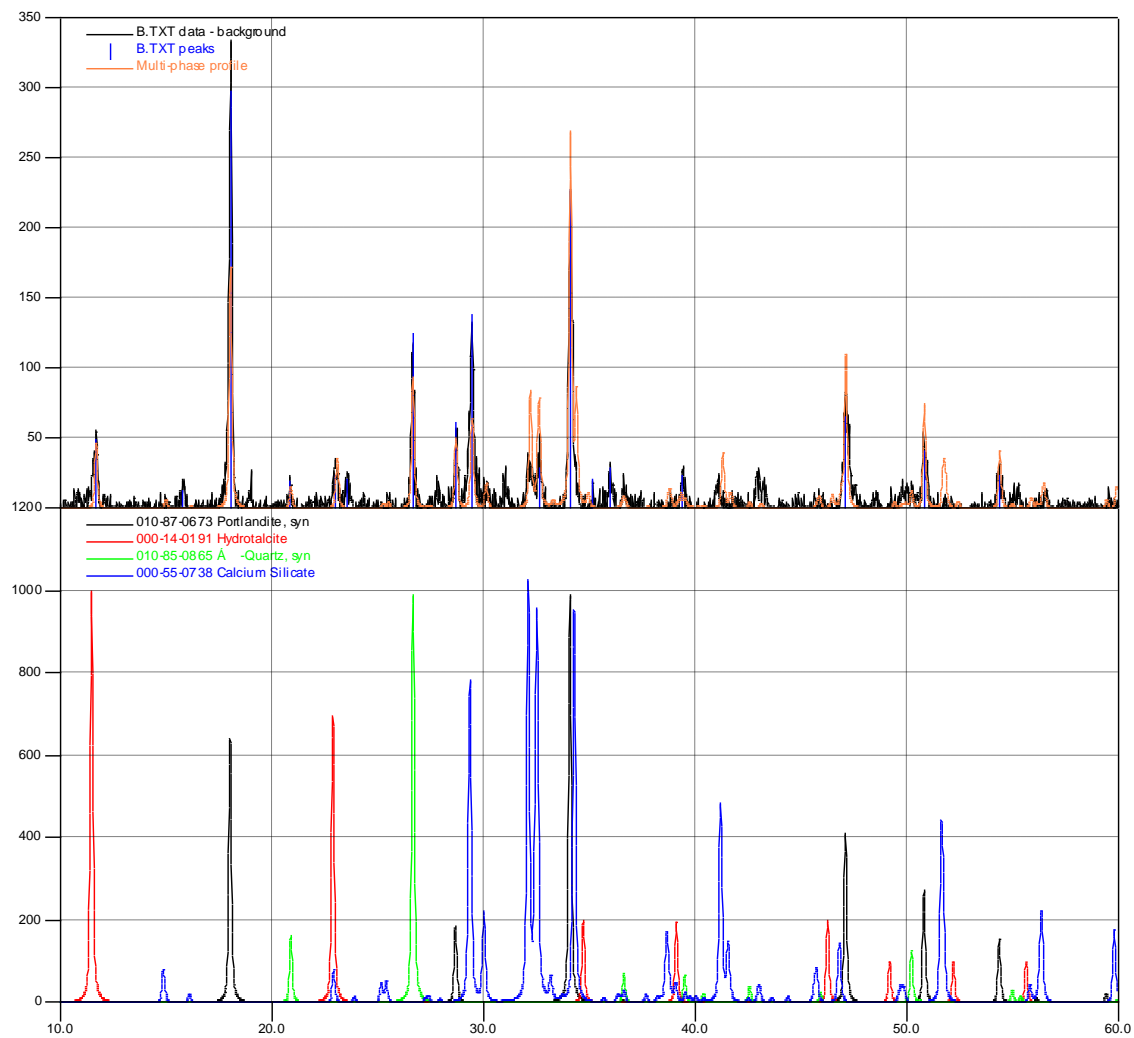


FIGURA 5.1.3.7. Resultados DRX. Cerámico tipo C

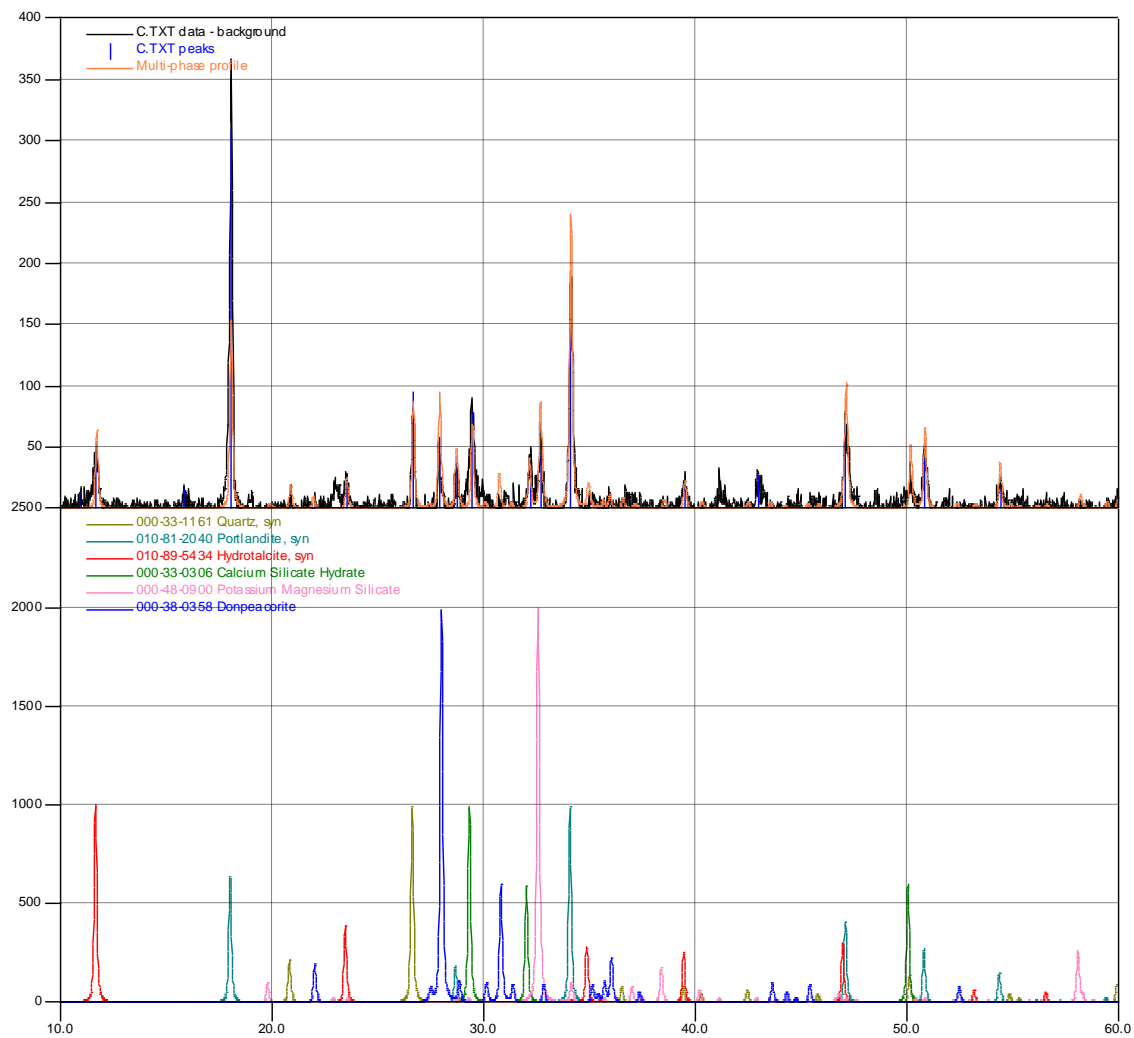
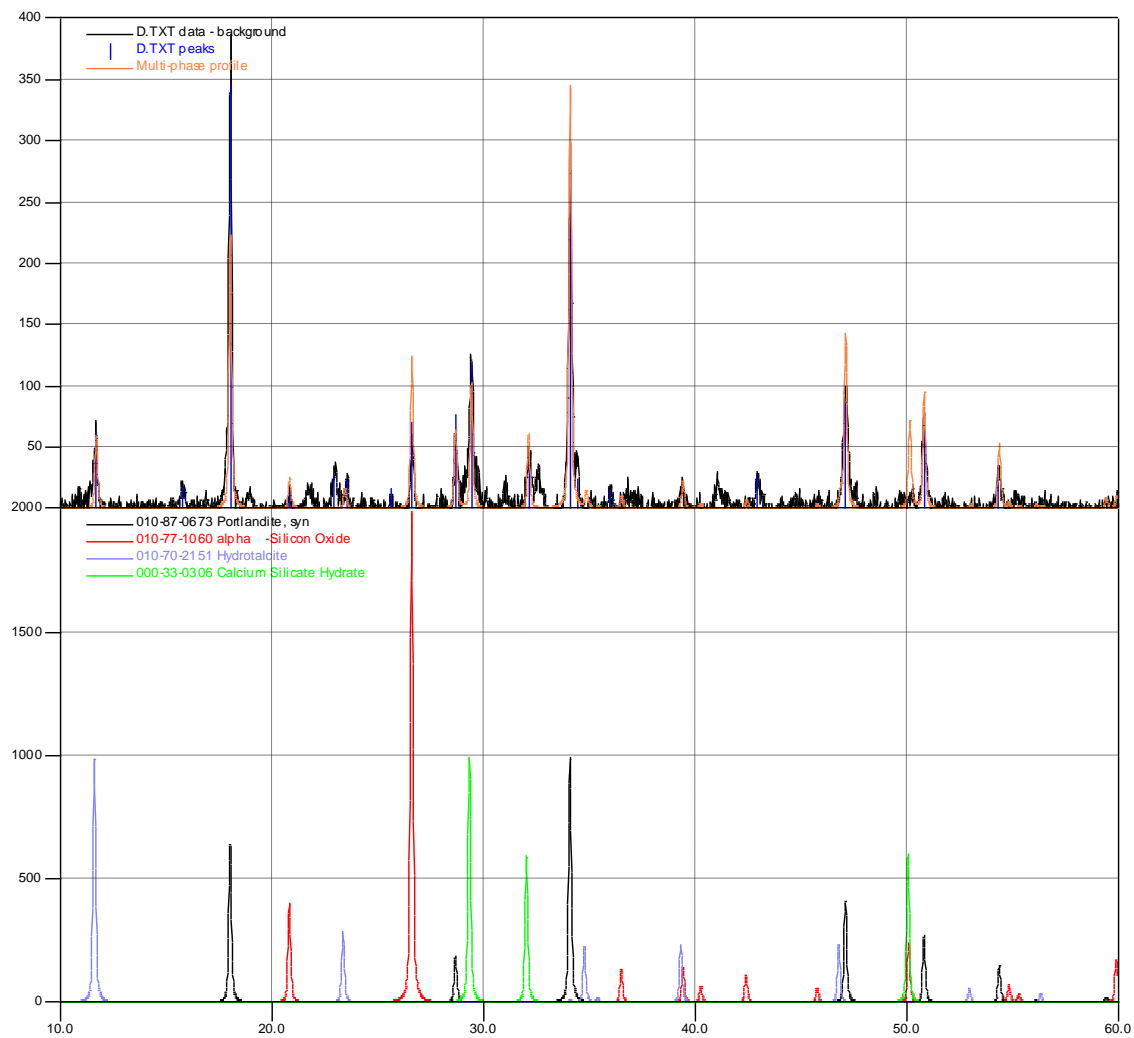


FIGURA 5.1.3.8. Resultados DRX. Cerámico tipo D



### 5.1.3.3. Graficas del análisis por difracción de rayos X. Serie 15 % Pastas con adición cerámica.

FIGURA 5.1.3.9. Resultados DRX. Cerámico tipo A

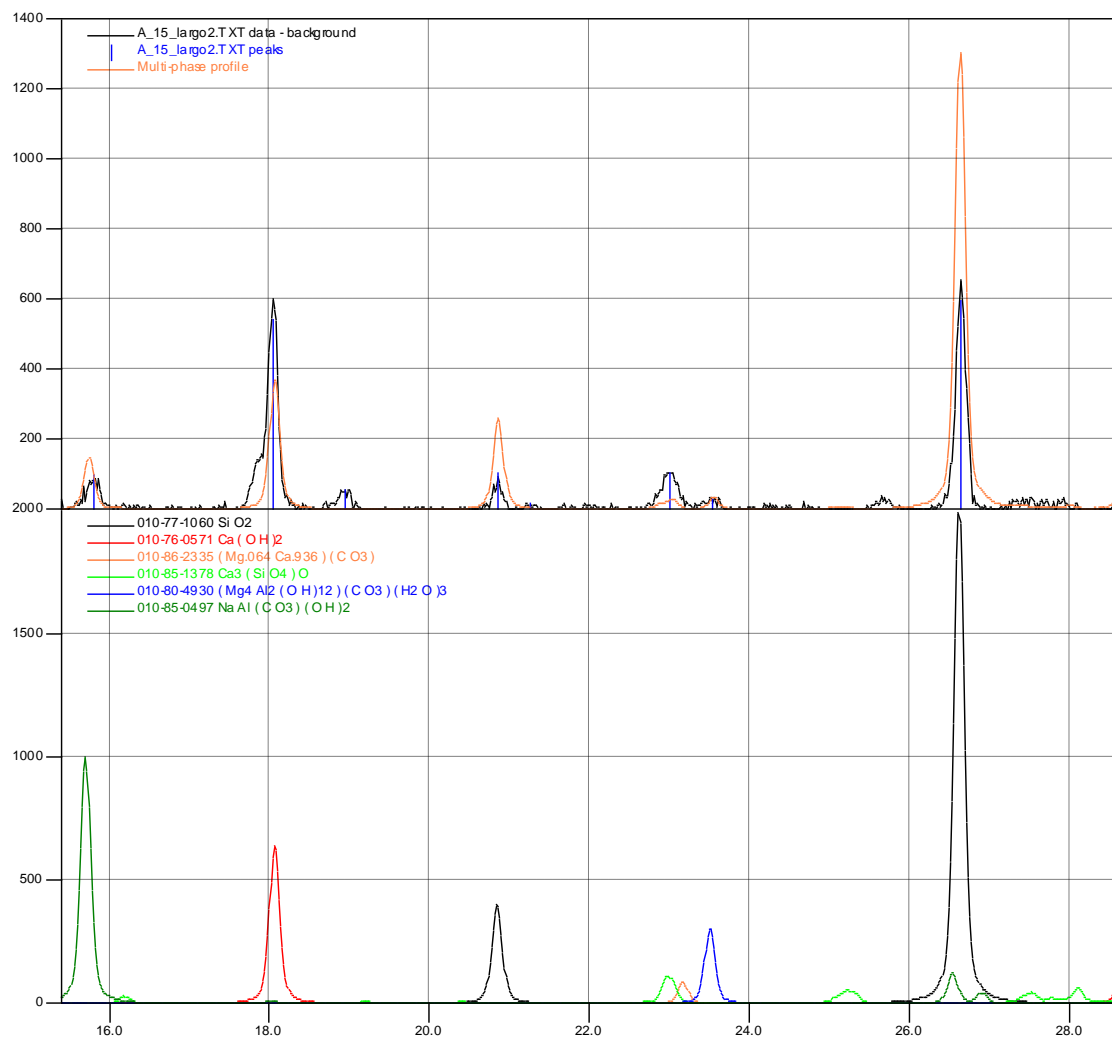


FIGURA 5.1.3.10. Resultados DRX. Cerámico tipo B

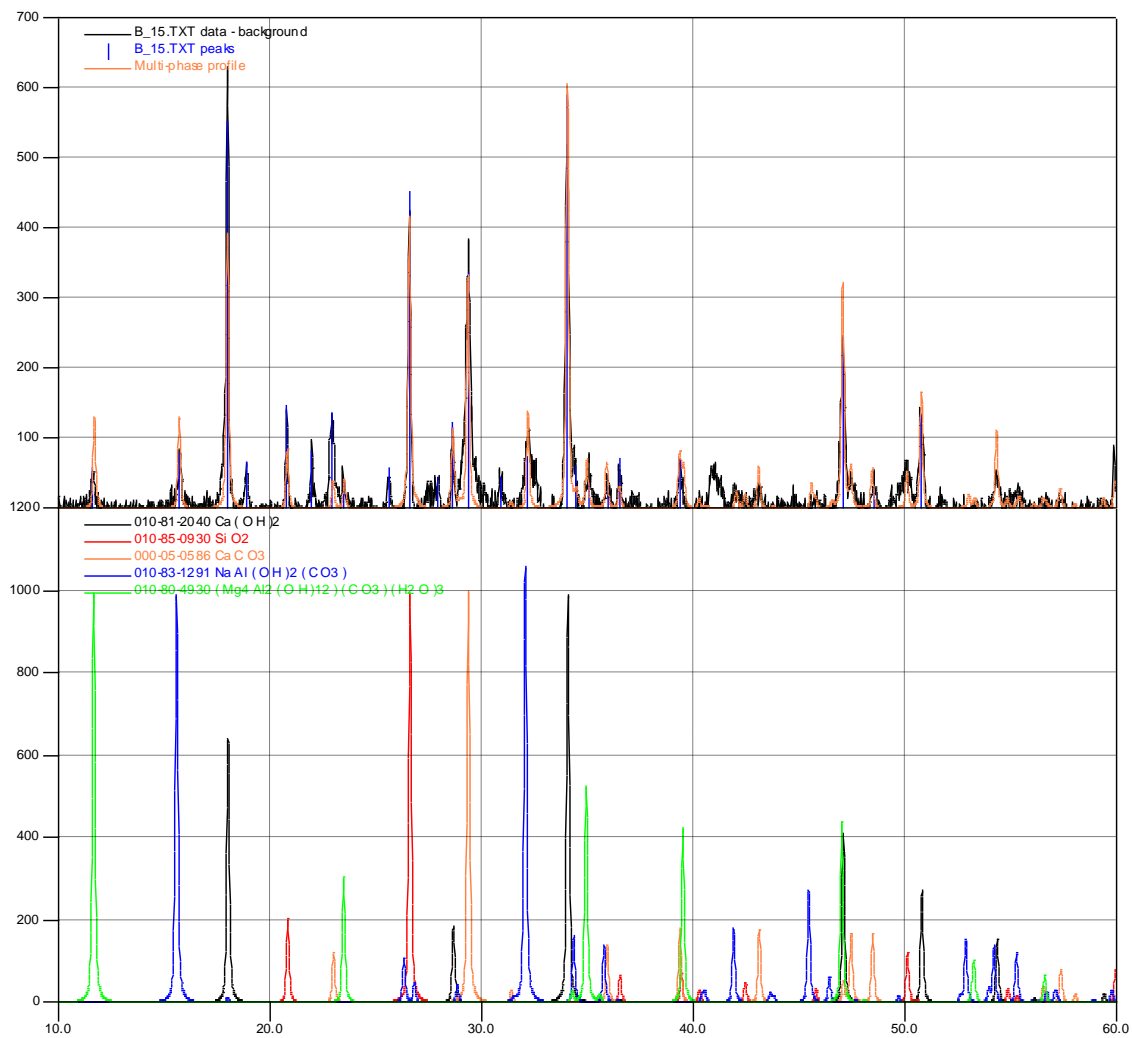


FIGURA 5.1.3.11. Resultados DRX. Cerámico tipo C

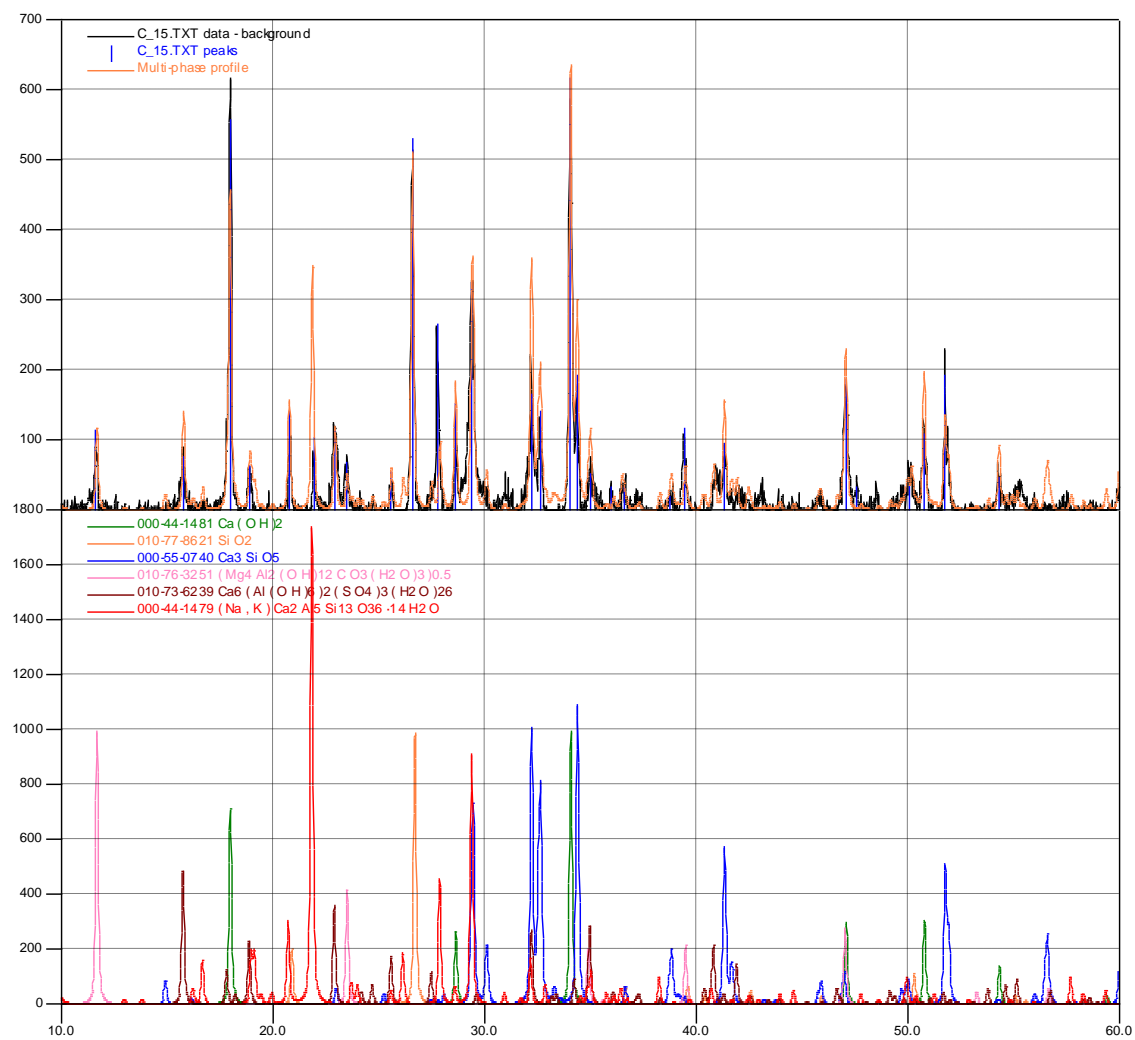
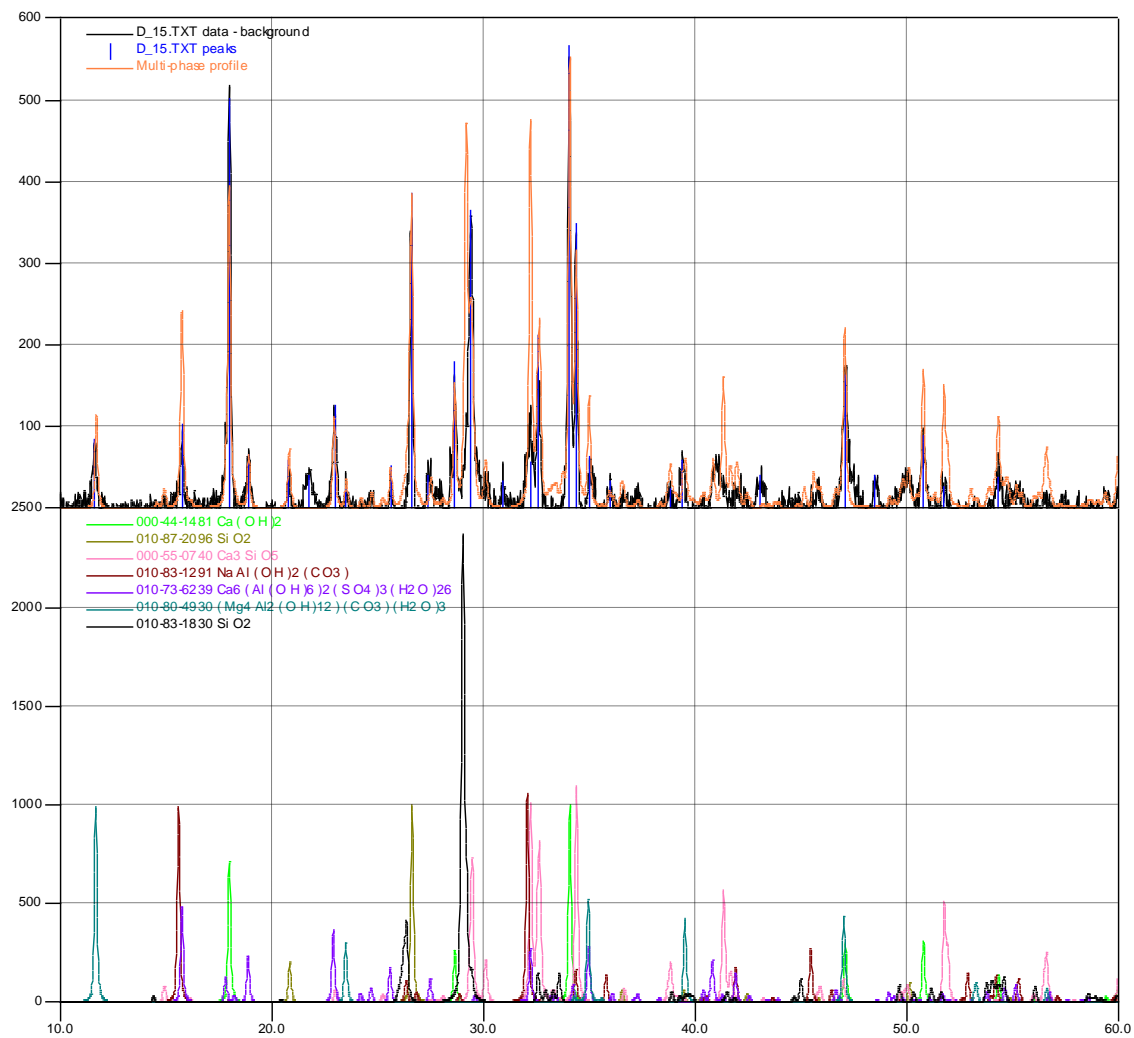




FIGURA 5.1.3.12. Resultados DRX. Cerámico tipo D



### 5.1.3.4. Graficas del análisis por difracción de rayos X. Serie 30 % Pastas con adición cerámica.

FIGURA 5.1.3.13. Resultados DRX. Cerámico tipo A

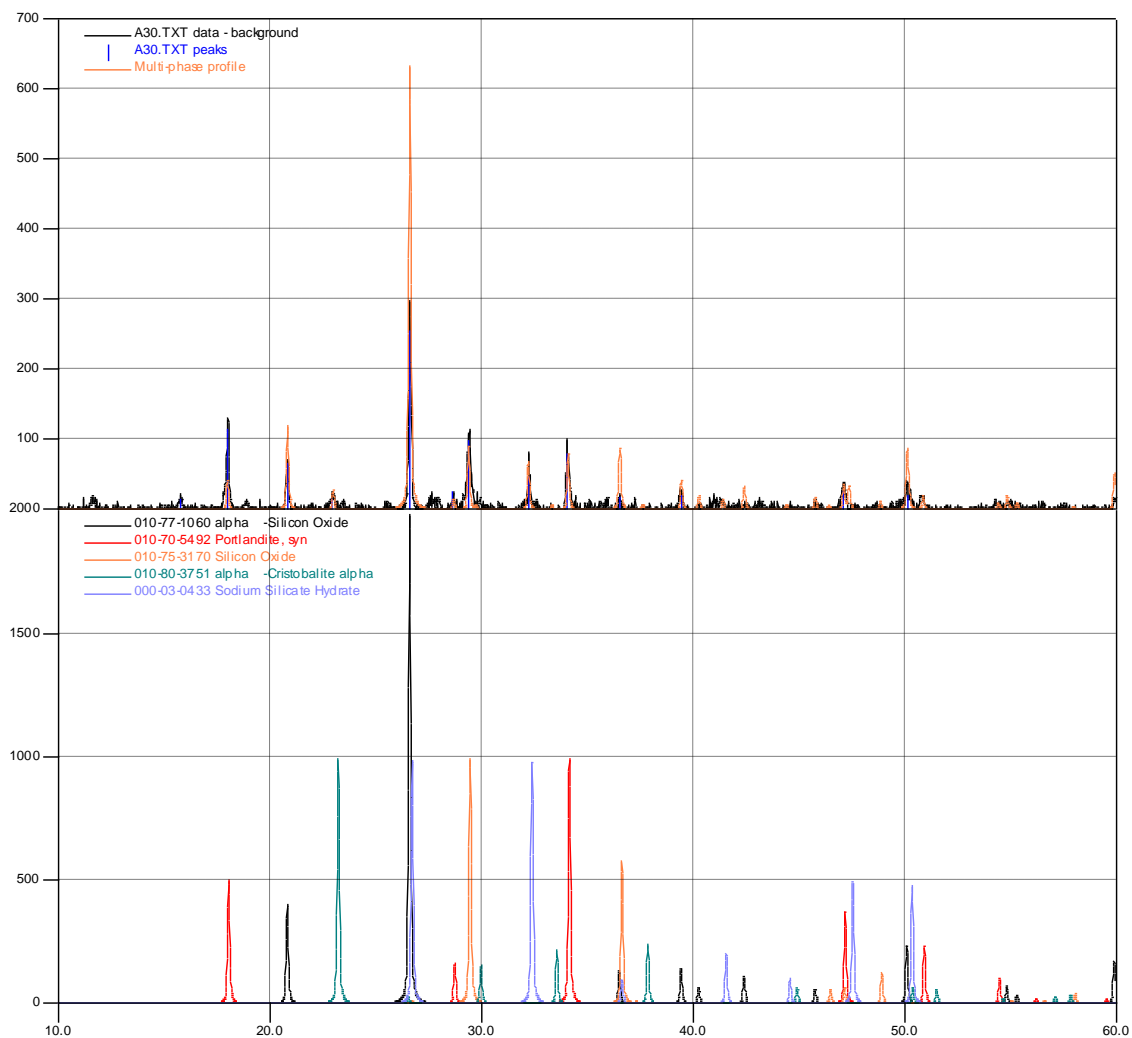


FIGURA 5.1.3.14. Resultados DRX. Cerámico tipo B

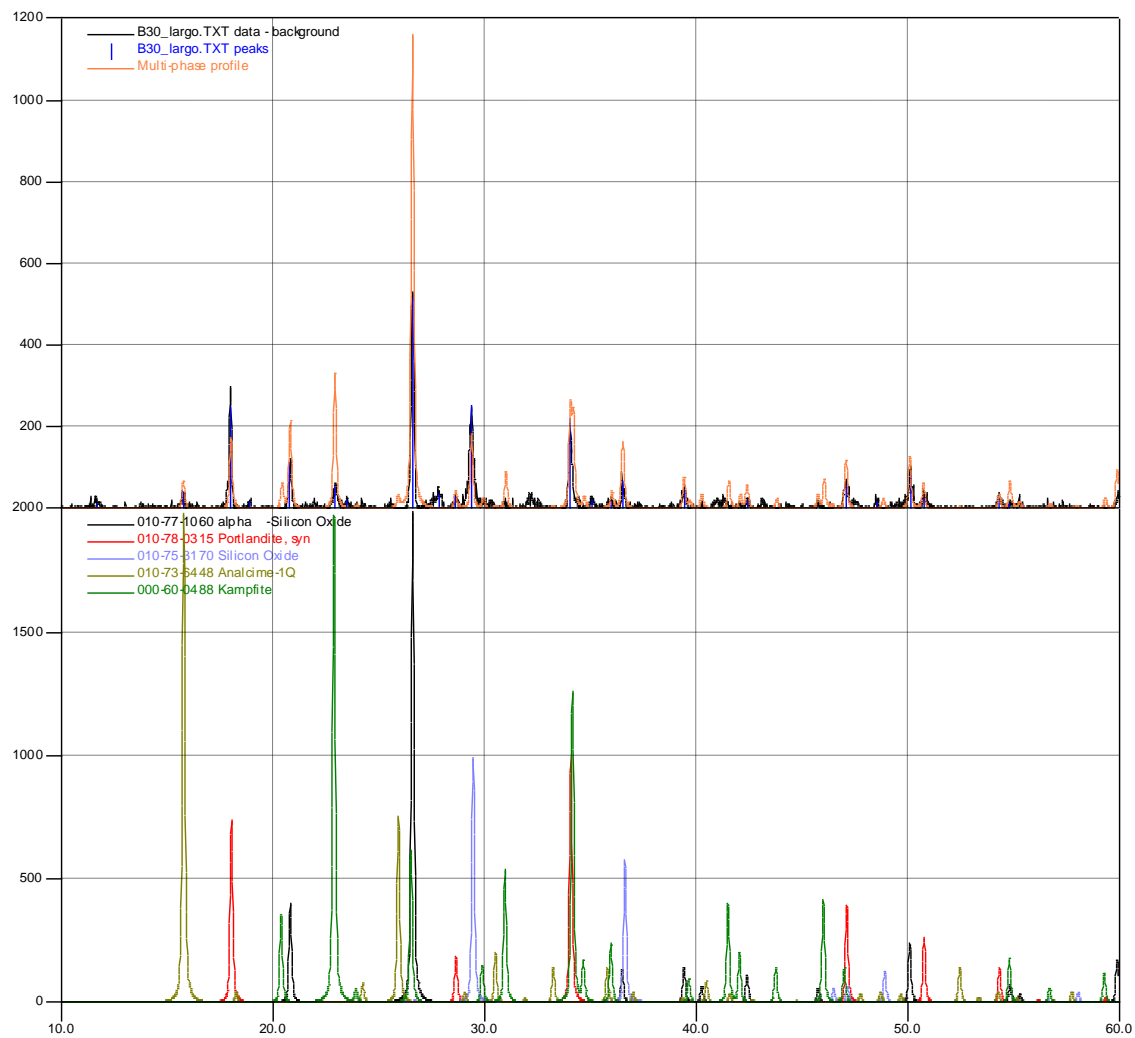


FIGURA 5.1.3.15. Resultados DRX. Cerámico tipo C

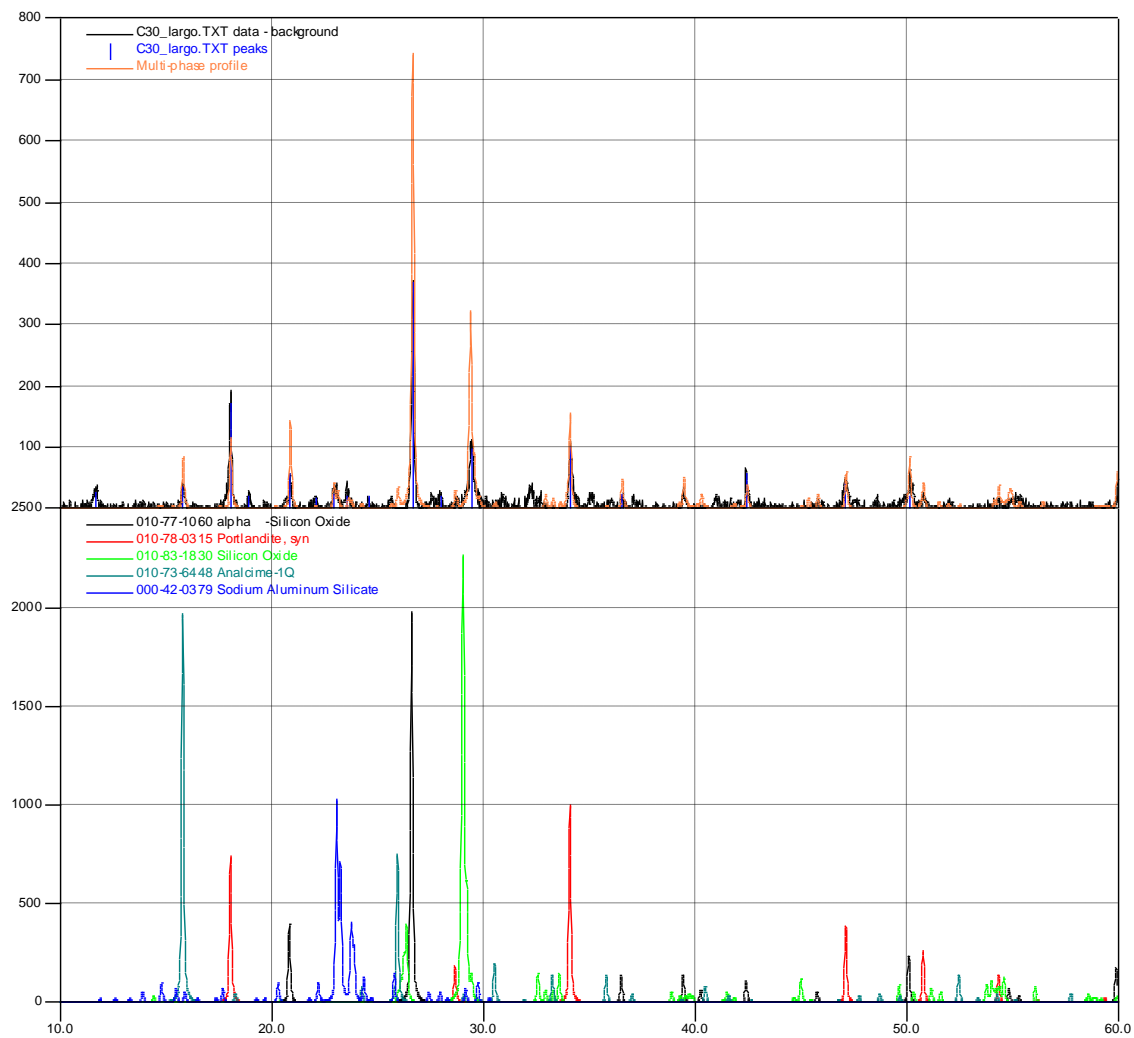
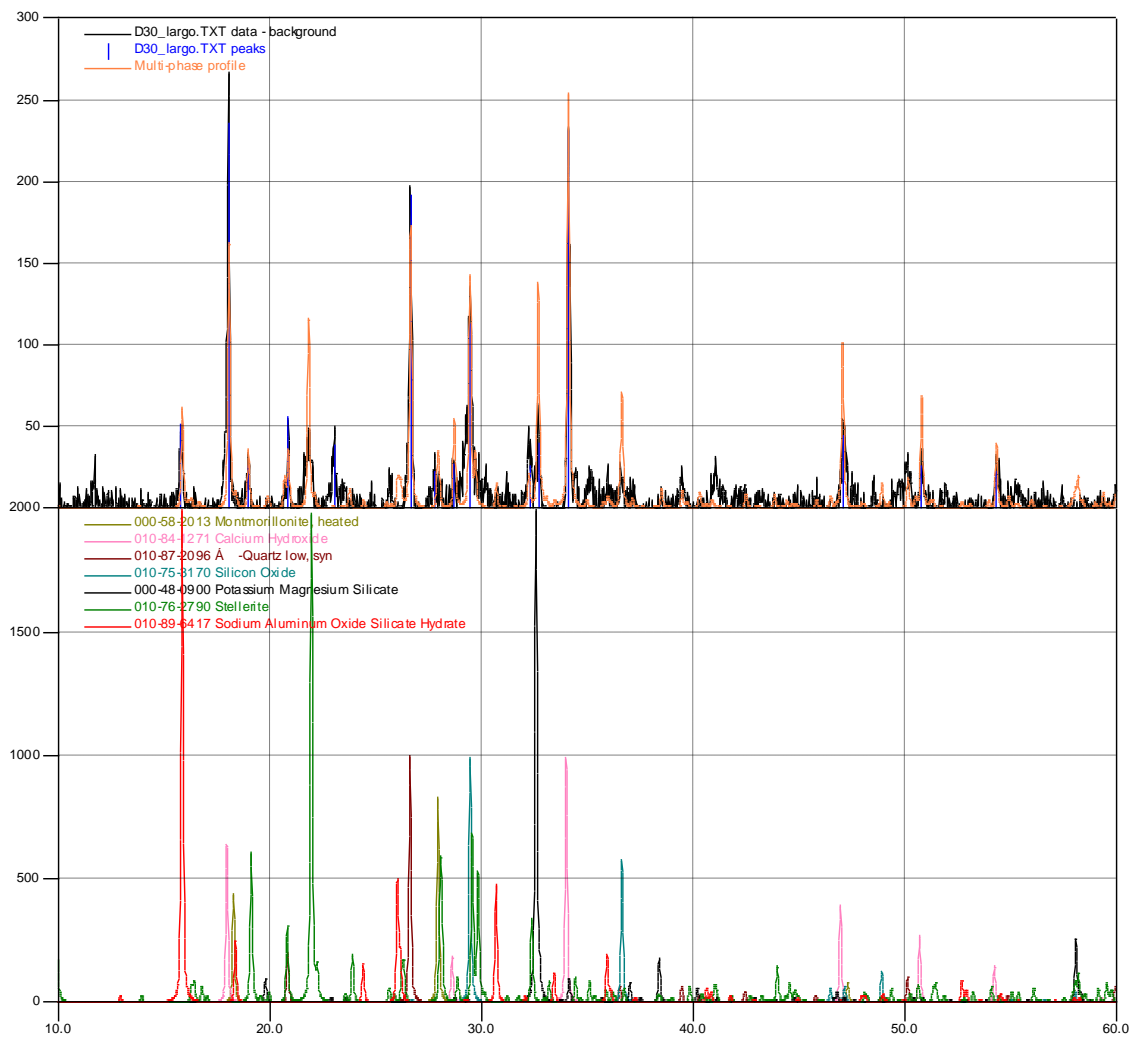


FIGURA 5.1.3.16. Resultados DRX. Cerámico tipo D



#### 5.1.4. Análisis por fluorescencia de rayos X (FRX)

La Fluorescencia de Rayos X (FRX) fue utilizada para determinar la composición química de los elementos químicos en pastas cementicias con adición cerámica y en las muestras cerámicas se calculó además su composición química en forma de óxidos ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), como se presenta en la Tabla 5.4.1.2.

Los resultados de la caracterización por método de fluorescencia de rayos X para las muestras cerámicas (Tabla 5.1.4.1) y para las pastas de 10 %, 15% y 30 % quedan expresados en las Tablas 5.1.4.3, 5.1.4.4 y 5.1.4.5.

En la Tabla 5.1.4.1. se observa que dentro de estas proporciones de sustitución (0 %), que en las muestras A y B, una presencia de silicio en el orden de  $(35,84 \pm 1,72)$  % y  $(33,97 \pm 7,13)$  % respectivamente. Mientas que las muestras C, D y E, presentan un  $(41,99 \pm 2,92)$  %,  $(36,56 \pm 5,57)$  % y  $(37,06 \pm 6,84)$  %. La presencia de calcio en las muestras anteriormente mencionadas la media nunca supera el  $(2,32 \pm 2,63)$  % (muestra D).

Cabe destacar que la presencia de aluminio en la muestra A es  $(10,67 \pm 0,15)$  %, la de la muestra B es  $(8,64 \pm 5,22)$  %, la muestra C contiene un  $(4,36 \pm 1,01)$  % y la muestras E y F, un  $(4,68 \pm 4,97)$  % y  $(1,33 \pm 0,14)$  % respectivamente.

Se puede considerar también la presencia de hierro en las muestras A y B de un  $(9,22 \pm 1,35)$  % y  $(5,87 \pm 2,60)$  %. En el resto de las muestras, el valor de hierro se mantiene debajo del 4 % y el resto de los elementos aparecen en porcentajes menores al 1 %.

**TABLA 5.1.4.1.** Análisis por fluorescencia de rayos X. Serie 0 %. Muestras cerámicas.

SERIE/ELEMENTO	Mg	Al	Si	K	Fe	Na	O	Ca	C	S	Mo	Cu
<b>SERIE 0 %</b>												
A	1,12	10,78	37,06	2,36	10,18	-	38,5					
A	1,18	10,56	34,62	1,93	8,27	0,83	42,61					
<b>MEDIA</b>	<b>1,15</b>	<b>10,67</b>	<b>35,84</b>	<b>2,145</b>	<b>9,225</b>	<b>0,83</b>	<b>40,56</b>					
DESVIACION ESTANDAR	0,0424	0,156	1,725	0,304	1,351	-	2,906					
B	0,59	4,91	39,01	0,98	4,03	0,63	49,11	0,74				
B	1,34	12,37	28,92	2,32	7,72	1,24	43,46	2,64				
<b>MEDIA</b>	<b>0,965</b>	<b>8,64</b>	<b>33,97</b>	<b>1,65</b>	<b>5,875</b>	<b>0,94</b>	<b>46,29</b>	<b>1,69</b>				
DESVIACION ESTANDAR	0,5303	5,275	7,135	0,948	2,609	0,43	3,995	1,344				
C	0,41	3,65	44,05	0,69	3,36	-	41,29	0,69	5,85			
C	0,6	5,08	39,92	1,05	4,58	0,41	44,03	1,12	3,22			
<b>MEDIA</b>	<b>0,505</b>	<b>4,365</b>	<b>41,99</b>	<b>0,87</b>	<b>3,97</b>	<b>0,41</b>	<b>42,66</b>	<b>0,905</b>	<b>4,535</b>			
DESVIACION ESTANDAR	0,1344	1,011	2,92	0,255	0,863	-	1,937	0,304	1,86			
D	-	11,12	32,61	0,48	-	5,02	44,22	2,72	3,82			
D	0,53	4,05	40,5	0,98	3,27	0,48	41,92	0,45	7,83			
<b>MEDIA</b>	<b>0,53</b>	<b>7,585</b>	<b>36,56</b>	<b>0,73</b>	<b>3,27</b>	<b>2,75</b>	<b>43,07</b>	<b>1,585</b>	<b>5,825</b>			
DESVIACION ESTANDAR	-	4,999	5,579	0,354	-	3,21	1,626	1,605	2,835			
ERROR ESTANDAR	-	3,535	3,945	0,25	-	2,27	1,15	1,135	2,005			
E	0,84	8,2	32,22	2,29	3,71	1,62	42,44	4,19	4,49			
E	-	1,17	41,9		1,1	0,27	51,05	0,46	4,04			
<b>MEDIA</b>	<b>0,84</b>	<b>4,685</b>	<b>37,06</b>	<b>2,29</b>	<b>2,405</b>	<b>0,95</b>	<b>46,75</b>	<b>2,325</b>	<b>4,265</b>			
DESVIACION ESTANDAR	-	4,971	6,845	-	1,846	0,95	6,088	2,638	0,318			

F	0,9	1,43	6,57	2,22	3,11	-	23,32	59,26	2,11	1,07
F	0,6	1,23	7,24	3,29	1,97	-	31,46	49,58	1,96	2,67
<b>MEDIA</b>	<b>0,75</b>	<b>1,33</b>	<b>6,905</b>	<b>2,755</b>	<b>2,54</b>	<b>-</b>	<b>27,39</b>	<b>54,42</b>	<b>2,035</b>	<b>1,87</b>
DESVIACION ESTANDAR	0,2121	0,141	0,474	0,757	0,806	-	5,756	6,845	0,106	1,13

En la Tabla 5.4.1.2. se puede observar que el material en estudio presenta un elevado contenido en SiO<sub>2</sub> (70 – 80 %), lo que genera una buena expectativa para su aplicación como adición cerámica activa en conglomerantes a base de cemento Portland.

Además, se aprecia un porcentaje considerable (12 – 15 %) de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, que también puede contribuir de forma positiva con la formación de nuevos productos hidratados. Mientras que todas las muestras presentan un porcentaje aproximado al 5 % en Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

**TABLA 5.4.1.2.** Calculo de óxidos. Serie 0 % de adición cerámica

TIPO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
A	14,5 % ± 1,5 %	77,4 % ± 8 %	5,1 % ± 0,5 %
B	14,1 % ± 1,5 %	77,3 % ± 8 %	4,9 % ± 0,5 %
C	14,2 % ± 1,5 %	71,6 % ± 7 %	4,7 % ± 0,5 %
D	12,4 % ± 1 %	80,5 % ± 8 %	4,8 % ± 0,5 %

79

En la Tabla 5.1.4.3. se aprecia que en las muestras con 10 % de sustitución de cemento por cerámico, se destaca la presencia de calcio, en porcentajes de (40,74 ± 1,62) % para la muestra A, de (38,48 ± 0,35) % para la muestra B, (46,18 ± 5,35) % para la muestra C y para la muestra D (43,27 ± 3,33) %.

En tanto el silicio de la muestra A se concentra (6,45 ± 0,34) %, para la muestra B (9,065 ± 0,06) % y para la muestra C y D, un (7,18 ± 0,11) % y (6,27 ± 0,69) % respectivamente.

El resto de los elementos se mantienen en cantidades menores al 4 %.

**TABLA 5.4.1.3.** Análisis por fluorescencia de rayos X. Serie con 10 % pastas con adición cerámica.

SERIE/ELEMENTO	Mg	Al	Si	K	Fe	Na	O	Ca	C	S	Mo	Cu
<b>SERIE 10 %</b>												
A10	0,92	2,34	6,7	0,68	2,23		43,88	39,59	2,95	0,71		
A10	0,63	1,82	6,21	0,47	1,67		43,93	41,89	2,7	0,68		
<b>MEDIA</b>	<b>0,775</b>	<b>2,08</b>	<b>6,455</b>	<b>0,58</b>	<b>1,95</b>		<b>43,91</b>	<b>40,74</b>	<b>2,825</b>	<b>0,7</b>		
DESVIACION ESTANDAR	0,2051	0,368	0,346	0,15	0,396		0,035	1,626	0,177	0,02		
B10	1,21	2,06	9,11	1,04	1,78		42,46	38,73	2,74	0,87		
B10	1,15	2,21	9,02	1,11	2,1		42,33	38,23	3,01	0,84		

<b>MEDIA</b>	<b>1,18</b>	<b>2,135</b>	<b>9,065</b>	<b>1,08</b>	<b>1,94</b>	<b>42,4</b>	<b>38,48</b>	<b>2,875</b>	<b>0,86</b>
DESVIACION ESTANDAR	0,0424	0,106	0,064	0,05	0,226	0,092	0,354	0,191	0,02
C10	1,46	1,7	7,26	1,16	1,96	39,91	42,39	3,4	0,75
C10	1,24	1,84	7,1	0,92	2,97	31,83	49,96	3,43	0,72
<b>MEDIA</b>	<b>1,35</b>	<b>1,77</b>	<b>7,18</b>	<b>1,04</b>	<b>2,465</b>	<b>35,87</b>	<b>46,18</b>	<b>3,415</b>	<b>0,74</b>
DESVIACION ESTANDAR	0,1556	0,099	0,113	0,17	0,714	5,713	5,353	0,021	0,02
D10	0,82	1,17	5,78	-	1,22	40,62	45,62	4,14	0,63
D10	0,65	1,41	6,76	0,55	1,92	43,27	40,91	3,98	0,53
<b>MEDIA</b>	<b>0,735</b>	<b>1,29</b>	<b>6,27</b>	<b>0,55</b>	<b>1,57</b>	<b>41,95</b>	<b>43,27</b>	<b>4,06</b>	<b>0,58</b>
DESVIACION ESTANDAR	0,1202	0,17	0,693	-	0,495	1,874	3,33	0,113	0,07

En la Tabla 5.1.4.4. se observa que dentro de estas proporciones de sustitución (15 %), la presencia de calcio en las muestras A, B y C, es de  $(5,71 \pm 0,65)$  %,  $(7,1 \pm 1,08)$  % y  $(6,075 \pm 0,48)$  % respectivamente y de silicio es de  $(1,82 \pm 0,17)$  %,  $(2,16 \pm 0,30)$  % y  $(1,79 \pm 0,13)$  %. Tanto el carbono, aparece en las muestras A, B y C, en porcentajes de  $(23,39 \pm 0,40)$  %,  $(22,56 \pm 0,7)$  % y  $(23,22 \pm 0,37)$  % respectivamente.

La muestra D, presenta un porcentaje de calcio de  $(41,26 \pm 0,12)$  % y de silicio correspondiente al  $(12,75 \pm 0,09)$  %. En esta muestra no se registraron porcentajes de carbono.

El resto de los elementos para la totalidad de las muestras se mantienen en cantidades menores al 3 %.

80

**TABLA 5.4.1.4.** Análisis por fluorescencia de rayos X. Serie con 15 % pastas con adición cerámica.

SERIE/ELEMENTO	Mg	Al	Si	K	Fe	Na	O	Ca	C	S	Mo	Cu
<b>SERIE 15%</b>												
A15	0,19	0,49	1,94	0,14	0,32		67,3	6,18	23,1	1,09		0,09
A15	0,16	0,44	1,7	0,12	0,27	0,04	68,03	5,25	23,67	0,2		0,12
<b>MEDIA</b>	<b>0,175</b>	<b>0,465</b>	<b>1,82</b>	<b>0,13</b>	<b>0,295</b>		<b>67,67</b>	<b>5,715</b>	<b>23,39</b>	<b>0,65</b>		<b>0,11</b>
DESVIACION ESTANDAR	0,0212	0,035	0,17	-	0,035		0,516	0,658	0,403	0,63		0,02
ERROR ESTANDAR	0,015	0,025	0,12	-	0,025		0,365	0,465	0,285	0,45		0,02
B15	0,22	0,63	2,38	0,16	0,36		65,93	7,87	22,06	0,3		0,1
B15	0,17	0,49	1,95	0,13	0,33		67,2	6,33	23,05	0,23		0,12
<b>MEDIA</b>	<b>0,195</b>	<b>0,56</b>	<b>2,165</b>	<b>0,15</b>	<b>0,345</b>		<b>66,57</b>	<b>7,1</b>	<b>22,56</b>	<b>0,27</b>		<b>0,11</b>
DESVIACION ESTANDAR	0,0354	0,099	0,304	-	0,021		0,898	1,089	0,7	0,05		0,01
ERROR ESTANDAR	0,025	0,07	0,215	-	0,015		0,635	0,77	0,495	0,03		0,01
C15	0,17	0,44	1,7	0,12	0,26		67,76	5,73	23,48	0,23		0,11
C15	0,19	0,6	1,89	0,15	0,33	0,05	67,06	6,42	22,95	0,25		0,12
<b>MEDIA</b>	<b>0,18</b>	<b>0,52</b>	<b>1,795</b>	<b>0,14</b>	<b>0,295</b>		<b>67,41</b>	<b>6,075</b>	<b>23,22</b>	<b>0,24</b>		<b>0,12</b>
DESVIACION ESTANDAR	0,0141	0,113	0,134	-	0,049		0,495	0,488	0,375	0,01		0,01



ERROR ESTANDAR	0,01	0,08	0,095	-	0,035	0,35	0,345	0,265	0,01	0,01
D15	0,91	2,76	12,79	0,71	1,95	0,24	37,26	41,34	1,47	0,58
D15	0,96	2,87	12,65	0,8	1,94	0,19	37,35	41,17	1,62	0,46
<b>MEDIA</b>	<b>0,935</b>	<b>2,815</b>	<b>12,72</b>	<b>0,76</b>	<b>1,945</b>		<b>37,31</b>	<b>41,26</b>	-	<b>1,55</b>
DESVIACION ESTANDAR	0,0354	0,078	0,099	-	0,007	0,064	0,12	-	0,11	0,08
ERROR ESTANDAR	0,025	0,055	0,07	-	0,005	0,045	0,085	-	0,08	0,06

En la Tabla 5.1.4.5. se observa que dentro de estas proporciones de sustitución (30 %), se destaca la presencia de calcio, en porcentajes de (32,76 ± 0,99) % para la muestra A, de (28,36 ± 6,85) % para la muestra B, (33,15 ± 1,48) % para la muestra C y para la muestra D (35,05 ± 3,45) %.

En tanto el silicio de la muestra A se concentra (9,88 ± 0,79) %, para la muestra B (16,29 ± 7,76) % y para la muestra C y D, un (9,78 ± 0,97) % y (11,64 ± 0,68) % respectivamente.

El resto de los elementos se mantienen en cantidades menores al 4 %.

**TABLA 5.4.1.5.** Análisis por fluorescencia de rayos X. Serie con 30 % pastas con adición cerámica.

SERIE/ELEMENTO	Mg	Al	Si	K	Fe	Na	O	Ca	C	S	Mo	Cu
<b>SERIE 30 %</b>												
A30	0,68	2,95	10,44	0,56	1,82		45,21	32,06	5,04	1,25		
A30	0,83	3,04	9,32	0,56	1,9		46,05	33,46	3,38	1,46		
<b>MEDIA</b>	<b>0,755</b>	<b>2,995</b>	<b>9,88</b>	<b>0,56</b>	<b>1,86</b>		<b>45,63</b>	<b>32,76</b>	-	<b>1,36</b>		
DESVIACION ESTANDAR	0,1061	0,064	0,792	-	0,057		0,594	0,99	-	0,15		
ERROR ESTANDAR	0,075	0,045	0,56	-	0,04		0,42	0,7	-	0,11		
B30	0,89	2,64	10,8	0,67	1,85		44,26	33,2	4,38	1,31		
B30	0,48	1,98	21,78	0,59	1,42	0,23	44,99	23,51	4,01	1,01		
<b>MEDIA</b>	<b>0,685</b>	<b>2,31</b>	<b>16,29</b>	<b>0,63</b>	<b>1,635</b>		<b>44,63</b>	<b>28,36</b>	-	<b>1,16</b>		
DESVIACION ESTANDAR	0,2899	0,467	7,764	-	0,304		0,516	6,852	-	0,21		
ERROR ESTANDAR	0,205	0,33	5,49	-	0,215		0,365	4,845	-	0,15		
C30	1,18	3,42	10,47	1,81	4,4		39,87	32,1	6,11	0,64		
C30	0,82	3,14	9,09	1,12			42,09	34,2	8,76	0,78		
<b>MEDIA</b>	<b>1</b>	<b>3,28</b>	<b>9,78</b>	<b>1,47</b>	<b>4,4</b>		<b>40,98</b>	<b>33,15</b>	-	<b>0,71</b>		
DESVIACION ESTANDAR	0,2546	0,198	0,976	-	-		1,57	1,485	-	0,1		
ERROR ESTANDAR	0,18	0,14	0,69	-	-		1,11	1,05	-	0,07		
D30	0,55	2,07	11,15	1,28			39,04	37,49	6,37	1,42	0,63	
D30	0,65	2,6	12,12	0,85			42,51	32,6	7,43	1,24		
<b>MEDIA</b>	<b>0,6</b>	<b>2,335</b>	<b>11,64</b>	<b>1,07</b>	-		<b>40,78</b>	<b>35,05</b>	-	<b>1,33</b>		
DESVIACION ESTANDAR	0,0707	0,375	0,686	-	-		2,454	3,458	-	0,13		
ERROR ESTANDAR	0,05	0,265	0,485	-	-		1,735	2,445	-	0,09		

### 5.1.5. Mediciones del contenido de humedad

La toma de medida del contenido de humedad se realizó según el procedimiento descrito en el capítulo 4, únicamente para las muestras cerámicas. Como se puede apreciar en la Tabla 5.1.6, la muestra A presentó una humedad de 0,12 %, la muestra B un 0,19 %, mientras que la muestra C un 0,37 % y la muestra D 2,32 % de humedad.

**TABLA 5.1.5.** Resultados de las mediciones de contenido de humedad de muestras cerámicas.

TIPO DE MUESTRA	PESO INICIAL (Crisol + 1 gr muestra)	PESO FINAL			HUMEDAD [%]
		PESADA 1 [gr]	PESADA 2 [gr]	PESADA 3 [gr]	
MUESTRA A (TICHOLO)	4,338	4,33	4,333	4,333	0,12
MUESTRA B (PRENSA)	4,31	4,301	4,302	4,302	0,19
MUESTRA C (CHORIZO)	4,014	4	3,999	3,999	0,37
MUESTRA D (ARTESANAL)	4,224	4,216	4,126	4,126	2,32

## 5.2. Valoración de la actividad puzolánica en pastas cementicias

### 5.2.1. Mediciones de pH y conductividad

La toma de medidas de pH y la conductividad eléctrica se realizaron según el procedimiento descrito en el capítulo 4, luego de 28 días de curado. Como se puede apreciar en la Tabla 5.1.5, con relación al pH, dentro de las series con diferentes porcentajes de sustitución de cemento por puzolana cerámica no se encuentran variaciones significativas entre las muestras realizadas con los cuatro tipos de cerámicos. Tampoco existen variaciones significativas entre las series con sustituciones del 10 %, 20 % y 30 % entre sí.

En tanto las mediciones de conductividad eléctrica dentro de cada serie no demuestran variaciones mayores al 1 % y a su vez la conductividad obtenida en pastas donde el 15 % del cemento se sustituyó por residuo cerámico, corresponden al 89 % del valor obtenido con sustituciones del 10 %.

Asimismo, en las pastas realizadas con 30 % de sustitución por cerámico, se obtuvieron valores del 80 % de los obtenidos cuando ese porcentaje de sustitución es del 10 %.

**TABLA 5.1.5.** Resultados de las mediciones de pH y conductividad en suspensión acuosa.

MUESTRAS	pH	Media	Desvio Estandar [%]	Conductividad [ us]	Media	Desvio Estandar [%]
<b>SERIE 10%</b>						
A (TICHOLO) - 10	12,35			16,93		
B (PRENSA) - 10	12,3	12,335	0,03	16,37	16,965	0,34
C (CHORIZO) -10	12,36			17,15		
D (ARTESANAL) - 10	12,32			17		
<b>SERIE 15%</b>						
A (TICHOLO) - 15	12,28			15,04		
B (PRENSA) - 15	12,29	12,29	0,01	16,16	16,105	0,55
C (CHORIZO) -15	12,29			16,05		
D (ARTESANAL) - 15	12,31			16,17		
<b>SERIE 30%</b>						
A (TICHOLO) - 30	12,23			14,45		
B (PRENSA) - 30	12,23	12,23	0,00	14,5	14,335	0,43
C (CHORIZO) -30	12,22			14,22		
D (ARTESANAL) - 30	12,23			13,57		

## 5.2.2. Análisis termogravimétrico y térmico diferencial (TGA/ DTA)

Se estudiaron distintas pastas de cemento Portland con adición cerámica y a su vez pastas de hidróxido calcio y adición cerámica, según la metodología descrita en el punto 4.3.1.3. Producción de pastas cementicias y pastas con hidróxido de calcio.

Mediante el análisis de la curva termogravimétrica se puede determinar la pérdida de masa debida a las reacciones de deshidratación de los compuestos. Los que nos permite la cuantificación en porcentaje de hidróxido de calcio presente en las pastas y podemos inferir entonces, la actividad puzolánica de las pastas cemento/puzolana y cal/puzolana.

### 5.2.2.1. Pastas de cemento portland con adición cerámica.

En primera instancia se estudiaron pastas de cemento adicionando residuo cerámico de los diferentes tipos de muestras en porcentajes de 10 %, 15 % y 30 % a los 28 días de edad, y la pasta control (100 % cemento) correspondiente.

En la Tabla 5.2.2.1. se presentan los valores de portlandita consumida según la cantidad de cemento en cada pasta. En la misma se puede apreciar que el porcentaje de portlandita presente y consumida no varía significativamente dentro de cada rango de porcentaje de sustitución de

cemento a pesar de las distintas muestras de cerámicos, tanto de producción industrial o artesanal.

El porcentaje de portlandita consumida en cada pasta, aumenta a medida que el porcentaje de sustitución de cemento es mayor, correspondiendo valores de media de 5,1 % para pastas con un 10 % de sustitución, una media de 27,43 % para las pastas con un 20 % de sustitución y valores medios de 48,10 % para aquellas pastas con un 30 % de sustitución de cemento por residuo cerámico.

**TABLA 5.2.2.1.** Resultados obtenidos del ensayo termogravimétrico para pastas a 28 días de edad.

MUESTRA	% CH PRESENTE	PORTLANDITA CONSUMIDA [%]
A10 /28D	12,300	6,2
B10 /28D	12,424	5,2
C10 /28D	12,605	3,8
D10 /28D	12,428	5,2
A15 /28D	10,430	20,4
B15 /28D	9,567	27,0
C15 /28D	8,662	33,9
D15 /28D	9,394	28,3
A30 /28D	6,738	48,6
B30 /28D	7,511	42,7
C30 /28D	6,516	50,3
D30 /28D	6,450	50,8

84

A continuación, se presentan las gráficas de las curvas termogravimétricas para los diferentes porcentajes de sustitución de cemento a los 28 días de edad. En estas curvas se puede observar a través de sus picos situados alrededor de los 450 °C, referente a la deshidroxilación del hidróxido de calcio como en aquellas pastas con sustituciones del 10 % (Figura 5.2.2.1) y el 15 % (Figura 5.2.2.2) no hay diferencias significativas.

Sin embargo, para las pastas con un 30 % (Figura 5.2.2.3) de sustitución existe una leve reducción en el pico situado a los 450 °C con respecto a la pasta de control. Esto se debe a la reacción entre el residuo cerámico y la portlandita para formar nuevos productos de hidratación, similares a los generados durante la hidratación del cemento.

FIGURA 5.2.2.1 DTA de pastas de cemento con 10 % de sustitución cerámica a 28 días.

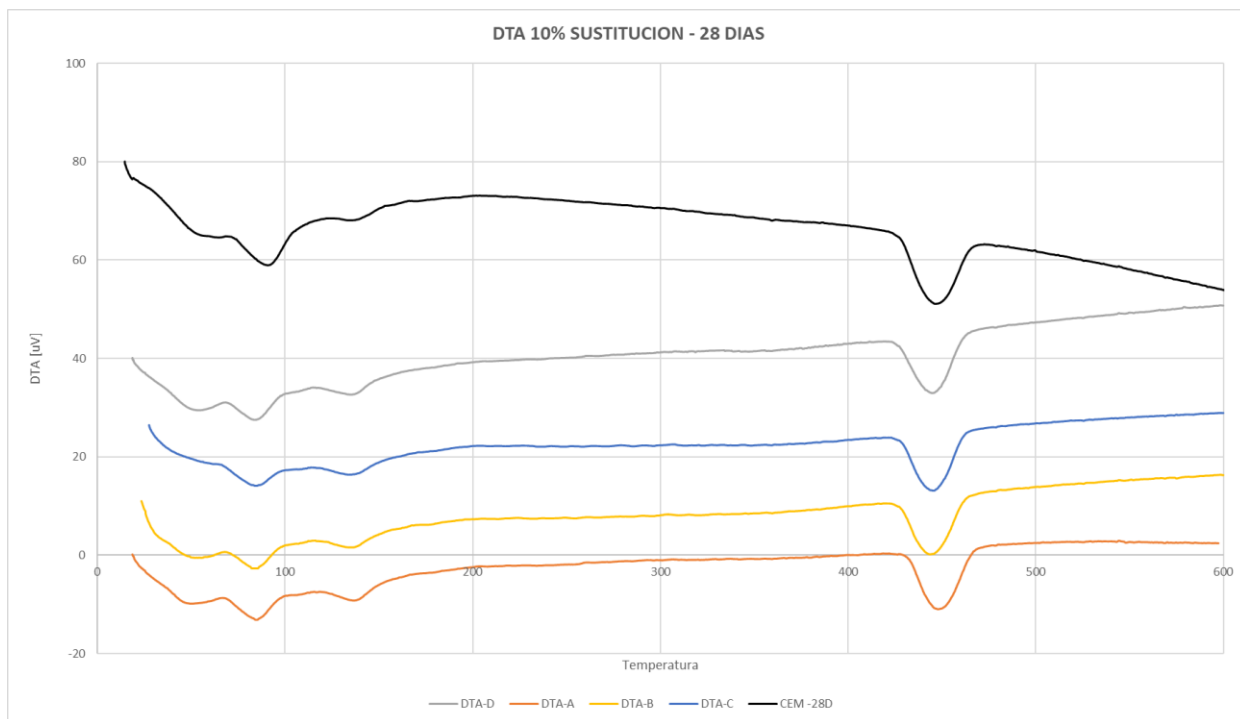
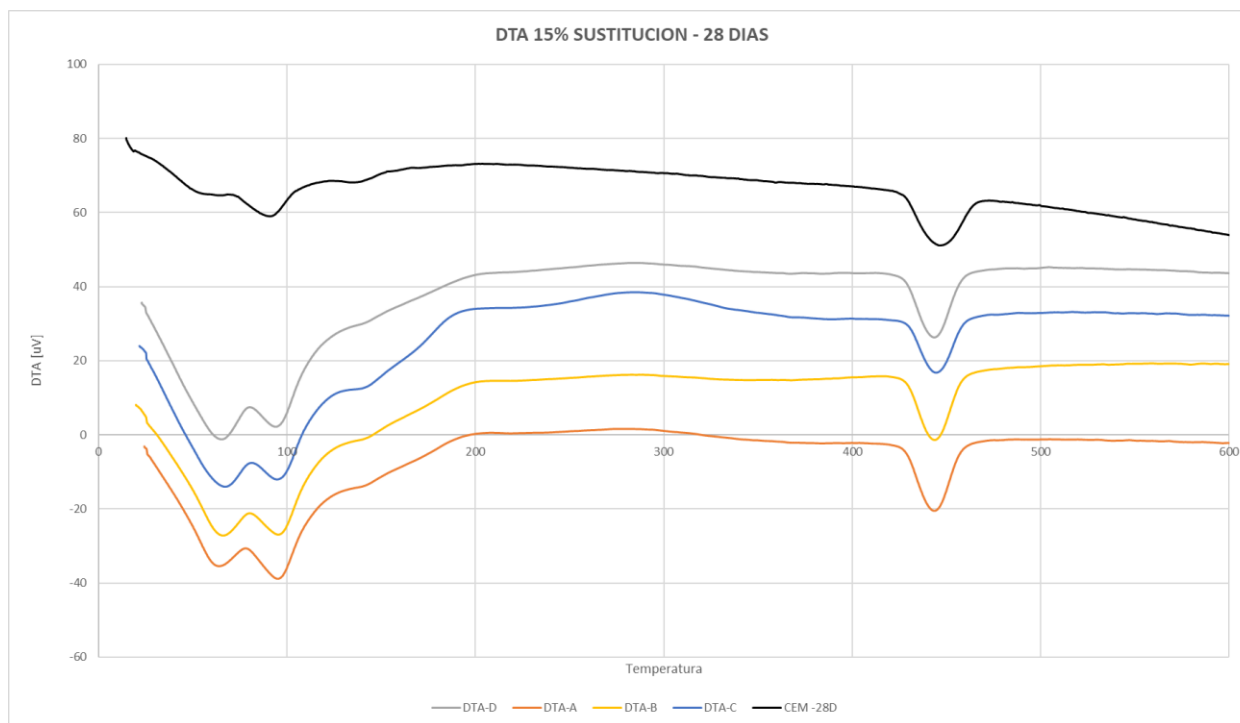
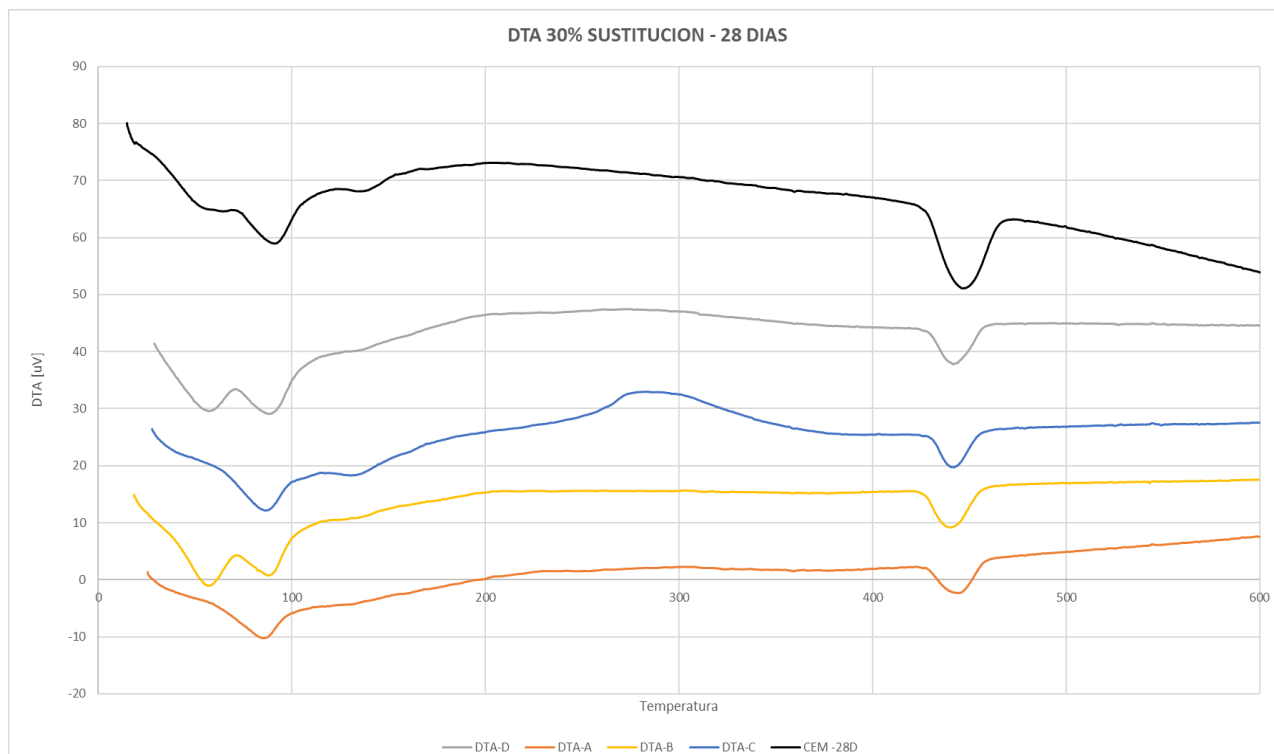


FIGURA 5.2.2.2 DTA de pastas de cemento con 15 % de sustitución cerámica a 28 días.



**FIGURA 5.2.2.3** DTA de pastas de cemento con 30 % de sustitución cerámica a 28 días.



86

### 5.2.2.2. Pastas de hidróxido de calcio con adición cerámica

Según el procedimiento descrito en el punto 4.3.1.3, se realizaron pastas de hidróxido de calcio con una sustitución del 20 % y 30 % por adición cerámica según su origen de producción, producción industrial (muestra A) y producción artesanal (muestra D).

Como se mencionó anteriormente, la reacción puzolánica es un proceso por el cual la adición mineral reacciona con la cal para formar productos hidratados similares a los generados en la hidratación del cemento.

Para este tipo de pasta, la reacción puzolánica es la responsable de la formación de los productos de hidratación, ya que el hidróxido de calcio no es capaz de reaccionar por sí solo para formar productos cementantes, como es el caso del cemento Portland.

En las curvas DTG, se puede apreciar la presencia de picos característicos que corresponden a la deshidratación de los productos formados durante la reacción puzolánica. Donde alrededor de los 450 – 500 °C se observa un incremento en la pérdida de masa que está asociada al proceso de deshidroxilación del hidróxido de calcio presente, es decir, el que no ha reaccionado con la adición cerámica.

Integrando el pico se puede determinar la cantidad de cal que queda en la muestra sin reaccionar y, a partir de este dato, se logra calcular la cantidad de cal fijada por la adición mineral en dicha pasta.

Los resultados para las pastas de hidróxido de calcio con adición cerámica quedan expresados en la Tabla 5.2.2.2. y en las Figuras 5.2.2.2.1. y 5.2.2.2.2.

**TABLA 5.2.2.2.** Resultados obtenidos del ensayo termogravimétrico para pastas con cal a 7, 28 y 56 días de edad.

TIPO DE MUESTRA	Ca(OH) <sub>2</sub> PRESENTE [%]	CAL FIJADA [%]
A - 7 DIAS - 20 %	5,912	69,182
D - 7 DIAS - 20 %	16,995	11,403
A - 7 DIAS - 30 %	15,273	46,411
D - 7 DIAS - 30 %	14,068	50,638
A - 28 DIAS - 20 %	2,479	87,077
D - 28 DIAS - 20 %	7,552	60,631
A - 28 DIAS - 30 %	5,377	81,132
D - 28 DIAS - 30 %	5,649	80,180

FIGURA 5.2.2.2.1. Valores de Cal fijada. Sustitución del 20 % por adición cerámica.

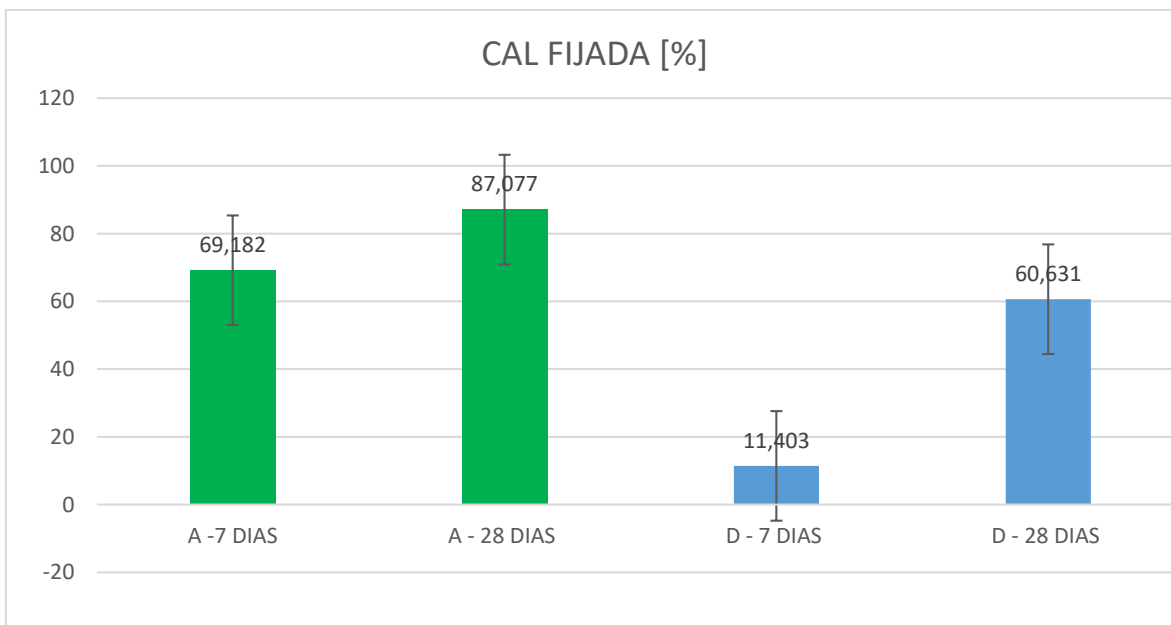
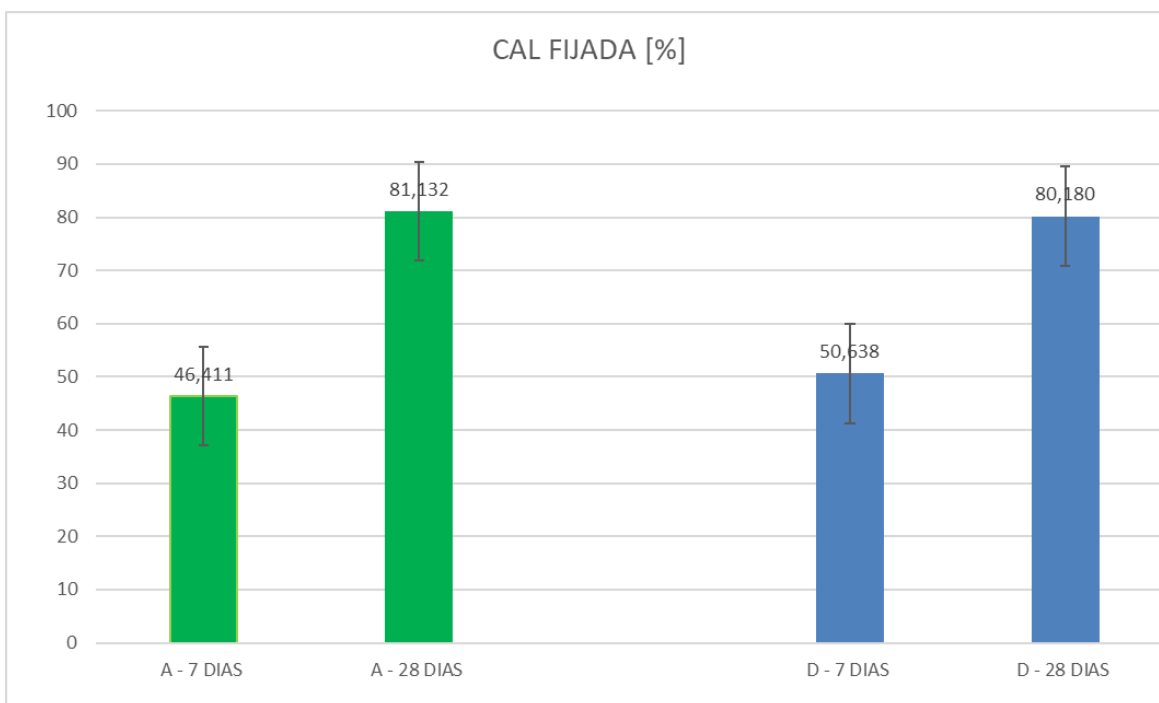


FIGURA 5.2.2.2.2. Valores de Cal fijada. Pastas con sustitución del 30 % por adición cerámica.



A partir de los anteriores resultados, podemos observar que en la muestra A (Barras Verdes) en pastas con 20 % de sustitución, existe una reacción continua a lo largo del tiempo, ya que los



valores de la cantidad de cal fijada en la pasta van en aumento y para la muestra D (Barras Azules), en pastas con la misma proporción, la reactividad es mucho menor a los 7 días, pero los valores se incrementan hasta formar un pico máximo a los 28 días.

En tanto, para las pastas con un 30 % de sustitución, ambas muestras se comportaron similarmente, con la particularidad de formar un pico máximo a los 28 días.

En las curvas termogravimétricas representadas en las Figuras (5.2.2.2.3. a 5.2.2.2.6.), se puede observar, en todos los casos, la presencia de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  sin reaccionar, representado por el pico aproximadamente a 450 °C y como a medida del avance de la edad de curado, los valores de la función disminuyen según el comportamiento anteriormente mencionado.

**FIGURA 5.2.2.2.3.** DTA de pastas de cal con 20 % de sustitución cerámica tipo A a 7 y 28 días.

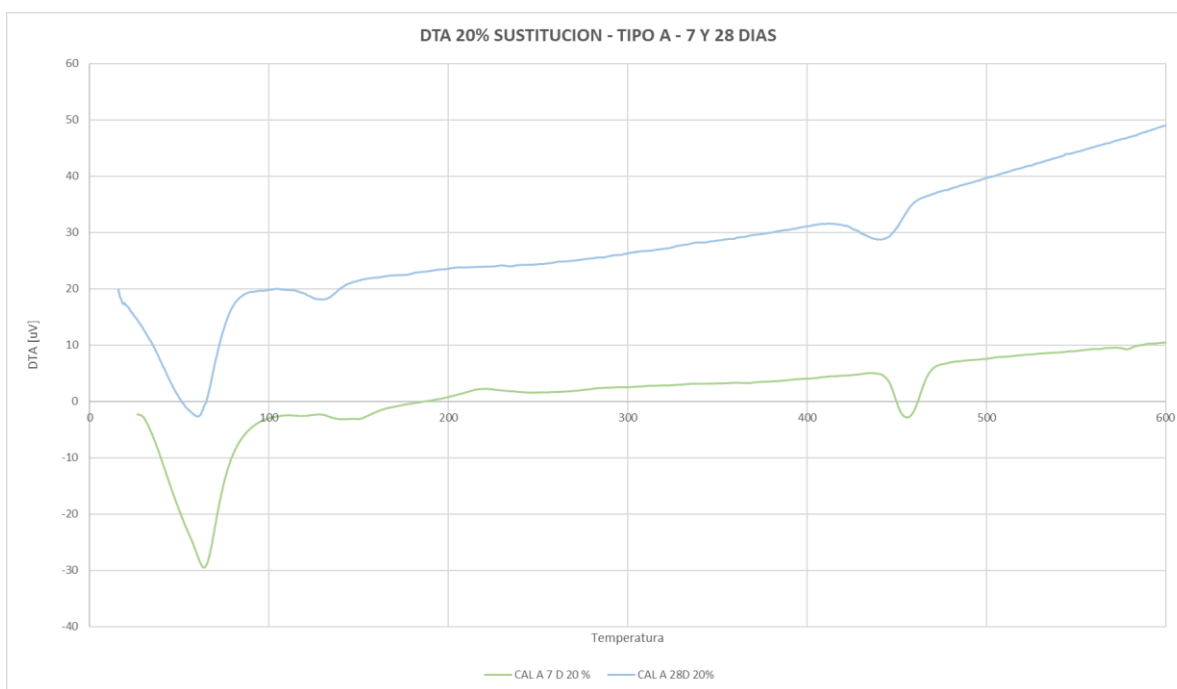


FIGURA 5.2.2.2.4. DTA de pastas de cal con 20 % de sustitución cerámica tipo D a 7 y 28 días.

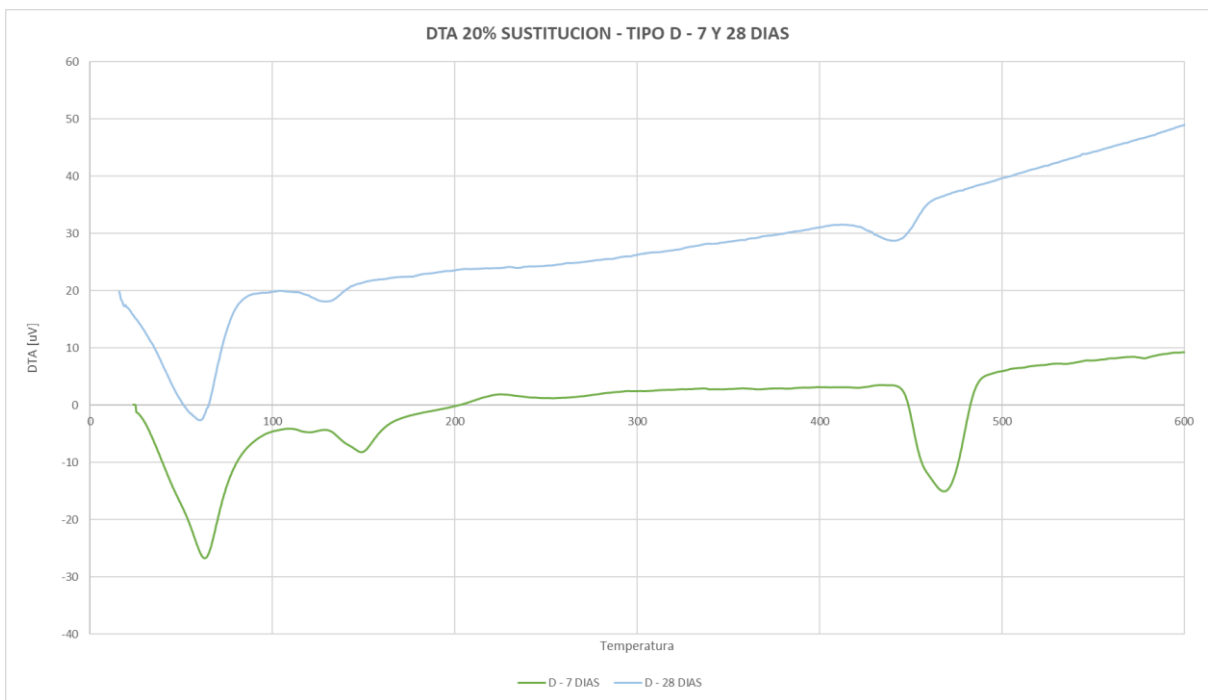
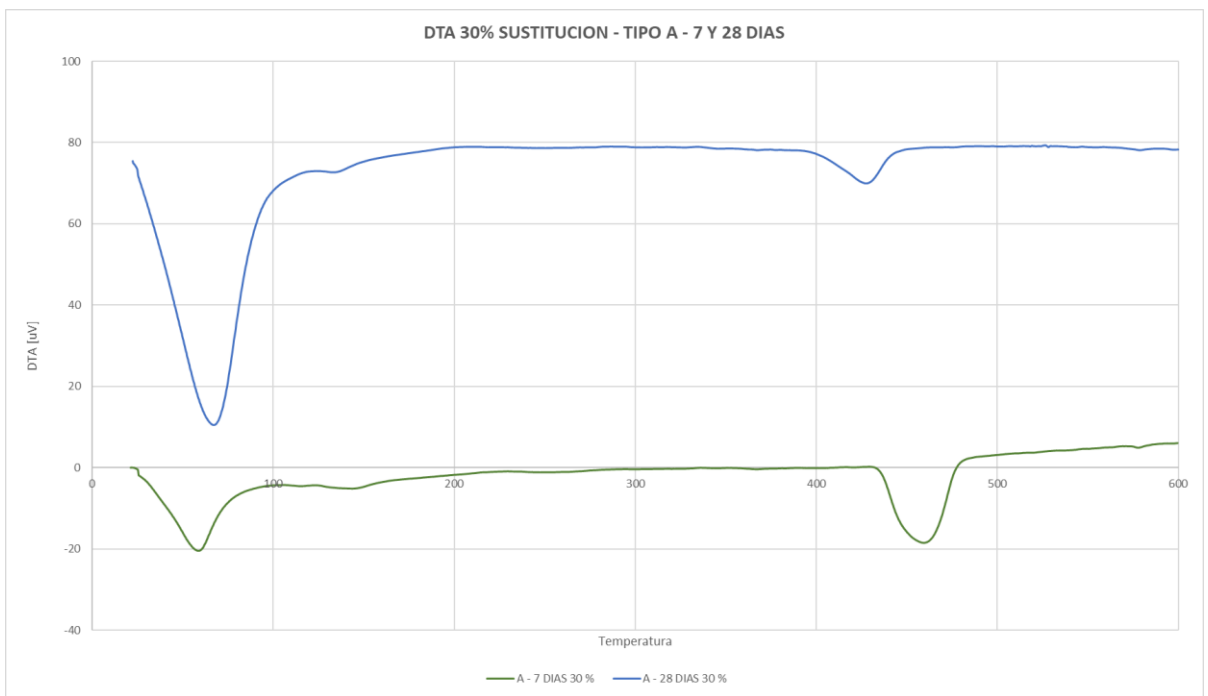
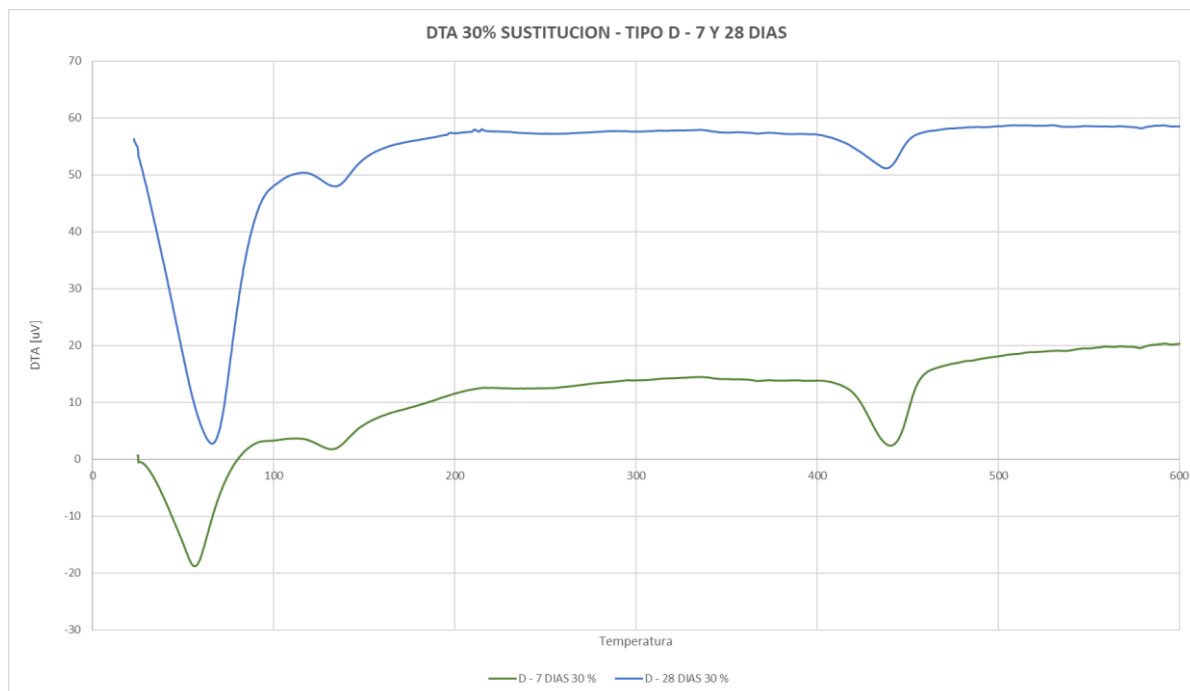


FIGURA 5.2.2.2.5. DTA de pastas de cal con 30 % de sustitución cerámica tipo A a 7 y 28 días.



**FIGURA 5.2.2.2.6.** DTA de pastas de cal con 30 % de sustitución cerámica tipo D a 7 y 28 días.



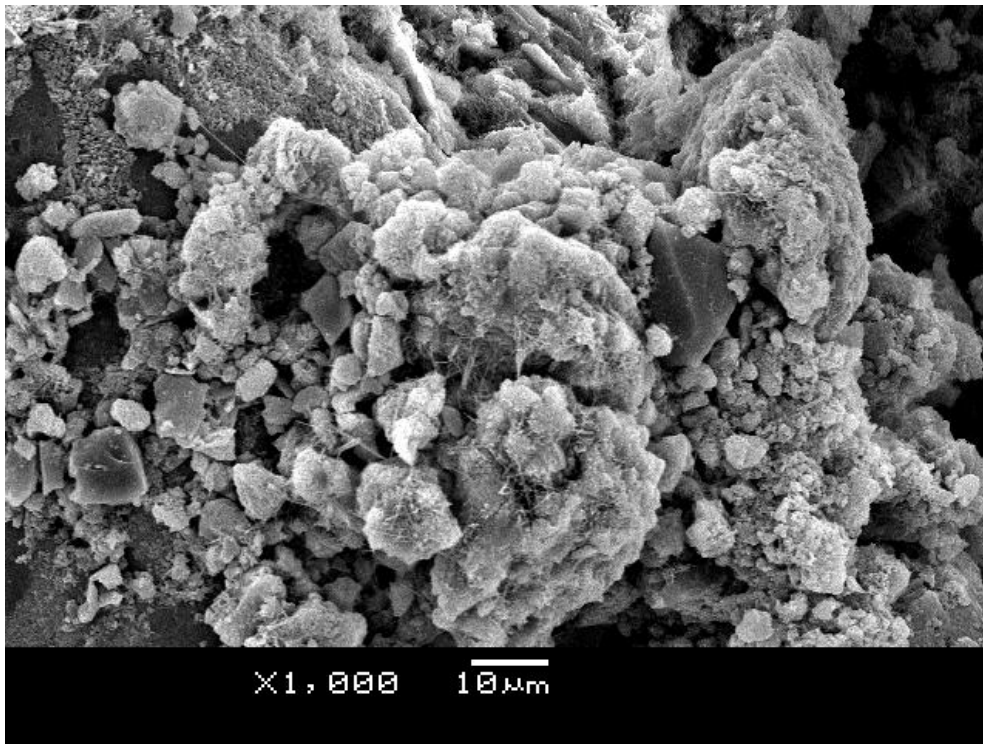
### 5.2.3. Caracterización superficial mediante microscopia

La microscopia electrónica de barrido fue utilizada para realizar una evaluación morfológica (textura, forma y aspecto) presentados por las matrices cementicias con adición cerámica de modo de complementar las caracterizaciones físicas desarrolladas anteriormente y con el fin de interpretar posteriormente su comportamiento dentro de la matriz. Se presentan micrografías de matrices con un 15 % de sustitución del peso de cemento por cada tipo de cerámico estudiado a 28 días de curado. En cada micrografía se realizaron tres aumentos, un primero de X 55, un segundo acercamiento a X 1000 y por último uno a X 10,000 aumentos.

A través del estudio de las micrografías pueden identificarse la presencia de productos formados durante la hidratación del cemento Portland, como son la etringita (agujas), Portlandita (laminas hexagonales) y gel C-S-H (estructura amorfa). Los productos hidratados presentes en el mortero son los mismos encontrados que en el mortero control. Además, se observan partículas de cerámicos embebidas en la matriz cementante generando una estructura densa y uniforme.

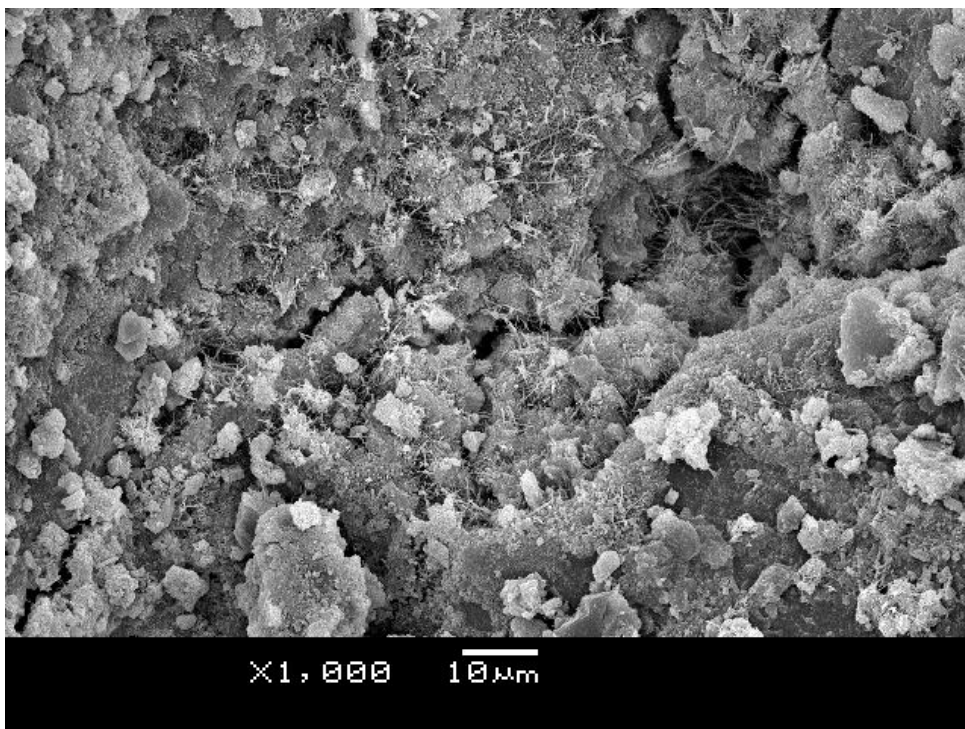
En las Figura 5.2.3.1. y 5.2.3.2. se observa, un gran desarrollo de gel de Tobermorita (CSH) conformando una matriz densa, compacta, continua y uniforme en todas las muestras estudiadas. La Tobermorita es responsable de la armazón interna de la pasta de cemento, de la adherencia de esta con los áridos con los morteros y en definitiva de la resistencia mecánica de estos conglomerados [44].

**FIGURA 5.2.3.1.** Microscopia (SEM) de la muestra A por 1000 aumentos. Gel C-S-H.



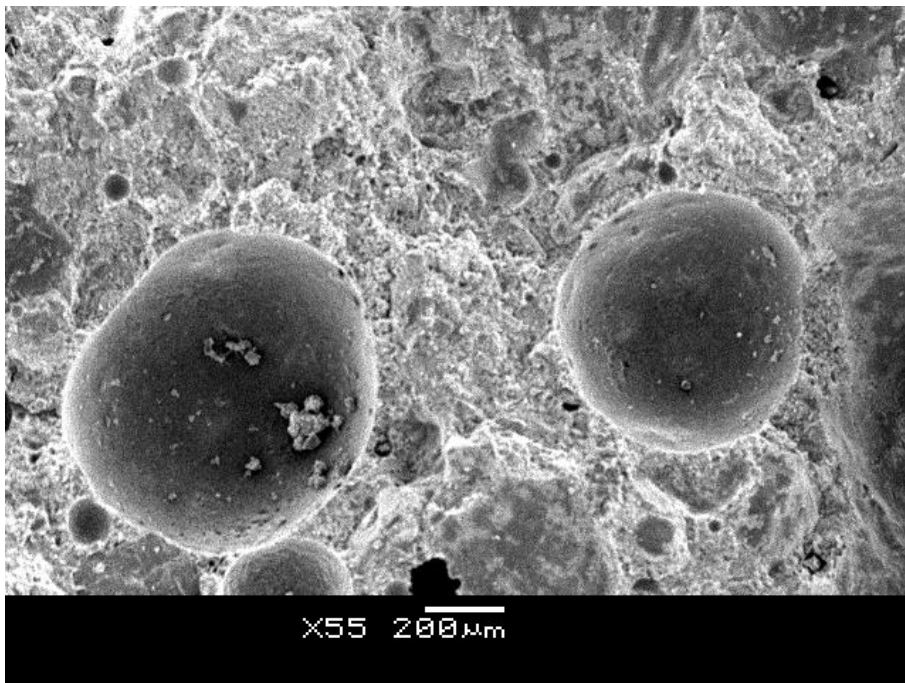
92

**FIGURA 5.2.3.2.** Microscopia (SEM) de la muestra B por 1000 aumentos. Gel C-S-H.



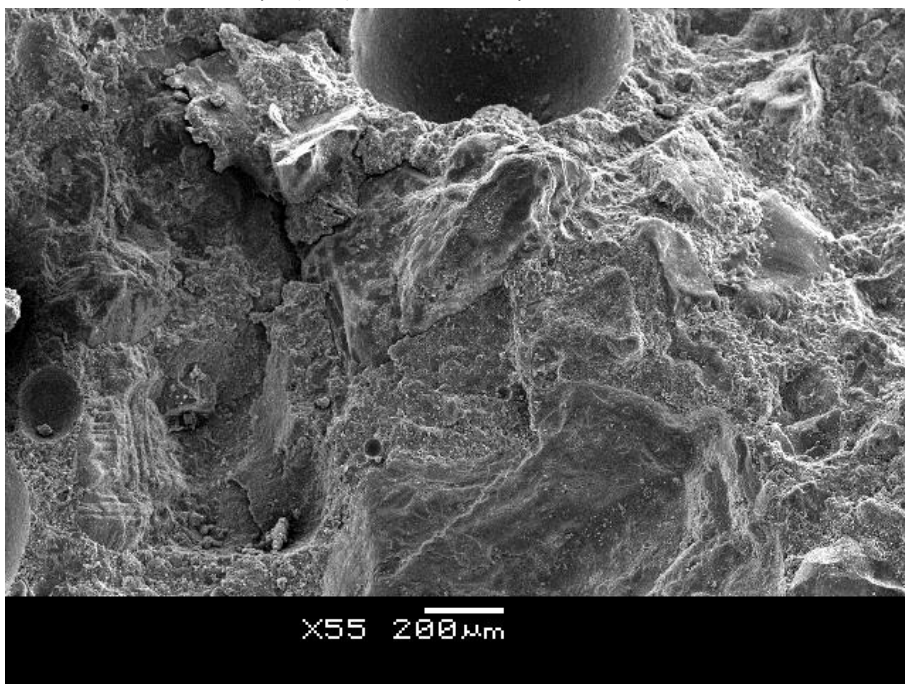
En la Figura 5.2.3.3 Y Figura 5.2.3.4, se observa una sección de una partícula de árido, que se puede reconocer por su forma redondeada, inferido por a su tamaño de partícula entre los 600  $\mu\text{m}$  y 800  $\mu\text{m}$ .

**FIGURA 5.2.3.3.** Microscopia (SEM) de la muestra C por 55 aumentos. Partícula de árido.



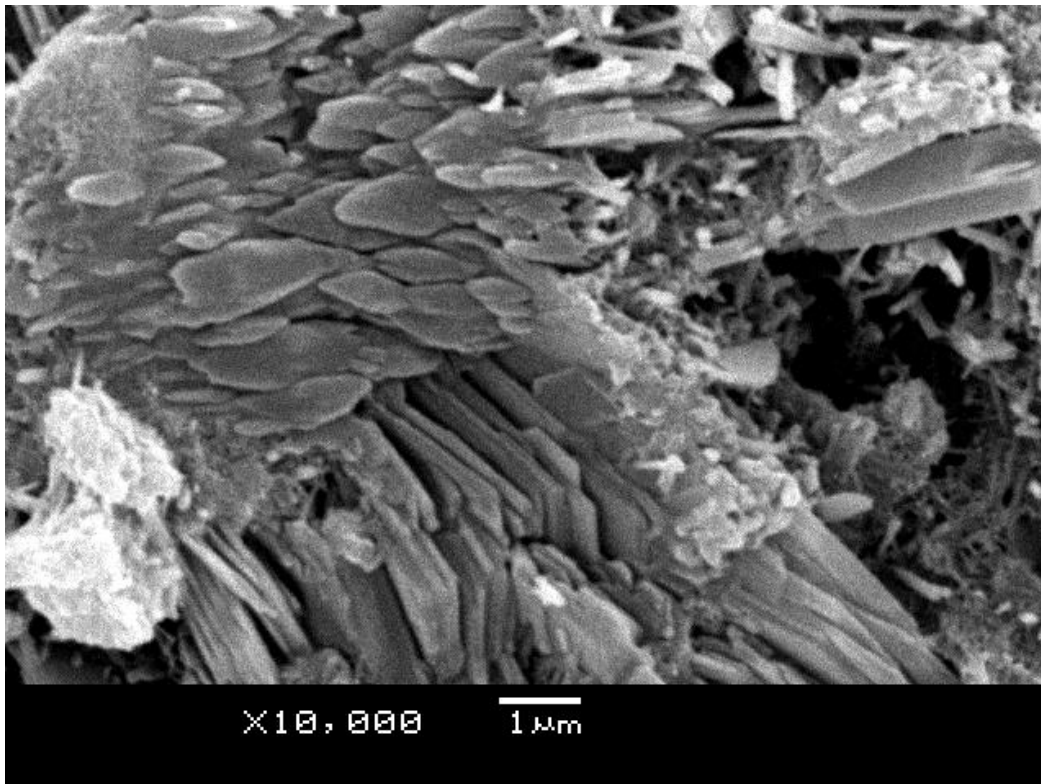
93

**FIGURA 5.2.3.4.** Microscopia (SEM) de la muestra D por 55 aumentos. Partícula de árido.



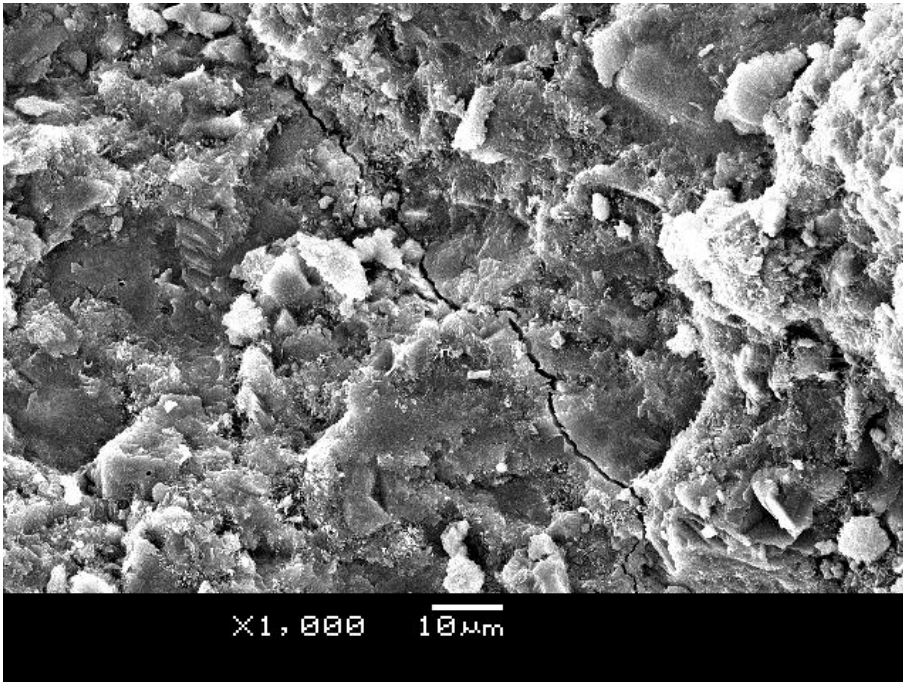
A su vez, se puede reconocer en las Figura 5.2.3.5. Cristales de Portlandita con buen desarrollo cristalino, con sus lados bien delimitados y con la forma de características de plaquetas hexagonales en todas las muestras estudiadas.

**FIGURA 5.2.3.5.** Microscopia (SEM) de la muestra A por 10000 aumentos. Cristales de Portlandita.

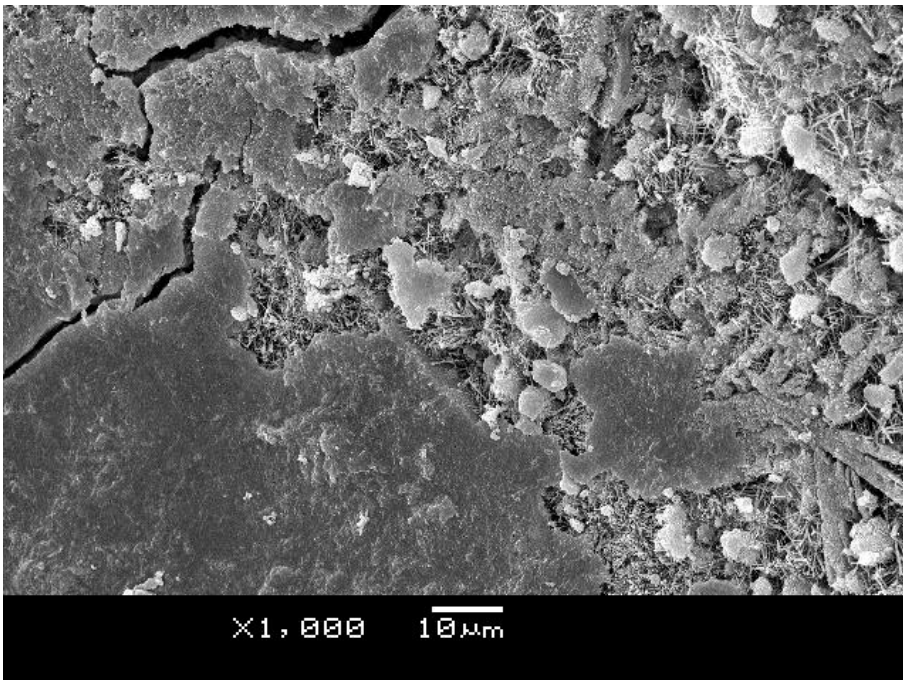


Por otra parte, se pueden contemplar fisuras debidos al calor de la hidratación producidas por las reacciones exotérmicas de hidratación, en las Figura 5.2.3.6 y Figuras 5.2.3.6 a los 1000 aumentos.

**FIGURA 5.2.3.6.** Microscopia (SEM) de la muestra D por 1000 aumentos. Fisura.

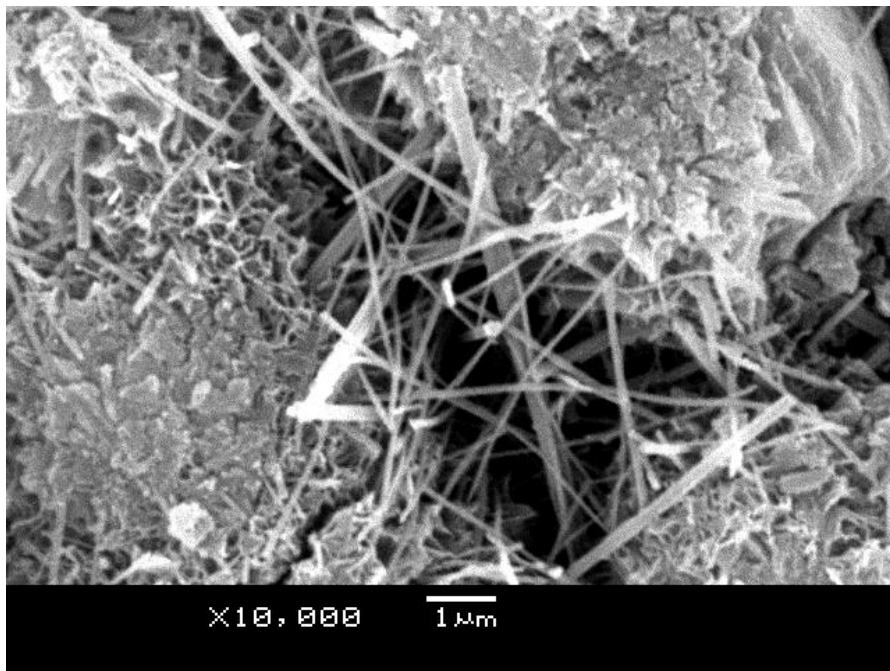


**FIGURA 5.2.3.7.** Microscopia (SEM) de la muestra F por 1000 aumentos. Fisura.



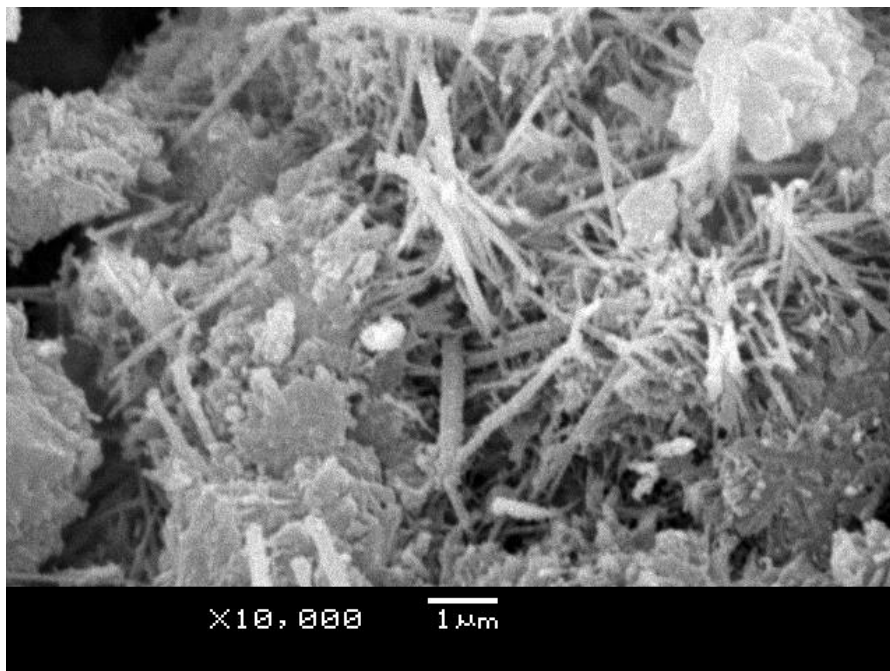
A esta edad se puede observar, formaciones de Etringita bien cristalizadas en forma de agujas, formando estructuras de red que le dan a la matriz una mayor cohesión, en las Figura 5.2.3.8. y Figura 5.2.3.9, que se asimilan a las observadas en la matriz de referencia en la Figura 5.2.3.10.

**FIGURA 5.2.3.8.** Microscopia (SEM) de la muestra A por 10000 aumentos.



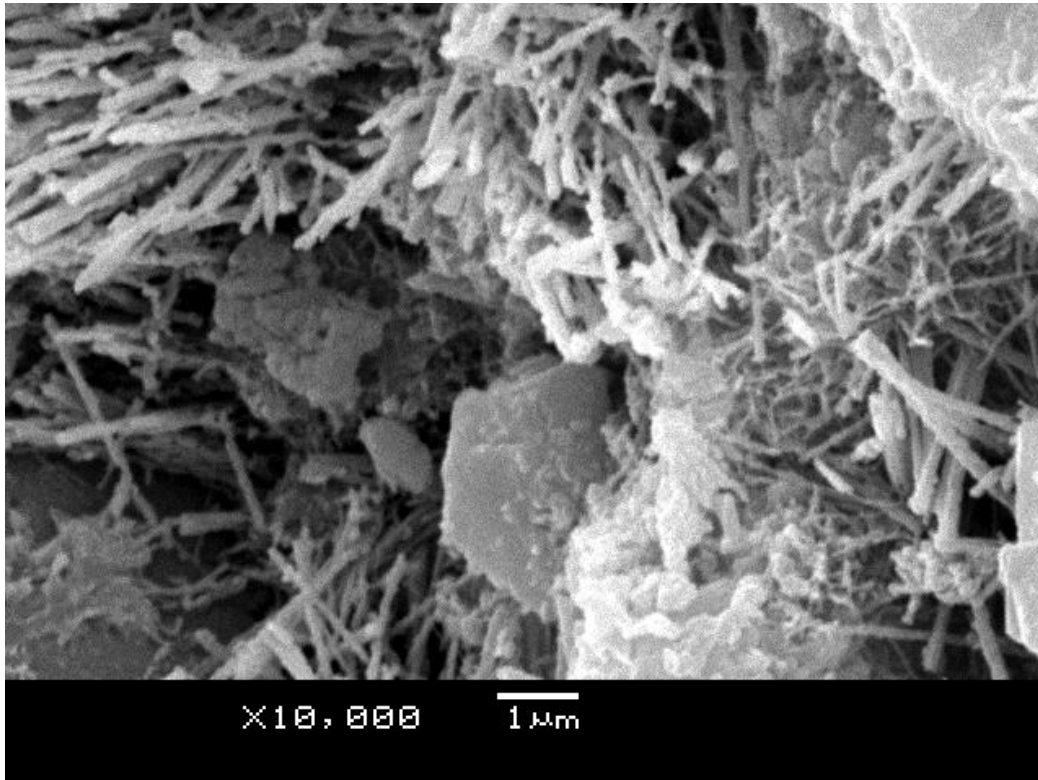
96

**FIGURA 5.2.3.9.** Microscopia (SEM) de la muestra B por 10000 aumentos.





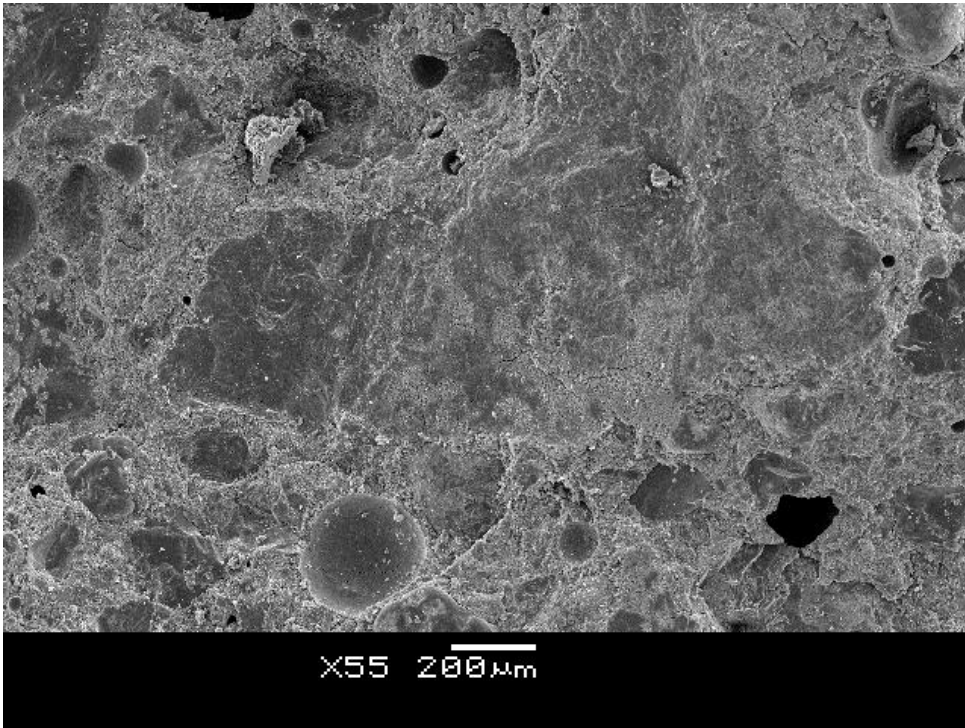
**FIGURA 5.2.3.10.** Microscopia (SEM) de la muestra F (Patrón) por 10000 aumentos.



97

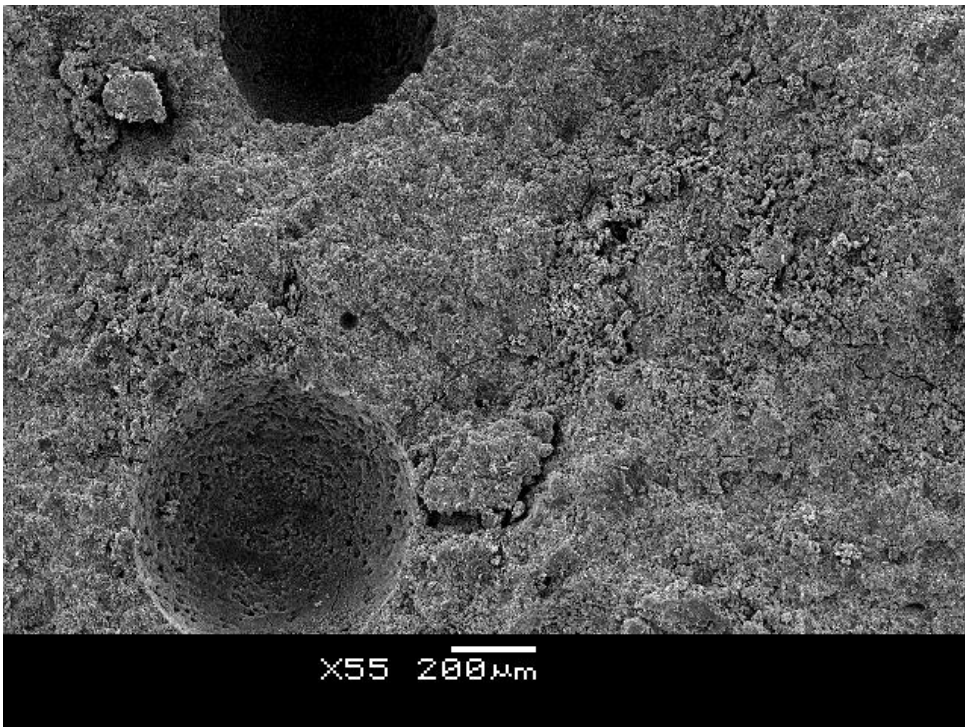
Aparentemente no existen diferencias significativas a nivel superficial en la matriz con respecto a la referencia, cuando se incorporan residuos cerámicos en las pastas comparando la Figura 5.2.3.11 con respecto al resto de las Figuras (5.2.3.12 a 5.2.3.14) correspondientes a las pastas con adición cerámica. Probablemente, esta estructura bastante densa, uniforme y poco porosa es la que hace posible que el cerámico mejore o por lo menos resista mecánicamente niveles similares al mortero de referencia.

**FIGURA 5.2.3.11.** Microscopia (SEM) de la muestra F (Patrón) por 55 aumentos.

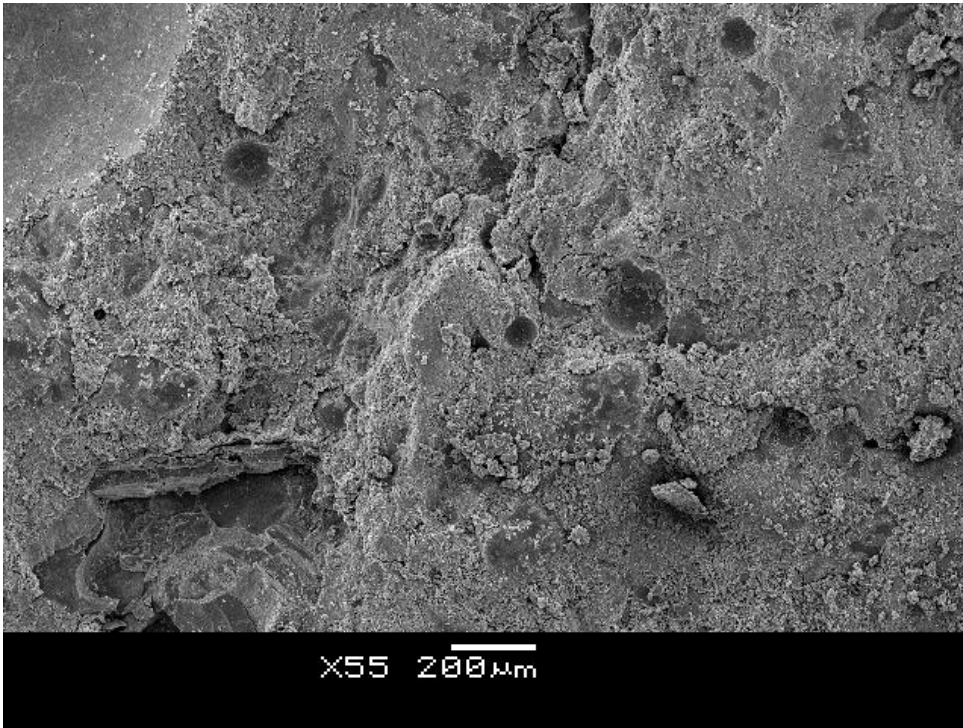


98

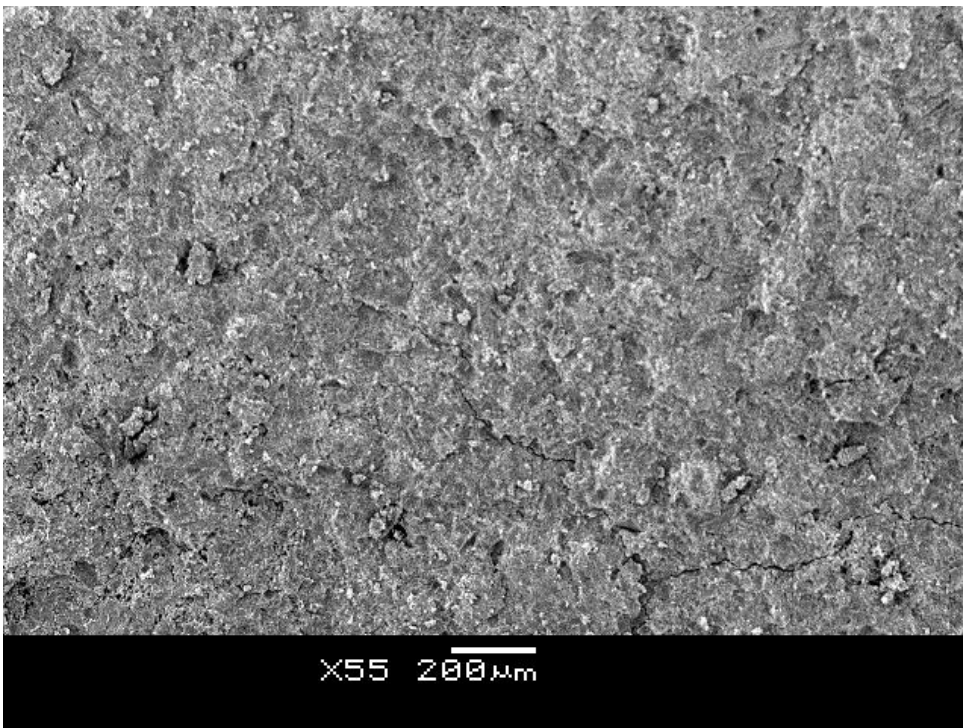
**FIGURA 5.2.3.12.** Microscopia (SEM) de la muestra A por 55 aumentos.



**FIGURA 5.2.3.13.** Microscopia (SEM) de la muestra B por 55 aumentos.



**FIGURA 5.2.3.14.** Microscopia (SEM) de la muestra C por 55 aumentos.



#### **5.2.4. Caracterización mecánica de los morteros**

La influencia de la incorporación de puzolana cerámica en los morteros se estudia mediante ensayo mecánico-resistente en comparación con un mortero de referencia. Cabe señalar que, si bien no se utilizó arena normalizada como indica la norma, al ser resultados comparativos con la muestra patrón, se pueden evaluar igualmente los resultados.

Se realizaron ensayos de resistencia a la compresión y a la flexión en cuatro edades (3, 7, 28 y 56 días) y en cuatro proporciones diferentes (5 %, 10 %, 20 % y 30 %).

A los morteros fabricados se les asigna las siguientes referencias:

M.A = Mortero con ticholo industrial de 10 bocas

M.B = Mortero con ladrillo industrial de prensa

M.C = Mortero con ladrillo artesanal tipo “chorizo”

M.D = Mortero con ladrillo artesanal estándar

M.F = Mortero de control (100 % cemento / 100 % arena)

##### **5.2.4.1. Resistencia a Flexión**

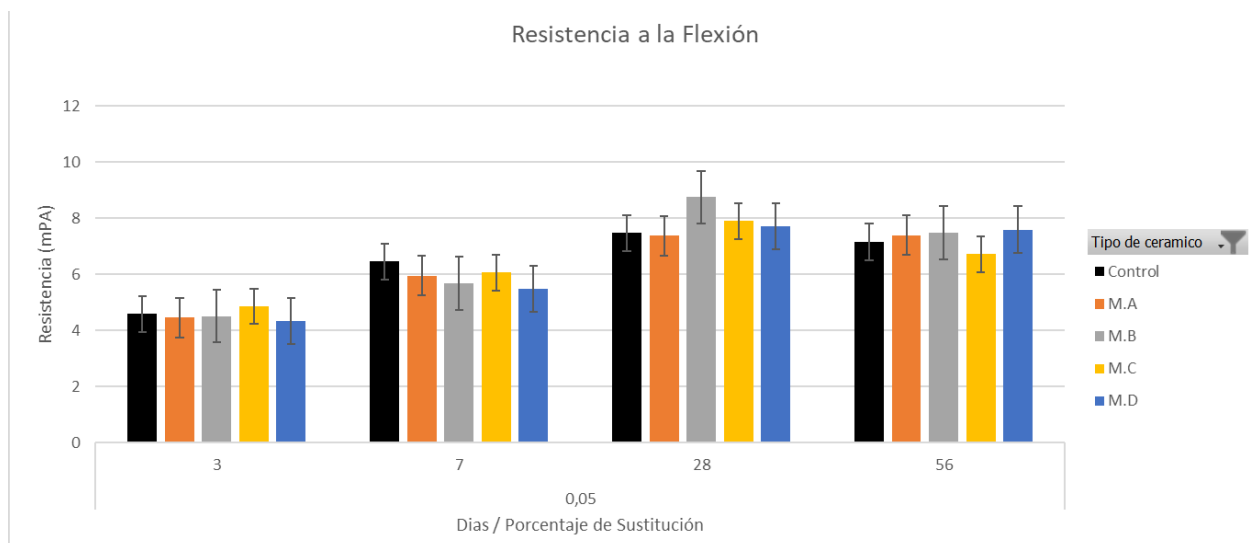
Los resultados de las resistencias a flexión de las probetas de (4 x 4 x 16) cm<sup>3</sup> realizadas a las edades de 3, 7, 28 y 56 días en los diferentes porcentajes de sustitución seleccionados, se pueden observar en los siguientes gráficos.

100

###### **5.2.4.1.1. Resistencia a la flexión de morteros con 5 % de adición cerámica.**

Como puede observarse en la Figura 5.2.4.1, la resistencia de los diferentes morteros no varía significativamente en las diferente a los 3 días. A los 7 días el control es superior con respecto al resto de las muestras y a partir de los 28 días se destaca que los morteros B, C y D son mayores que el control. Mientras que, a los 56 días, los morteros A, B y D superan al mortero de control.

**FIGURA 5.2.4.1.** Resistencia a la flexión de morteros con 5 % de adición cerámica.

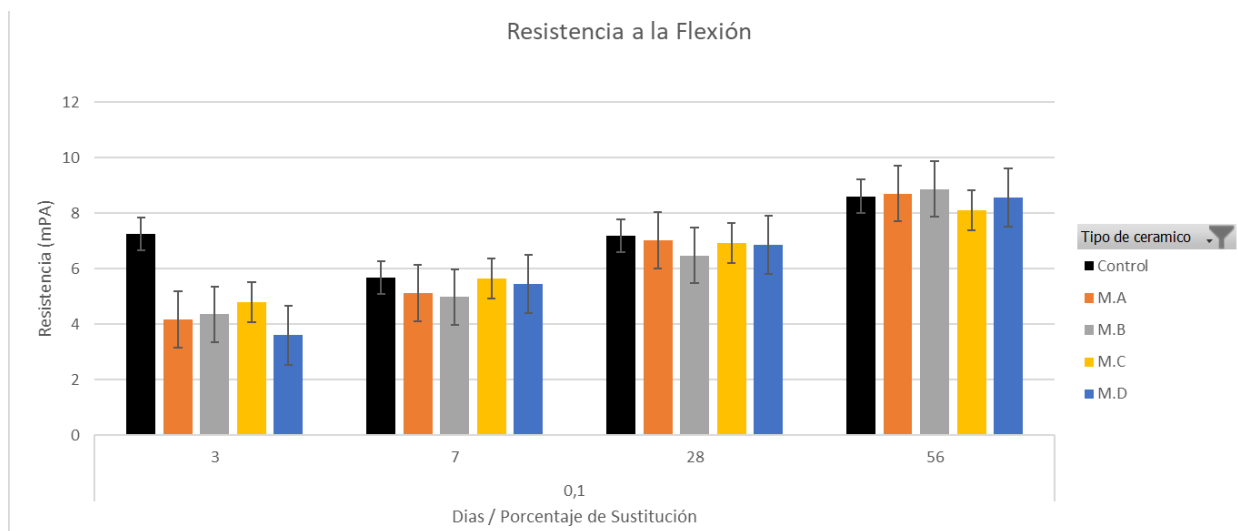


**5.2.4.1.2.** Resistencia a la flexión de morteros con 10 % de adición cerámica.

Como puede observarse en la Figura 5.2.4.2, a los 3 días el mortero de control supera a las muestras, pero a lo largo del tiempo, los valores se nivelan, donde a los 56 días no hay diferencias significativas con respecto al mortero de control.

101

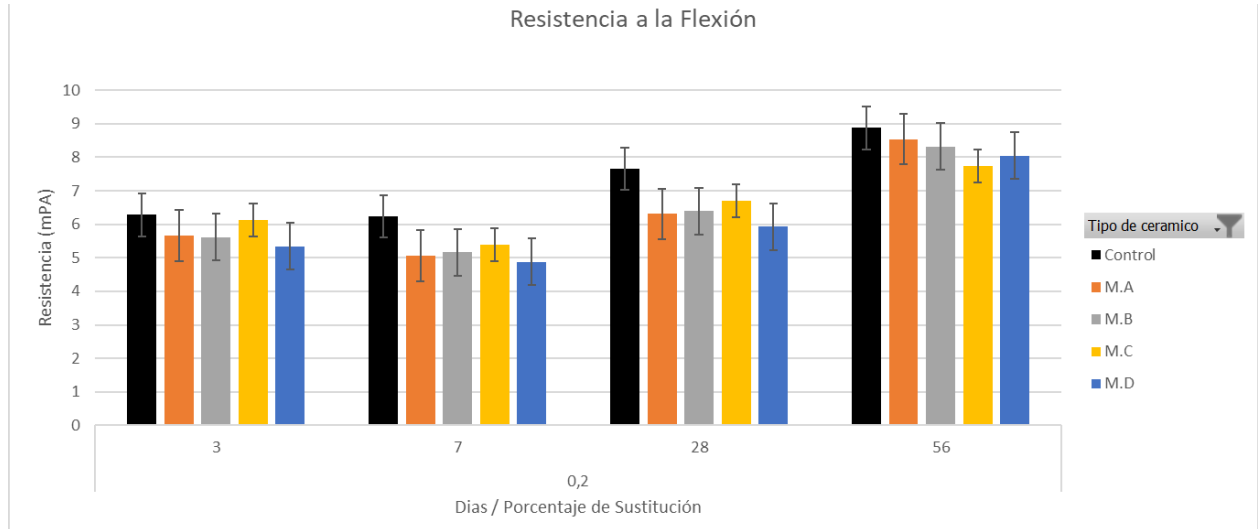
**FIGURA 5.2.4.2.** Resistencia a la flexión de morteros con 10 % de adición cerámica.



### 5.2.4.1.3. Resistencia a la flexión de morteros con 20% de adición cerámica.

Como puede observarse en la Figura 5.2.4.3., las resistencias de los diferentes morteros con adición cerámica se encuentran en el orden del 15 % debajo del mortero de control en las edades de 3 y 7 días y hasta un 20 % en las edades de 28. A los 56 días, los morteros M.A, M.D y M.B están debajo entre un 5 % y 9 %, los morteros M.C y M.E se encuentran entre un 12 % y 23 % inferior al control.

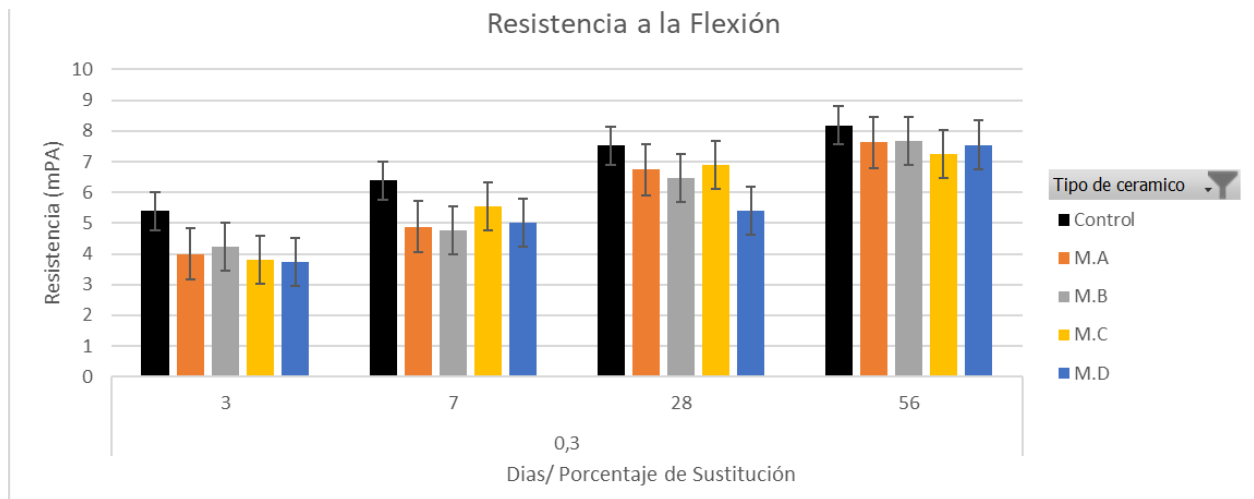
FIGURA 5.2.4.3. Resistencia a la flexión de morteros con 20% de adición cerámica.



### 5.2.4.1.4. Resistencia a la flexión de morteros con 30 % de adición cerámica.

Como puede observarse en la Figura 5.2.4.4, la resistencia de los diferentes morteros varía significativamente en las diferentes edades con respecto al mortero de control. Si bien en edades tempranas, los morteros tienen un valor del 80 % de la muestra de control. Sin embargo, para la edad de 56 días, los valores de los morteros con adición cerámica aumentan hasta compartir el 93 % de la muestra de control.

**FIGURA 5.2.4.4.** Resistencia a la flexión de morteros con 30 % de adición cerámica.

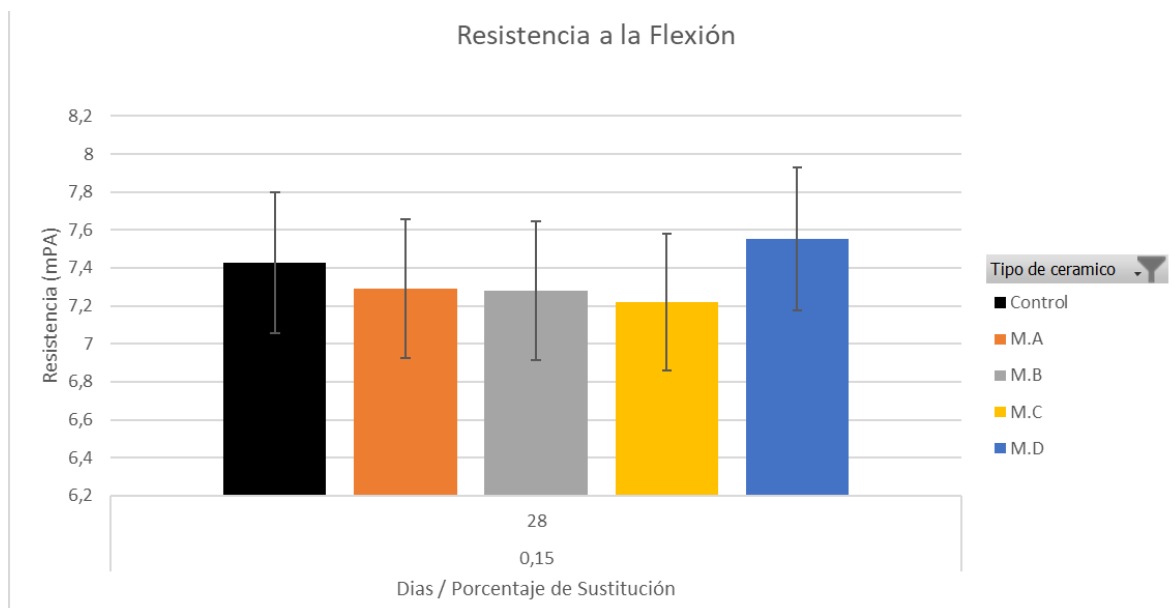


#### 5.2.4.1.5. Resistencia a la flexión de morteros con 15 % de adición cerámica.

Posteriormente de realizar los ensayos y analizar los resultados obtenidos correspondientes a los morteros con sustituciones de 5 %, 10 %, 20 % y 30 %, se procedió a realizar el ensayo con un mortero, donde se sustituyó el 15 % a 28 días de edad. Con la finalidad de determinar el límite máximo de sustitución de adición cerámica, antes que esta impacte en la resistencia mecánica, disminuyendo significativamente sus valores con respecto al mortero de control.

Los resultados demuestran en la Figura 5.2.4.5, que la resistencia a la flexión de los diferentes morteros no varía significativamente con respecto al mortero de control.

**FIGURA 5.2.4.5.** Resistencia a la flexión de morteros con 15 % de adición cerámica.



#### 5.2.4.2. Resistencia a Compresión

104

Los resultados de las resistencias a compresión de las probetas de  $(4 \times 4 \times 16) \text{ cm}^3$  realizadas a las edades de 3, 7, 28 y 56 días y en los diferentes porcentajes de sustitución, se pueden recoger en los siguientes gráficos.

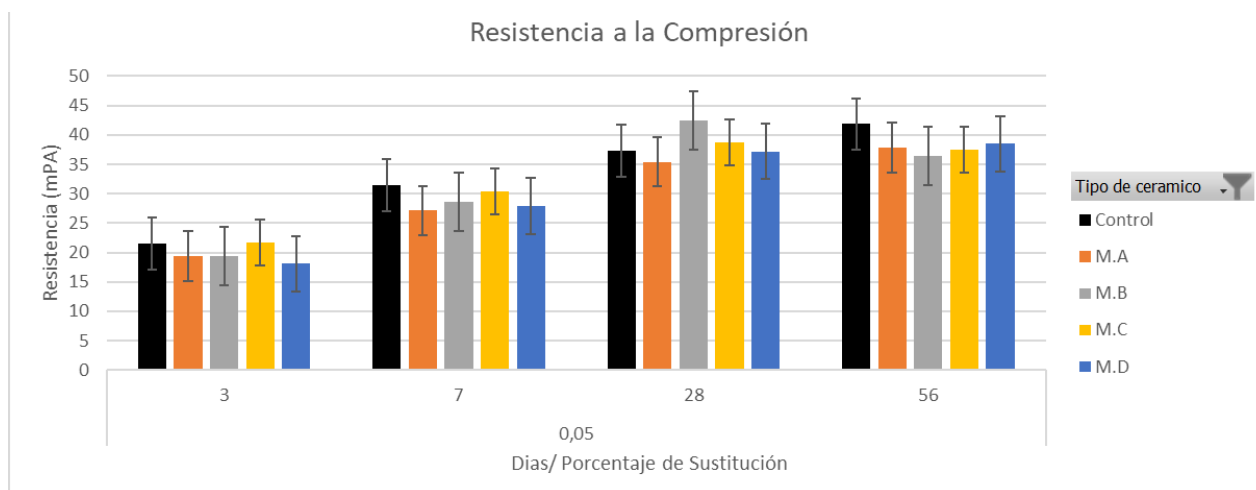
##### 5.2.4.2.1. Resistencia a la compresión de morteros con 5 % de adición cerámica.

Como puede observarse en la Figura 5.2.4.6, la resistencia de los diferentes morteros no varía significativamente en las edades de 3 y 7 días. A los 28 días, cabe destacar un aumento del mortero M.B un 16 % respecto al mortero de control. El resto de los morteros no presentan diferencias significativas para la misma edad. Sin embargo, para la edad de 56 días, los morteros con adición puzolánica presentan una disminución entre un 8 % y 12 % de la resistencia.

El estudio del índice de actividad puzolánica a los 28 días, demuestra que las resistencias obtenidas en los morteros realizados con matrices mixtas, superan el 75 % del valor obtenido con el mortero de referencia como puede observarse en la Tabla 5.2.4.6.



**FIGURA 5.2.4.6.** Resistencia a la compresión de morteros con 5 % de adición cerámica.



**TABLA 5.2.4.6.** Índice de actividad puzolánica. Pastas con 5 % de adición cerámica.

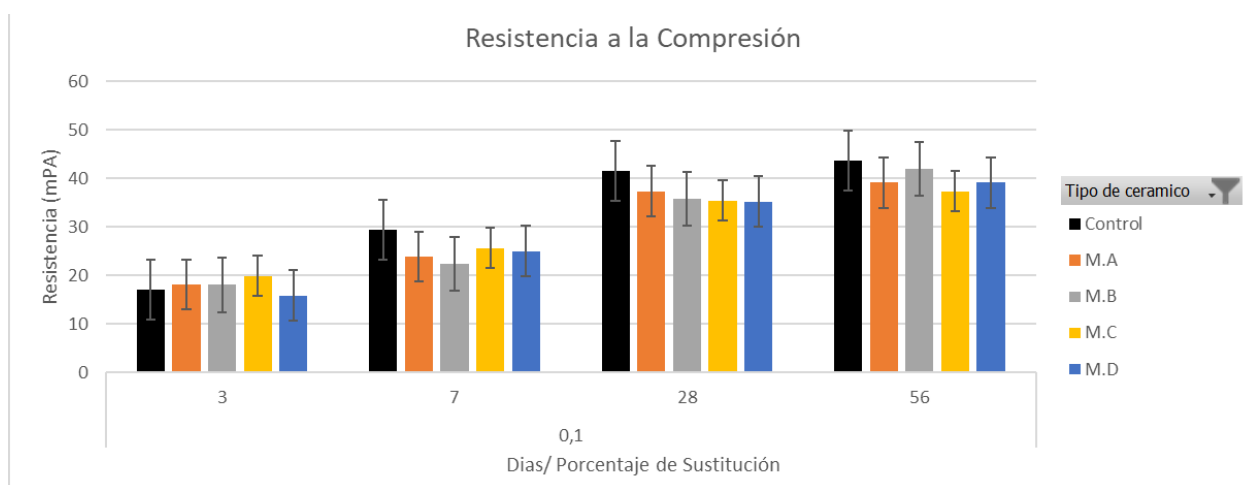
TIPO DE MUESTRA	REQUERIMIENTOS	% DE SUSTITUCION
		5 %
MUESTRA A (TICHOLO)		94,91 %
MUESTRA B (PRENSA)		113, 81 %
MUESTRA C (CHORIZO)	Índice de actividad puzolánica con cemento a los 28 días >75 %	103,90 %
MUESTRA D (ARTESANAL)		99,79 %

#### 5.2.4.2.2. Resistencia a la compresión de morteros con 10 % de adición cerámica.

Los resultados obtenidos en la Figura 5.2.4.7, indican que, si bien a la edad de 3 días los morteros con puzolana superan en el orden de un 15 % la resistencia del mortero de control, para el resto de las edades, los morteros puzolánicos están entre un 10 % y un 15 % debajo del mortero de referencia.

El estudio del índice de actividad puzolánica a los 28 días, demuestra que todos los morteros realizados superan el 75 % de referencia como se puede ver en la Tabla 5.2.4.7.

**FIGURA 5.2.4.7.** Resistencia a la compresión de morteros con 10 % de adición cerámica.



**TABLA 5.2.4.7.** Índice de actividad puzolánica. Pastas con 10 % de adición cerámica.

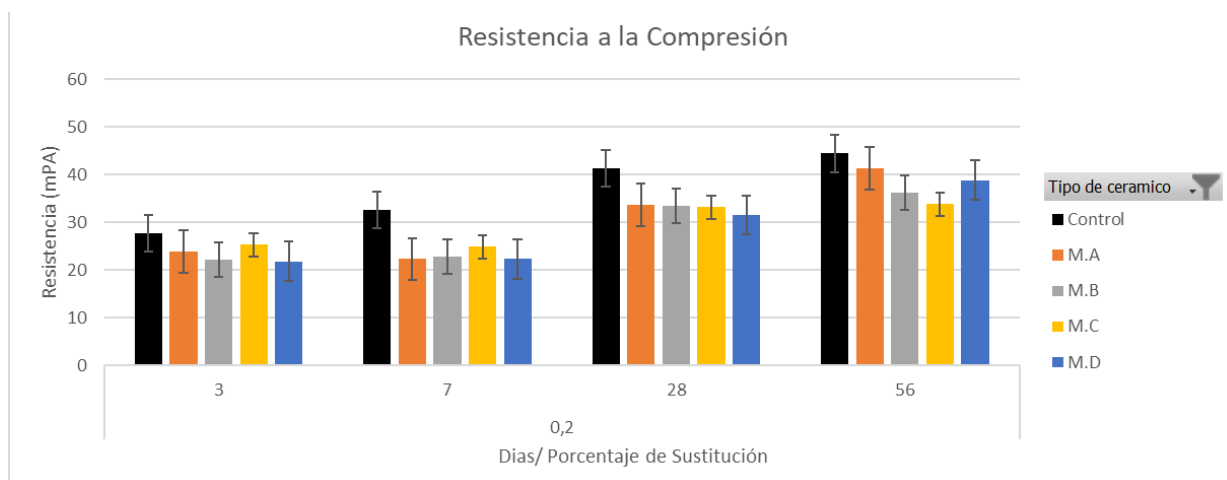
TIPO DE MUESTRA	REQUERIMIENTOS	% DE SUSTITUCION
		<b>10 %</b>
MUESTRA A (TICHOLO)		90 %
MUESTRA B (PRENSA)	Índice de actividad puzolánica con cemento a los 28 días >75 %	86,26 %
MUESTRA C (CHORIZO)		85,37 %
MUESTRA D (ARTESANAL)		84,87 %

### 5.2.4.2.3. Resistencia a la compresión de morteros con 20 % de adición cerámica.

En la Figura 5.2.4.8, puede observarse que para una sustitución del 20 % del peso del cemento, a los 3 días no presentan diferencias significativas. Pero sin embargo a los 7 y 28 días, el mortero de referencia se encuentra un 25 % a 35 % sobre los morteros con adiciones puzolánicas. Para el caso de los 56 días, si bien el mortero de control tiene una resistencia superior a todos los demás, cabe desatacar que los morteros M.A y M.D, están 7 % y 12 % debajo del control.

El estudio del índice de actividad puzolánica a los 28 días, demuestra que todos los morteros realizados superan el 75 % de referencia como puede apreciarse en la Tabla 5.2.4.8.

**FIGURA 5.2.4.8.** Resistencia a la compresión de morteros con 20 % de adición cerámica.



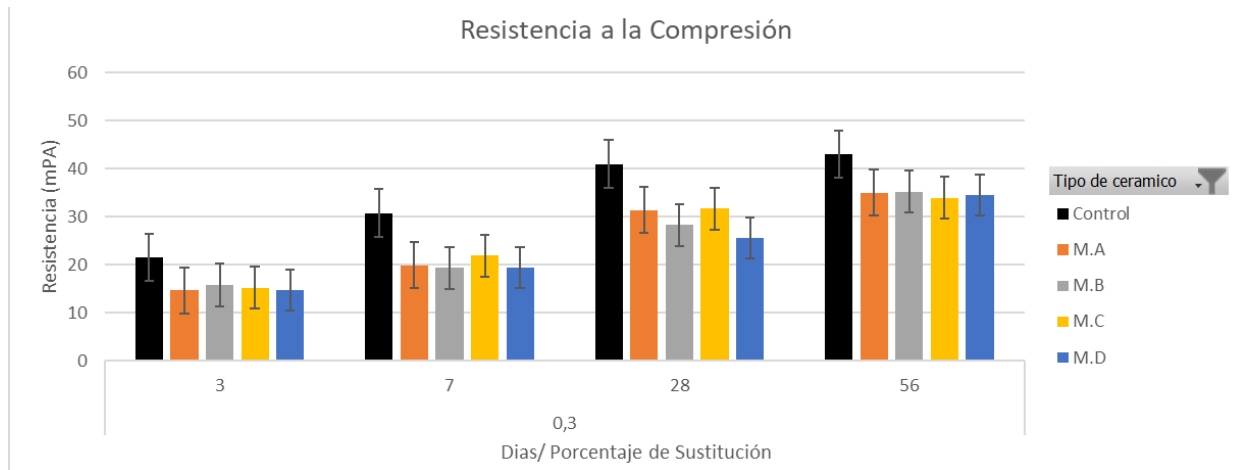
**TABLA 5.2.4.8.** Índice de actividad puzolánica. Pastas con 20 % de adición cerámica.

TIPO DE MUESTRA	REQUERIMIENTOS	% DE SUSTITUCION
		20 %
MUESTRA A (TICHOLO)	Índice de actividad puzolánica con cemento a los 28 días >75 %	81,54 %
MUESTRA B (PRENSA)		81,01 %
MUESTRA C (CHORIZO)		80,49 %
MUESTRA D (ARTESANAL)		76,56 %

#### 5.2.4.2.4. Resistencia a la compresión de morteros con 30 % de adición cerámica.

Los resultados obtenidos en la Figura 5.2.4.9, indican que en todas las edades el mortero de referencia tiene diferencias significativas con el resto de los morteros con adiciones cerámicas en todas las edades. En general hay una disminución de la resistencia entre un 35 % para edades más tempranas y 25 % para las edades de 20 y 56 días.

**FIGURA 5.2.4.9.** Resistencia a la compresión de morteros con 30 % de adición cerámica.



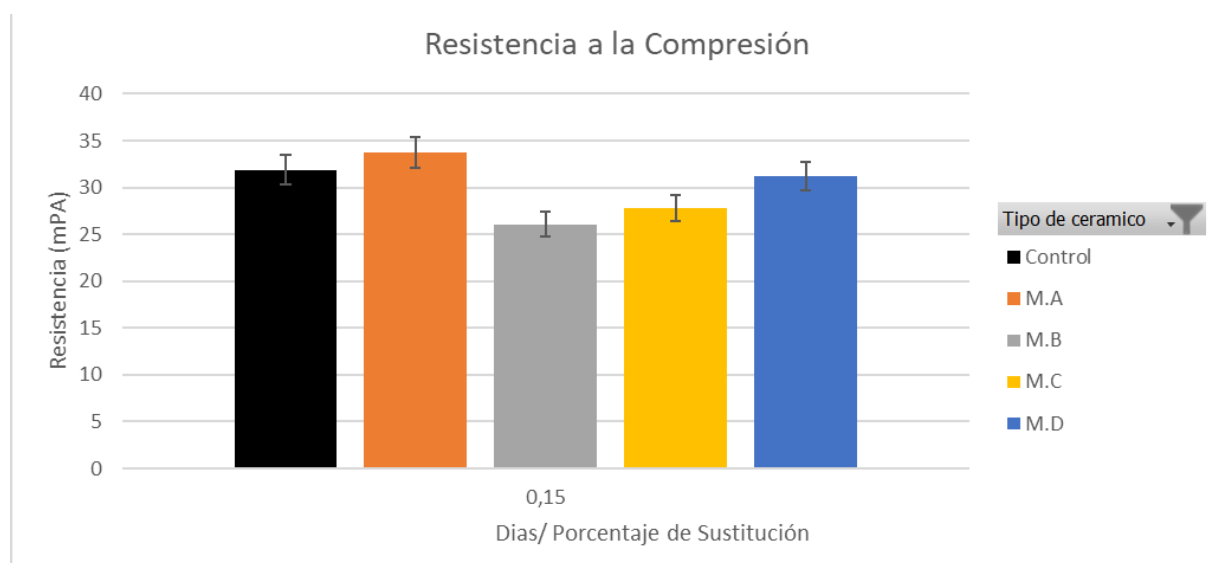
#### 5.2.4.2.5. Resistencia a la compresión de morteros con 15 % de adición cerámica.

En este caso, se realizó un estudio con una sustitución al 15 % del cemento a una edad de 28 días como se puede observar en la Figura 5.2.4.10 Con la finalidad de determinar el límite máximo de sustitución de adición cerámica, antes que esta impacte en la resistencia mecánica, disminuyendo significativamente sus valores con respecto al mortero de control.

Obteniéndose que, salvo el mortero M.B y M.C que están en el orden de un 15 % inferior al control, en el resto de los morteros no hay diferencias significativas.

El estudio del índice de actividad puzolánica a los 28 días, demuestra que todos los morteros realizados superan el 75 % de referencia como se puede observar en la Tabla 5.2.4.9.

**FIGURA 5.2.4.10.** Resistencia a la compresión de morteros con 15 % de adición cerámica.



**TABLA 5.2.4.9.** Índice de actividad puzolánica. Pastas con 15 % de adición cerámica.

TIPO DE MUESTRA	REQUERIMIENTOS	% DE SUSTITUCION
		15 %
MUESTRA A (TICHOLO)		105,85 %
MUESTRA B (PRENSA)	Índice de actividad puzolánica con cemento a los 28 días >75 %	81,85 %
MUESTRA C (CHORIZO)		87,02 %
MUESTRA D (ARTESANAL)		97,88 %

### 5.3. Caracterización según norma UNIT 1047:1999 [21]

A continuación, se presentan los requisitos físicos y químicos según la norma UNIT 1047:1999 [2] con el fin de realizar la caracterización de los materiales puzolánicos y compararlos con los resultados obtenidos para cada requisito solicitado.

En la Tabla 5.3.1. podemos observar como todas las muestras cerámicas estudiadas retienen menos de un 34 % sobre el tamiz de 45  $\mu\text{m}$  con lo que su finura es apropiada para ser utilizada en conglomerantes cementantes.

**TABLA 5.3.1.** Requisitos físicos según la norma 1047:1999 [2].

TIPO DE MUESTRA	CLASIFICACION (UNIT 1047) CLASE	REQUERIMIENTOS	RESULTADOS
MUESTRA A (TICHOLO)	N		17 %
MUESTRA B (PRENSA)	N	Material retenido sobre tamiz de 45 micras	6 %
MUESTRA C (CHORIZO)	N	< 34 %	10 %
MUESTRA D (ARTESANAL)	N		7 %

110

Mientras que en la Tabla 5.3.2. se tabulan los resultados sobre el índice de actividad puzolánica, como se describe en el capítulo 4.3.4, donde los morteros realizados deben superar el 75 % de la resistencia mecánica a compresión en contraposición con la resistencia del mortero de referencia. Se aprecia que todos los morteros hasta con un 20 % de sustitución superan los requisitos físicos solicitados por la norma. Mientras que aquellos morteros con un 30 % de sustitución, solo los morteros M.B (ladrillo de prensa) y M.D (artesanal estándar) no superan el 75 % y el resto de los morteros lo hace estrechamente.

**TABLA 5.3.2.** Requisitos físicos según la Norma UNIT 1047:1999 [2].

TIPO DE MUESTRA	REQUERIMIENTOS	% DE SUSTITUCION				
		5 %	10 %	15 %	20 %	30 %
MUESTRA A (TICHOLO)		94,91 %	90 %	105,85 %	81,54 %	76,73 %
MUESTRA B (PRENSA)	Índice de actividad puzolánica con cemento a los 28 días >75 %	113,81 %	86,26 %	81,85 %	81,01 %	69,07 %
MUESTRA C (CHORIZO)		103,90 %	85,37 %	87,02 %	80,49 %	77,42 %
MUESTRA D (ARTESANAL)		99,79 %	84,87 %	97,88 %	76,56 %	62,67 %

Según la Norma UNIT 1047:1999 [10] la puzolana debe superar el 34 % en  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$  o  $Fe_2O_3$  de acuerdo con la Tabla 5.3.3. se aprecia que todas las muestras cuentan con un porcentaje entre 70 % y un 80 % de óxido de silicio cumpliendo con la normativa. Cabe recordar que son estos óxidos son los que reaccionan con la Portlandita para formar compuestos cementantes.

**TABLA 5.3.3.** Requisitos químicos según la Norma UNIT 1047:1999 [2].

TIPO DE MUESTRA	REQUERIMIENTO	REQUERIMIENTO	REQUERIMIENTO	REQUERIMIENTO	CONTENIDO DE HUMEDAD	PERDIDA POR CALCINACION
	$Al_2O_3 > 34\%$	$SiO_2 > 34\%$	$Fe_2O_3 > 34\%$	$SO_2 < 4\%$	$< 3\%$	$< 10\%$
MUESTRA A (TICHOLO)	14,50 %	77,40 %	5,10 %	-	0,11 %	1 %
MUESTRA B (PRENSA)	14,10 %	77,30 %	4,90 %	-	0,18 %	0,60 %
MUESTRA C (CHORIZO)	14,20 %	71,60 %	4,70 %	-	0,37 %	4 %
MUESTRA D (ARTESANAL)	12,40 %	80,50 %	4,80 %	-	2,32 %	0,60 %

De acuerdo con la norma UNIT 1047:1999 [2], la pérdida de calcinación para las puzolanas de clase N, debe ser menor al 10 % de la masa inicial. El total de las muestras ensayadas se encuentran debajo del 10 %, cumpliendo así con la normativa vigente. Así mismo, el total de las muestras cerámicas presentaron un contenido de humedad menor al 3 % solicitado por la norma.

Luego de analizar los resultados de las muestras cerámicas por fluorescencia de rayos X, en ninguna de las muestras se pudo determinar la presencia de azufre (S), por lo que se concluye que las muestras no presenten tampoco, dióxido de azufre ( $SO_2$ ).

La normativa solicita como requerimiento químico, además, el estudio de los álcalis disponibles donde las muestras no pueden superar el 1,5 % de dióxido de sodio ( $NaO_2$ ). El ensayo no se realizó en la presente investigación, pero cruzando con los datos obtenidos a través de la fluorescencia de rayos X, podemos ver que salvo una medición (muestra D), en todos los cerámicos se presentan concentraciones de sodio menores al 1,5 %.

Adicionalmente, para evaluar la viabilidad de uso de una adición mineral activa en la producción de morteros, resulta fundamental estudiar la actividad puzolánica de la misma.

La actividad puzolánica es la capacidad de una adición mineral de reaccionar con el hidróxido de calcio, para formar compuestos cementantes similares a los generados durante la hidratación del cemento Portland. El estudio buscó evaluar la capacidad de fijación de cal y formación de hidratos por parte de la incorporación de residuos cerámicos, aplicando para ello la técnica de termogravimetría.

A partir de la termogravimetría se observó que los residuos cerámicos se comportan como una puzolana reactiva que contribuye con la formación de nuevos productos hidratados de manera que fija el hidróxido de calcio y su reactividad se incrementa a lo largo del tiempo.

La fijación de cal fue determinada tanto para pastas de cal/puzolana como para pastas de cemento/puzolana. Los resultados mostraron que la actividad puzolánica de los residuos cerámicos se ve potenciada a medida que las edades de curado son mayores, alcanzando fijaciones de cal de aproximadamente el 74 % en pastas de cal con relación 2:8 y 3:7 a los 56 días de curado en ambos tipos de cerámico estudiado. En base a los resultados, se evidencia una alta reactividad puzolánica entre los distintos tipos de residuos cerámicos y el hidróxido de calcio.

A partir de los resultados de los ensayos mecánicos realizados podemos observar la influencia de la adición mineral sobre el mortero comparando los valores del incremento o disminución de sus propiedades mecánicas con respecto al mortero de control. Las características de mineralógicas de la puzolana y por lo tanto las diferentes reacciones físico químicas producidas en el uso de conglomerantes a base de cemento Portland, son responsables de este comportamiento.

En lo que respecta a las propiedades mecánicas, en líneas generales, se puede decir que los morteros con adición cerámica presentan valores de resistencia inferiores al mortero control.

112

No obstante, el avance de la edad de curado hace que la resistencia mecánica de dichos morteros se incremente, de modo que, a los 56 días de curado, sus resistencias se encuentren en un rango, cuyo límite inferior es el mismo porcentaje de sustitución de cemento que de disminución en la resistencia a compresión y límite superior valores cercanos a la resistencia del mortero control. Ese comportamiento presentado por los residuos cerámicos muestra que dichos materiales tratan de una adición mineral reactiva, y que su reactividad se ve potenciada a largas edades de curado.

El uso de puzolanas como adición a conglomerantes de cemento Portland está asociada a un porcentaje óptimo de utilización, refiriéndose al valor máximo de adición de mineral sin que las propiedades mecánicas disminuyan en comparación con el conglomerante de control. Se puede observar que en morteros con una sustitución de entre 20 % y 30 %, consumen el total del hidróxido de calcio aportado por el cemento, quedando adición mineral sin poder reaccionar, disminuyendo la resistencia mecánica final del mortero.

Se puede decir que entre el 10 % y el 20 % de sustitución podría ser el intervalo óptimo de utilización, donde las propiedades mecánicas de los morteros son muy similares, sobre todo a 28 días de curado. Sin embargo, se detecta que a 28 días el óptimo de sustitución se sitúa alrededor del 15 % de sustitución por adición cerámica.



## CAPITULO 6 | CONCLUSIONES

### 6.1. Conclusiones Generales

Por medio de la caracterización de los residuos cerámicos se ha podido conocer con mayor profundidad las propiedades físicas, químicas, morfológicas y mineralógicas del material. Analizando los resultados experimentales obtenidos, se pueden establecer las siguientes conclusiones en relación a la viabilidad de utilizar residuos cerámicos, existentes en nuestro medio, como adición puzolánica en matrices a base de cemento Portland.

- Debido a su procedencia las muestras de los residuos cerámicos nacionales ensayados pueden ser clasificados como puzolanas artificiales, arcillas calcinadas según la norma UNIT NM 1047:1999: Materiales puzolánicos. Definiciones y requisitos [2].
- A su vez, las diferentes matrices cementicias realizadas con residuos de cerámicos cumplen con las especificaciones físico químicas requeridas por la normativa vigente UNIT NM 1047:1999: Materiales puzolánicos. Definiciones y requisitos [2].
- Los residuos cerámicos nacionales, sean producidos industrialmente o con métodos artesanales, presentan características puzolánicas lo que demuestra que las temperaturas de cocción para la fabricación de estos productos son idóneas para la activación de las arcillas que los componen.
- En cuanto a la resistencia a la compresión, en todos los casos el porcentaje de disminución, calculado con respecto al control, es inferior al grado de sustitución de cemento, lo que indica que los materiales de desecho actúan como puzolanas, aportando resistencia mecánica, lo que repercute positivamente en los materiales puestos en obra.
- Las resistencias a la flexión de los morteros, elaborados con sustituciones entre un 5 % y un 30 % de residuo cerámico, no varían significativamente con respecto al mortero de control en todos los porcentajes de sustitución y edades estudiados.
- El empleo de residuos cerámicos puede ser utilizado en la elaboración de morteros de base cementicia, con buenos resultados técnicos y ventajas económicas, obteniéndose los mejores resultados con porcentajes de sustitución de cemento comprendidos entre el 10 % y el 20 %.
- Las mediciones de pH, realizadas en las pastas cementicias en sus diferentes porcentajes de sustitución, se encuentran en valores medios de  $(12,3 \pm 0,03)$ , propios a niveles alcalinos esperables por la presencia de  $\text{Ca(OH)}_2$ ,  $\text{NaOH}$  y el  $\text{KOH}$  [19].

- A su vez, se observó una disminución en la conductividad eléctrica a medida que el porcentaje de sustitución por residuos cerámicos es mayor. Existiendo una reducción de la conductividad eléctrica de un 16 % para aquellas pastas con una sustitución del 30 % con respecto a las pastas donde fue sustituido el 10 % por adición cerámica.
- Las ventajas económicas y ambientales, derivan del ahorro energético en la fabricación del cemento, donde puede resultar posible la sustitución de un material que necesita de un tratamiento térmico costoso, como es el proceso de clinkerización, por un material más barato energéticamente, como son los residuos cerámicos, un desecho industrial, aunque éste necesite de un tratamiento previo de molienda, presenta una mejora en la ecuación energética, que contribuye positivamente a la conservación del medio ambiente.
- Adicionalmente a las reducciones de emisiones de CO<sub>2</sub>, la sustitución parcial de CPN, por residuos cerámicos, tendría un impacto ambiental positivo, porque permitiría el reciclaje de un desecho que de otra manera es dispuesto en vertederos con los peligros ambientales que ello conlleva.
- Por último, no se evidenciaron diferencias en el comportamiento mecánico entre los cerámicos realizados por métodos de producción diferentes, ni incidencia de la temperatura de cocción de los distintos cerámicos estudiados en su actividad puzolánica.

114

Se puede afirmar que, por lo anteriormente expresado, existe una posibilidad de valorización de residuos cerámicos como puzolanas alternativas para cementos y morteros eco eficientes. Consiguiendo una mejora ambiental como consecuencia de la utilización de un residuo proveniente de una cadena industrial sino también por su ventaja científico técnicas demostradas.

## **6.2. Futuras líneas de investigación**

En base a los resultados obtenidos en este trabajo, queda demostrado el potencial que tienen estos residuos cerámicos para constituirse en favor de materiales con matrices cementicias lo cual justifica la profundización de su estudio.

En ellos ha quedado pendiente lo referente al:

- El estudio de la colaboración de las puzolanas cerámicas en las resistencias mecánicas a largo plazo.
- Estudios de durabilidad, carbonatación y reactividad frente a agentes químicos agresivos y su empleo en mezclas que utilicen áridos de mayor tamaño.

- El estudio de la durabilidad de armaduras embebidas en morteros adicionados con puzolánica cerámica.
- Valoración de la energía incorporada en el residuo cerámico.

Desde un punto de vista medioambiental, se podrían realizar estudios referentes al impacto que puede tener el uso de este tipo de materiales en la sustitución del cemento y los procedimientos de reciclado y su disposición de una manera más adecuada para estos tipos de materiales. Además, es necesario el estudio y caracterización de residuos de construcción provenientes de plantas de disposición final y/o reciclaje, donde pueden encontrarse residuos cerámicos mezclados con otros residuos como pueden ser morteros, hormigones u otros materiales con el fin de comparar resultados y posibilidades de reciclaje.

Finalmente, en cuanto a su aplicación también se deberá realizar el estudio para su utilización en elementos constructivos como pueden ser elementos estructurales, elementos de cubierta y paneles de revestimiento interior y/o exterior. A su vez, es necesario el estudio de las posibilidades de fabricación de cemento y/o mortero compuesto por adiciones de residuo cerámico a nivel industrial.

## CAPITULO 7 | REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] M. M. Tashima, «Producción y caracterización de materiales cementantes a partir del Silicoaluminato Cálcico Vítreo (VCAS)», p. 431, 2012.
- [2] Instituto Uruguayo de Normas Técnicas, «NORMA UNIT 1047:1999 Materiales puzolánicos. Definiciones y requisitos.» UNIT, p. 6, 1999.
- [3] X. F. Zhang, S. Y. Zhang, Z. Y. Hu, G. Yu, C. H. Pei, y R. N. Sa, «Identification of connection units with high GHG emissions for low-carbon product structure design», *J. Clean. Prod.*, vol. 27, pp. 118-125, 2012.
- [4] Naciones Unidas, «Convención Marco sobre el Cambio Climático», 2015.
- [5] IPCC, «Cambio Climático 2014. Informe de síntesis», 2014.
- [6] CEMBUREAU, «CEMBUREAU», 2015. [En línea]. Disponible en: <http://www.cembureau.be/about-cement/key-facts-figures>. [Accedido: 16-mar-2017].
- [7] R. Kajaste y M. Hurme, «Cement industry greenhouse gas emissions - Management options and abatement cost», *J. Clean. Prod.*, vol. 112, pp. 4041-4052, 2016.
- [8] Emad Benhelal a, E. S. b Gholamreza Zahedi a,\* , y Alireza Bahadori c, «Global strategies and potentials to curb CO2 emissions in cement industry», 2012.
- [9] Fichtner-LKSUR, «Tomo I. Plan director de Residuos Sólidos. Plan director de Residuos Sólidos de Montevideo y Área Metropolitana», p. 149, 2005.
- [10] Fichtner-LKSUR, «ANEXO : Residuos Sólidos Urbanos Plan Director de Residuos Sólidos de Montevideo y Área Metropolitana», 2004.
- [11] C. James y P. Will, *Ladrillo. Historia Universal*, 1a ed. Barcelona, 2004.
- [12] F. Puertas, A. Barba, M. F. Gazulla, M. P. Gómez, y M. Palacios, «LA FABRICACIÓN DE CLÍNKER DE CEMENTO PORTLAND : CARACTERIZACIÓN y ACTIVACIÓN ALCALINA», *Reading*, vol. 56, pp. 73-84, 2006.
- [13] H. G. van Oss y A. C. Padovani, «Cement manufacture and the Environment- Part II: Environmental challenges and opportunities», *J. Ind. Ecol.*, vol. 7, n.º 1, pp. 93-126, 2003.
- [14] K. S. Mujumdar, K. V. Ganesh, S. B. Kulkarni, y V. V. Ranade, «Rotary Cement Kiln Simulator (RoCKS): Integrated modeling of pre-heater, calciner, kiln and clinker cooler», *Chem. Eng. Sci.*, vol. 62, n.º 9, pp. 2590-2607, 2007.
- [15] A. T. Engineering, T. Bombay, y T. Bombay, «Energy balance and cogeneration for a cement plant . Appl Therm Eng», vol. 22, n.º February 2016, pp. 485-494, 2002.
- [16] R. D. Toledo Filho, J. P. Gonçalves, B. B. Americano, y E. M. R. Fairbairn, «Potential for use of crushed waste calcined-clay brick as a supplementary cementitious material in Brazil», *Cem. Concr. Res.*, vol. 37, n.º 9, pp. 1357-1365, 2007.
- [17] J. Stig, «POZZOLANIC ACTIVITY OF CALCINED MOLER CLAY ABSTRACT», *Cem. Concr. Res.*, vol. 20, n.º c, pp. 447-452, 1990.

- [18] M. TASHIMA, L. SORIANO, J. MONZÓ, M. V. Borrachero, J. L. Akasaki, y J. PAYÁ, «New method to assess the pozzolanic reactivity of mineral admixtures by means of pH and electrical conductivity measurements in lime:pozzolan suspensions», *Mater. Construcción*, vol. 64, n.º 316, p. 12, 2014.
- [19] P. L. Aranda, «EFECTO DE LA ADICIÓN DE HIDRÓXIDO CÁLCICO SOBRE MEZCLAS CON ALTA SUSTITUCIÓN DE CEMENTO POR CENIZA VOLANTE.», 2014.
- [20] P. Muñoz, M. P. Morales, V. Letelier, y M. A. Mendivil, «Fired clay bricks made by adding wastes: Assessment of the impact on physical, mechanical and thermal properties», *Constr. Build. Mater.*, vol. 125, pp. 241-252, 2016.
- [21] M. P. Association, «Brick and block production», 2013.
- [22] I. de la Construcción, «Materiales ceramicos», 2002.
- [23] L. Soriano, «Nuevas aportaciones en el desarrollo de materiales ceemtnante con residuo de catalizador de craqueo catalítico usado (FCC)», *Univ. Politècnica València*, 2007.
- [24] S. A. Abo-El-Enein, R. Abbas, y E.-S. Ezzat, «Propiedades y durabilidad de los cementos adicionados con metacaolín», *Prop. Durab. metakaolin blended Cem.*, vol. 60, n.º 299, pp. 21-35, 2010.
- [25] M. I. Sanchez de Rojas, F. P. Marín, M. Frías, y J. Rivera, «Viability of utilization of waste materials from ceramic products in precast concretes», *Mater. Construcción*, vol. 51, n.º 263-264, pp. 149-161, 2001.
- [26] V. F. Rahhal, C. Pedrajas, y F. Irassar, «EFECTO DE PUZOLANAS NATURALES SOBRE LA REOLOGÍA DE PASTAS DE CEMENTO PORTLAND», *Concreto y Cem. Investig. y Desarro.*, vol. 5, n.º 2, pp. 2-11, 2014.
- [27] M. I. Sánchez de Rojas, M. Frías, J. Rivera, y F. P. Marín, «Aprovechamiento del cascote cerámico como material puzolánico», *Cemento-hormigón*, vol. 79, n.º 915, pp. 32-41, 2008.
- [28] M. Esther y F. Iglesias, «Refuerzo de matrices cementicias mediante la valorización de fibras sintéticas provenientes de residuos post-consumo», 2013.
- [29] M. P. de Oliveira y N. P. Barbosa, «Potencialidades de um caulim calcinado como material de substituição parcial do cimento portland em argamassas», *Rev. Bras. Eng. Agrícola e Ambient.*, vol. 10, n.º 2, pp. 490-496, jun. 2006.
- [30] P. K. Metha y P. J. M. Monteiro, *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials (Mechanical Engineering)*, 4 edition. 2013.
- [31] S. Johansson y P. J. Andersen, «Pozzolanic activity of calcined moler clay», *Cem. Concr. Res.*, vol. 20, n.º 3, pp. 447-452, may 1990.
- [32] N. Ay y M. Ünal, «The use of waste ceramic tile in cement production», *Cem. Concr. Res.*, vol. 30, n.º 3, pp. 497-499, 2000.
- [33] M. O'Farrell, B. B. Sabir, y S. Wild, «Strength and chemical resistance of mortars containing brick manufacturing clays subjected to different treatments», *Cem. Concr. Compos.*, vol. 28, n.º 9, pp. 790-799, 2006.

- [34] J. P. Gon, «Engenharia Civil Utilização do resíduo da indústria cerâmica para produção de concretos», vol. 60, n.º 4, 2007.
- [35] F. Pacheco-torgal y S. Jalali, «Reusing ceramic wastes in concrete», *Constr. Build. Mater.*, vol. 24, n.º 5, pp. 832-838, 2010.
- [36] A. Naceri y M. C. Hamina, «Use of waste brick as a partial replacement of cement in mortar», *Waste Manag.*, vol. 29, n.º 8, pp. 2378-2384, 2009.
- [37] F. Puertas, I. García-Díaz, M. Palacios, M. F. Gazulla, M. P. Gómez, y M. Orduña, «Clinkers and cements obtained from raw mix containing ceramic waste as a raw material. Characterization, hydration and leaching studies», *Cem. Concr. Compos.*, vol. 32, n.º 3, pp. 175-186, 2010.
- [38] S. Angela Teresa Costa y A. F. Ricardo dos Santos, «Efeito do pó de resíduo cerâmico como adição ativa para o concreto», *Ambient. Construído*, vol. 14, pp. 113-125, 2014.
- [39] D. M. Kannan, S. H. Aboubakr, A. S. El-dieb, y M. M. Reda, «High performance concrete incorporating ceramic waste powder as large partial replacement of Portland cement», vol. 144, pp. 35-41, 2017.
- [40] Instituto Uruguayo de Normas Técnicas, «Norma UNIT-ISO 679:2009 Métodos de ensayo de cementos. Determinación de resistencias mecánicas.», p. 38, 2009.
- [41] Instituto Uruguayo de Normas Técnicas, «UNIT 20:2017 Cementos pórtland para uso general - Definiciones y requisitos», p. 13, 2017.
- [42] M. Frías, I. Sánchez, M. Luxan, y N. García, «Granulometría láser : Estudio comparativo con las técnicas de tamizado y elutriación aplicado a materiales puzolánicos Láser granulometry : A comparative study the techniques of sieving and elutriation applied to pozzolanic materials», *Mater. Construcción*, vol. 40, n.º 217, pp. 39-52, 1990.
- [43] Instituto Uruguayo de Normas Técnicas, «UNIT-NM 24:2004 Materiales puzolánicos. Determinación del contenido de humedad.», p. 2, 2004.
- [44] M. M. Alejandro Giraldo y J. Iván Tobón, «Evolución Mineralógica Del Cemento Portland Durante El Proceso De Hidratación Mineralogical Evolution of Portland Cement During Hydration Process», *Dyna*, vol. 73, n.º 148, pp. 69-81, 2006.