

## **INCORPORACIÓN DE RESIDUOS INDUSTRIALES EN CEMENTOS PARA SU UTILIZACIÓN EN CAPAS ESTRUCTURALES DE CAMINOS.**

### **Autores:**

<sup>1</sup>Kreiker, Jerónimo

Dirección: Entre Ríos 968, Almafuerde – 5854 - Córdoba.

Te.: 0351 - 156635329

Correo electrónico: [jkreiker@ceve.org.ar](mailto:jkreiker@ceve.org.ar)

<sup>2</sup>Quintana Crespo, Enrique

Dirección: Dr. Degoy 3359 – Residencial Vélez Sarsfield – X5016HKC – Córdoba – Argentina

Te.: 0351 – 153073942

Correo electrónico: [equintcr@yahoo.com](mailto:equintcr@yahoo.com)

<sup>1</sup>Centro Experimental de la vivienda Económica (CEVE )– CONICET

<sup>2</sup>Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales (UNC). Dirección Provincial de Vialidad de Córdoba – Universidad Tecnológica Nacional (FRC).

## RESUMEN

La utilización de materiales cementantes de origen natural tuvo un gran auge en varias etapas históricas del desarrollo de la humanidad. En nuestro país el mejor ejemplo lo constituye la experiencia de construcción del Dique San Roque, en la Provincia de Córdoba, con toscas de cementación silícica.

La fabricación del cemento portland generó un producto predecible y con ajustados valores de resistencia, durabilidad, etc, que impusieron su uso en las obras de ingeniería, independientemente de que fuera de absoluta necesidad un elevado estándar de calidad. Tal es el caso de las capas estabilizadas de suelo-cemento para uso vial, donde la alta resistencia inicial, la velocidad de endurecimiento y la rigidez generados por el uso de cemento portland son factores perjudiciales.

En el presente trabajo se evaluaron desechos inorgánicos industriales de la región de Córdoba, Argentina: cenizas de cáscaras de maní, residuo de pulido de porcelanato y residuo de pulido de mosaicos. Se realizaron ensayos físicos: densidad relativa, curva granulométrica, SEM, difracción de rayos X, fluorescencia de rayos X; químicos: conductimetría en solución de  $\text{Ca}^{++}$  y mecánicos: resistencia a la compresión simple (Norma IRAM 1622). Se trabajó sobre morteros con sustitución de cemento por desechos en un 15% y 30%.

La sustitución del 15% de cemento por pulido de porcelanato generó un comportamiento similar al mortero de referencia. Mayores niveles de sustitución de este y otros tipos de desechos condujeron a una disminución de la resistencia mecánica, manteniéndose siempre en un 75% respecto del patrón tal como lo solicita la Norma IRAM 1654.

La aplicación en capas para uso vial se desarrolló mediante la conformación de mezclas tradicionales suelo loésico – cal, en comparación con capas de suelo loésico – cenizas de cáscaras de maní – cal.

Se propone el agregado al cemento portland de los residuos industriales en los porcentajes estudiados para mantener las condiciones de resistencia y durabilidad para las obras de ingeniería que así lo requieran y con valores menores para aquellas otras como el suelo-cemento, donde los altos estándares son perjudiciales.

Para las capas de uso vial se propone la mezcla de suelos con cenizas y cal de modo de obtener capas estructurales de baja rigidez y con resistencias en aumento hasta los 365 días de edad.

## 1. INTRODUCCION

En busca de mitigar el alto efecto contaminante de la industria cementera debido al elevado nivel de emisiones de CO<sub>2</sub>, asociado al uso de combustibles fósiles, el cual se estima que pasará de 3 Gt/anuales en 2010 a 5 Gt/anuales en 2030 (MULLER, HARNISH, 2012), se propone como una alternativa válida el reemplazo parcial de cemento por materiales sustitutos del tipo puzolánicos, como son las cenizas volcánicas, cenizas volantes y escoria de alto horno (PAPADAKIS, TSIMAS, 2012) y las cenizas provenientes de la quema de residuos agroindustriales y biomasa (CHEAH, RAMLI, 2011), impulsado principalmente por las propiedades puzolánicas de estos desechos. Uno de los principales condicionamientos que presenta la incorporación de materiales al cemento está relacionado a los parámetros de comportamiento físico y mecánico que deben mantener los morteros preparados con los cementos que contienen material de adición, y que en la Argentina está regulado por la norma IRAM 1654:68 Puzolanas. Métodos de ensayo generales y otras de la familia.

Problemática regional: La necesidad planteada por diversas empresas del medio local y regional, así como el propio interés en agregar valor a los desechos que genera la actividad industrial de la región ha promovido el estudio de su inserción en un nuevo ciclo productivo. El estudio de desechos regionales con potencial aplicación en la construcción de viviendas está basado en la elaboración de materiales y componentes constructivos. En este sentido existe una disponibilidad de cenizas de cáscaras de maní de casi 20 t/día proveniente del uso de las cáscaras de maní como combustible de caldera de una importante empresa aceitera de la región. Por otra parte, empresas productoras de mosaicos y porcelanatos de la región generan en el proceso de pulido de los componentes para pisos cerca de 30 t/día de desechos inorgánicos que son destinados a enterramiento sanitario y no reciben un destino de valorización. El material proveniente del pulido de mosaicos y de porcelanatos se diferencian en que el mosaico es un mortero con agregado pétreo que usa cemento como ligante y el porcelanato es un material producto de la fusión de cuarzo (SiO<sub>2</sub>) y feldespatos ((K, Na, Ca, Ba, NH<sub>4</sub>), (Si, AL)<sub>4</sub>O<sub>8</sub>) a temperaturas cercanas a los 1200 °C.

Esta necesidad que manifiestan las empresas de agregar valor a los desechos provenientes de sus procesos productivos brinda la oportunidad de generar productos innovadores que sean sustentables y que a su vez disminuyan el deterioro ambiental que el desarrollo industrial genera.

Antecedentes en el Tema: Existen varios antecedentes sobre la adición de materiales puzolánicos al cemento, principalmente cenizas de proceso industriales que utilizan combustibles fósiles (ZACHAR, 2011) o cenizas provenientes de la quema de biomasa

(NAIR et al, 2008; MARTIRENA HERNADEZ et al, 1998; BIRICIK et al, 1999; CHEAH, RAMLI, 2011). Es conocido que las propiedades puzolánicas de las cenizas dependen de la composición química y de las características físicas y morfológicas, parámetros que están estrechamente ligados al proceso de combustión del material (MARTIRENA HERNADEZ et al, 2000). En líneas generales se ha determinado que las fases de sílice amorfa formadas durante la combustión le imparten mayor carácter puzolánico a las cenizas, estas fases son evidenciadas por Difracción de Rayos X (MARTIRENA HERNADEZ et al, 1998). Esta sílice amorfa proveniente de la combustión de desechos agroindustriales, generalmente se forma a temperaturas entre 500 y 700 °C. La determinación de la puzolanidad de las cenizas se puede llevar a cabo de manera directa, por medio del reemplazo parcial de cemento por el material puzolánico, en probetas cementicias sometidas a ensayos de resistencia mecánica (ZERBINO et al, 2011), o por medio de técnicas conductimétricas por reacción de la puzolana con  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Esta última alternativa comprende la evaluación del grado de reacción de la puzolana con los iones  $\text{Ca}^{2+}$  presentes en la solución, evidenciado por la disminución en la conductividad. Este es un método indirecto y cualitativo, y en general presenta variaciones según la reactividad de la puzolana que se está evaluando (PAYA et al, 2001).

Estudios previos relacionados al tema se enfocan en el estudio de las propiedades puzolánicas de las cenizas de cáscaras de maní, determinando la reactividad por conductimetría y relacionando dicha propiedad con las características morfológicas de las cenizas (KREIKER et al, 2012). Otras investigaciones fueron realizadas sobre morteros elaborados con mezclas de cenizas de cáscaras de maní y cáscaras de girasol provenientes de calderas industriales que utilizan biomasa de diversas fuentes, como material de adición para morteros (ANDRADA et al, 2011).

La aplicación en capas de uso vial ha sido desarrollada en investigaciones relacionadas con suelos loésicos de la Provincia de Córdoba (QUINTANA Y REDOLFI, 2001; QUINTANA CRESPO, 2005; QUINTANA CRESPO, 2011; QUINTANA Y VILLAR, 2011)

El presente trabajo presenta los resultados de la evaluación de las propiedades químicas y morfológicas de los siguientes residuos industriales:

- Residuo de pulido de porcelanatos (RPP) proveniente de una fábrica de porcelanatos ubicada en la Provincia de Buenos Aires, Argentina.
- Residuo de pulido de mosaicos (RPM) proveniente de una fábrica de mosaicos ubicada en la Provincia de Córdoba.
- Cenizas de cáscaras de maní, preparadas en el laboratorio bajo diferentes condiciones de calcinación, y utilizadas sin tratamiento posterior, como potenciales materiales de adición

para cemento portland en morteros preparados (con sustitución de 15% y 30% de cemento por los materiales de desecho). Se determinó la influencia de estos materiales en la resistencia a la compresión en probetas de 40x40x160 mm, ensayadas de acuerdo a la Norma IRAM 1622:2002, a edades de 28 y 60 días.

## 2. MATERIALES Y METODOS

### **Materiales**

Residuos de Pulido de Porcelantado (RPP). El material de estudio fue secado en estufa durante 12 h a 60 °C y utilizado sin tamizar.

Residuo de Pulido de mosaicos (RPM). El material de estudio fue secado en estufa durante 12 h a 60 °C y utilizado sin tamizar.

Arena: fue preparada para una granulometría uniforme, mezclando arena fina y gruesa hasta lograr un módulo de finura entre 4 y 5, determinado acorde a la Norma IRAM 1505:03.

Cemento: se utilizó cemento normalizado tipo CPF 40 (IRAM 50000). Clincker 80-99%; Filler calcáreo 1-20%.

### Suelos loésicos

La reactividad de los loess con la cal, se origina en la presencia de minerales amorfos o débilmente cristalizados, que son los causantes de la reacción puzolánica. El sedimento loésico utilizado fue obtenido de un sitio ubicado al Oeste de la ciudad de Córdoba, sobre la ruta C45 a la altura del paraje denominado Falda del Cañete, y puede ser considerado representativo de los sedimentos eólicos que abundan en toda la llanura pampeana. El sitio de extracción de la muestra tiene las coordenadas, 31°32'22.42"S, 64°27'12.16"O.

### Cal

Para la confección de mezclas en laboratorio, se utilizó hidróxido de calcio pro análisis, Ca(OH)<sub>2</sub> PA. marca Anhedra, a fin de evitar la variaciones en porcentajes de Cal Útil Vial, de las cales disponibles en la provincia de Córdoba, (65% de cal útil vial en cales de Córdoba y 75% en cales provenientes de la provincia de San Juan).

### Caracterización de los materiales

Los desechos fueron caracterizados mediante:

Densidad relativa: de acuerdo a la norma IRAM 1520:2002

Análisis granulométrico: de acuerdo a IRAM 1505:03, usando una balanza de precisión de 0,001g. Los datos fueron ajustado con el Software Microcal Origin 7.0.

Difracción de Rayos X: Se llevó a cabo en el laboratorio de LAMARX del FAMA-UNC, con un equipo a Phillips X-Pert PRO PW3040/60. La asignación de picos se realizó por comparación contra la base de datos del software X'Pert Highscore.

Fluorescencia de Rayos X: la composición química de los desechos se realizó mediante esta técnica en el Laboratorio LAMARX del FAMA-UNC. Se cuantificaron los óxidos principales mediante por comparación contra patrones disponibles en el laboratorio.

Ensayos físicos: se realizaron ensayos de determinación de densidad relativa de acuerdo a la norma IRAM 1520:02;

Los suelos loésicos fueron caracterizados mediante:

Límites de Atterberg, normas IRAM 10501 y 10502.

Análisis Granulométricos. Mediante tamizado por vía seca de acuerdo a la Norma IRAM 10512 en las fracciones superiores a 74 micras (Serie Normalizada de Tamices IRAM N° 4, 10 y 40) y por lavado sobre el tamiz 200 conforme a la Norma IRAM 10507.

Ensayos de Compactación. Conforme a la Norma de Vialidad Nacional VN-E5-93 (Método I) con 25 golpes por capa, 3 capas, pisón de 2,5 kg., altura de caída de 30,6 cm y molde de 4" de diámetro.

Análisis Químicos. Mediante la Norma de Vialidad Nacional VN. E-18.

### **Determinación de puzolanicidad por conductimetría**

La actividad puzolánica se determinó de manera cualitativa de acuerdo al método descrito por Payá et al (Payá et al, 2001). Se partió de 200 mL de solución de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  con un valor de conductividad de aproximadamente 7 mS/cm a  $40 \pm 1^\circ\text{C}$  con agitación constante. Luego se agregaron 5 g del material puzolánico y se registró la conductividad durante 600 h a intervalos de 24 h. Por otro lado se evaluó la conductividad del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  en el período evaluado para determinar la influencia la disminución de la conductividad en el tiempo para el sistema. El comportamiento puzolánico del material fue estimado analizando los gráficos obtenidos ajustando los puntos a una exponencial simple usando el software Microcal Origin 6.0.

### **Preparación de Probetas para ensayos**

Probetas de morteros cementicios: Se prepararon probetas prismáticas de 4x4x16 cm, siguiendo la norma IRAM 1622:2002. Se prepararon 3 probetas para cada edad de ensayo y dosificación. Las probetas fueron moldeadas por colado y compactadas por vibración. Se utilizó una dosificación de cemento:arena 1:3 v/v y relación agua/cemento 0,5. Se dejaron fraguar 24 h y luego del desmolde fueron sometidas a curado sumergidas en agua hasta el momento del ensayo mecánico. En la Tabla 1 se muestran las diferentes dosificaciones

usadas en el diseño experimental, las mismas corresponden a % sustitución en Volumen de cemento por el desecho, y se utilizó la masa de la muestra determinada con balanza analítica de 0,1 g y la densidad relativa como medida para dosificar.

Tabla 1 - Diseño experimental de probetas

Material	Patrón	Cenizas	RPP	RPP	RPM	RPM
		%	%	%	%	%
		15	15	30	15	30
Agua (mL)	83	83	83	83	83	83
Arena (mL)	500	500	500	500	500	500
Cemento (mL)	167	142	142	117	142	117
Adición (mL)	0	25	25	50	25	50

### Ensayos mecánicos

Los morteros fueron ensayados en la resistencia a la compresión de acuerdo a la norma IRAM 1622:05 a edades de 28 y 60 días. Cada probeta se ensayó por triplicado y el valor informado corresponde al promedio de las tres determinaciones. Para ejecutar los ensayos se utilizó una prensa manual y una celda de carga provista por Celdas Rocca S.A.

## 3. RESULTADOS

### Caracterización de los desechos industriales y del cemento portland.

#### Densidad relativa

La Tabla 2 muestra los valores obtenidos de densidad relativa de los tres materiales, secados durante 12 h a 60 °C (peso constante durante 3 h).

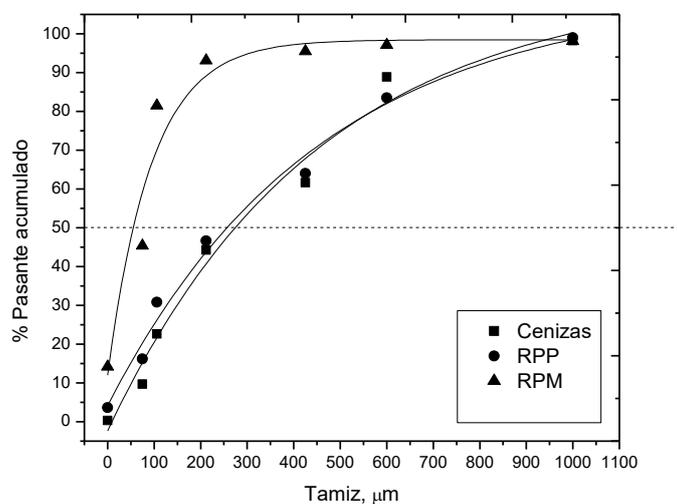
Tabla 2 - Densidad relativa de los desechos

Desecho	Cenizas	RPM	RPP	Cemento
Densidad relativa	2,55	2,4	2,27	3,11

#### Análisis granulométrico

Se llevó a cabo el análisis mediante la determinación de la fracción pasante en tamices normalizados. Se partió de 100 g de muestra y pesó la fracción retenida en una balanza de precisión de 0,001g. Luego se realizó el gráfico de granulometría con el % pasante acumulado vs. el tamaño del tamiz en  $\mu$ m. Los datos se ajustaron con el programa Microcal Origin 7.0. La Fig. 1 muestra la granulometría de las muestras usadas.

Figura 1 – Análisis granulométrico de desechos

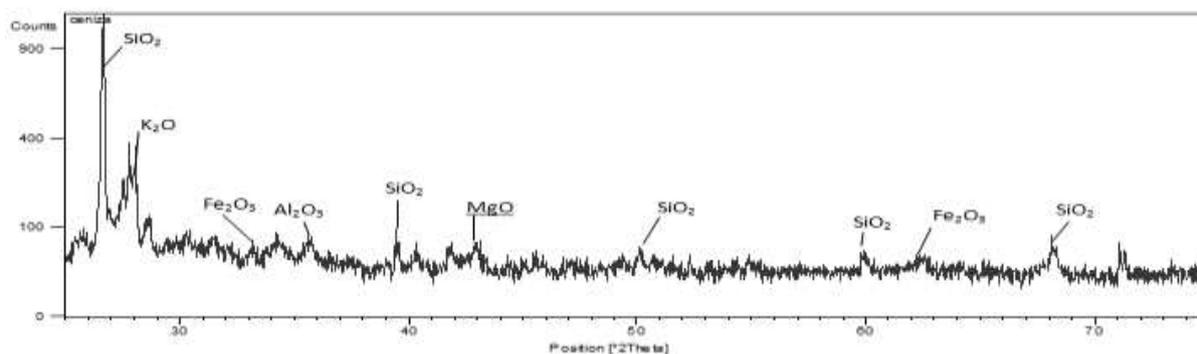


Se observa una distribución granulométrica similar para las cenizas y el RPP, no así para RPM que mostró una distribución diferente con menor tamaño de partículas, donde el 90% del material es pasante al tamiz de 200 µm.

### Difracción de Rayos X

Ceniza de cascaras de maní: en la Fig. 2, se puede observar el difractograma obtenido para las cenizas de cascaras de maní

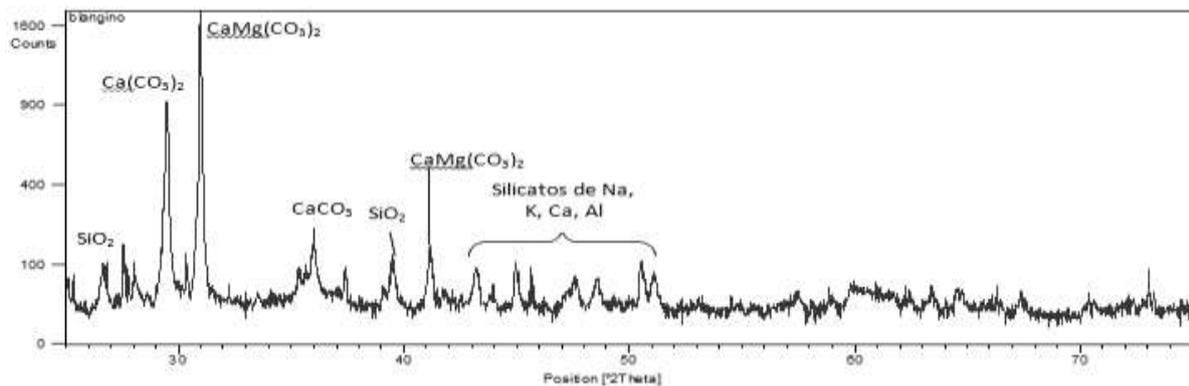
Figura 2 - Difractograma de Rayos X de Cenizas



Se observa la presencia de diferentes compuestos, entre ellos una importante cantidad de SiO<sub>2</sub>, pero principalmente en fases cristalinas.

Residuo de mosaico: en la Fig. 3 se muestra el difractograma del RPM.

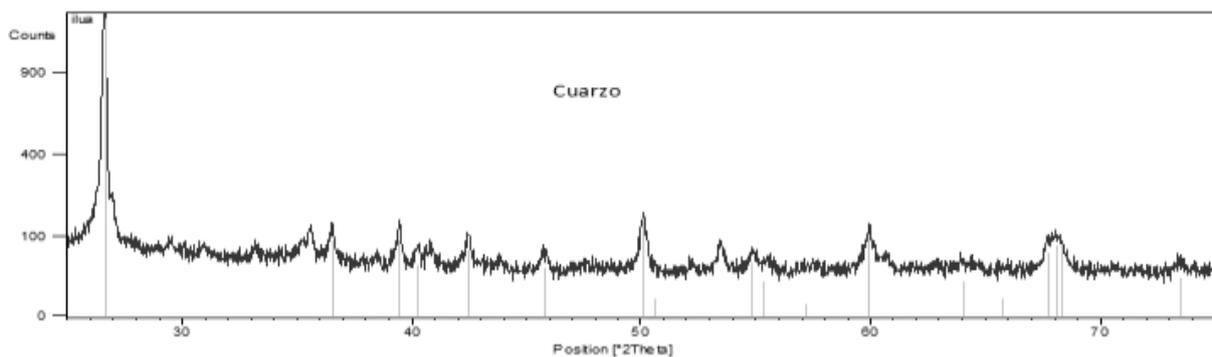
Figura 3 - Difractograma de RPM



Este material de desecho presenta varias fases cristalinas, principalmente de carbonatos de Ca y Mg, y silicatos de metales alcalino y alcalino-térreos.

Residuo de porcelanato: en la Fig. 4 se muestra el difractograma del RPP.

Figura 4 - Difractograma de RPP



Este material presenta principalmente  $\text{SiO}_2$  en estado cristalino, tal es así que su difractograma concuerda en gran medida a uno de cuarzo ( $\text{SiO}_2$  en estado cristalino).

De los tres materiales utilizados, ninguno presenta propiedades cristalográficas que permitan considerarlo como una puzolana, debido principalmente a la gran presencia de fases cristalinas del  $\text{SiO}_2$  presente, siendo una condición necesaria para manifestar un comportamiento puzolánico la presencia de material amorfo. En cuanto a los compuestos encontrados se observa una gran coherencia en las fases y compuestos asignados con la composición química propia del desecho.

### Fluorescencia de Rayos X

Se cuantificó el contenido de los diferentes compuestos en cada muestra por comparación contra patrones disponibles en el laboratorio para los óxidos de los metales cuantificados. En la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 3 – Composición química de desechos

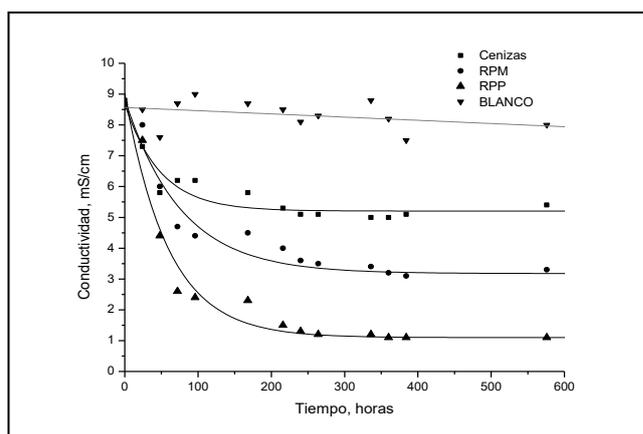
Compuesto	Cenizas	RPM	RPP
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	10 ± 5	2 ± 1	14 ± 6
SiO <sub>2</sub> %	(3 ± 2)*10	13 ± 7	(7 ± 3)*10
K <sub>2</sub> O %	9 ± 1	2,76 ± 0,05	2,44 ± 0,01
CaCO <sub>3</sub> %	14 ± 7	(4 ± 2)*10	2 ± 1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	3 ± 1	2,9 ± 0,9	6,2 ± 0,2

Solo se cuantificaron los óxidos principales, y con una técnica aproximada que arrojó un margen importante de error sobre cada determinación, pero que tiene utilidad para inferir de manera aproximada la composición de los desechos. La composición determinada concuerda de manera muy aproximada con la naturaleza de los materiales ensayados. De esta cuantificación podría inferirse un comportamiento más próximo a una puzolana para el RPP con un % en masa de SiO<sub>2</sub> cercano al 70 % y la suma de SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> > 70 podría ser considerada una puzolana tipo N, aunque el alto grado de cristalización de este desecho actuaría en detrimento de estas propiedades. En el caso de las cenizas de cáscaras maní, la suma de SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ~ 50% con lo cual podría ser considerada una puzolana tipo C, según ASTM-C168. En todos los desecho el contenido de óxidos alcalinos (K, Na) es mayor a 1,5% por lo cual podría no ser recomendable este agregado por las reacciones álcali-agregado en el cemento.

### Ensayos de conductimetría

En la Fig. 5 se muestran los valores de conductividad para las muestras y el blanco. La conductividad es proporcional a la concentración de Ca<sup>2+</sup> presente en la disolución, una disminución en la conductividad se debe al consumo de los iones Ca<sup>2+</sup> debido a la reacción Ca(OH)<sub>2</sub> – puzolana la cual promueve la formación de productos insolubles.

Figura 5 – Conductividad de los materiales.



En el gráfico de las conductividades, con los datos ajustados a una curva exponencial de 1 orden, se puede observar como las diferentes soluciones disminuyen su conductividad con el correr del tiempo, exceptuando el blanco que mantiene su conductividad con un leve decaimiento lineal por el paso del tiempo, debido probablemente a la formación de carbonatos por reacción del  $\text{Ca(OH)}_2$  de la solución con el  $\text{CO}_2$  del ambiente.

Se observa un descenso abrupto de conductividad en las primeras horas, esto se debe a que los diferentes materiales están reaccionando con el  $\text{Ca(OH)}_2$  disuelto. Luego el descenso no es tan marcado, después de las 100 horas aproximadamente, dado que la velocidad de la reacción de neutralización del  $\text{Ca}^{2+}$  a disminuido, esto posiblemente se deba a que hay una sobresaturación de iones  $\text{Ca}^{2+}$  con respecto a los materiales, es decir, que hay menor superficie de reacción que antes. Y por último se ve que la conductividad llega a una meseta, alrededor de las 400 horas, tiempo en que la reacción puzolánica podría continuar pero con una velocidad muy baja.

Si bien el comportamiento de los tres materiales es similar, no lo es en magnitud de la reacción. El RPP es el material que presenta el mayor descenso en conductividad, esto se puede deber al alto contenido  $\text{SiO}_2$  que si bien la mayor parte se encuentra como sílice cristalina (la cual no reacciona con los iones  $\text{Ca}^{2+}$ , con algún mínimo que se encuentre en fase amorfa alcanzara para explicar este descenso abrupto. El RPM por su parte tiene un marcado descenso en la conductividad esto posiblemente sea por el gran contenido de carbonatos los cuales reaccionan el  $\text{Ca}^{2+}$ . Las cenizas de cáscaras de maní, no tiene una gran disminución en la conductividad, esto se debe a que si bien tiene un contenido apreciable de  $\text{SiO}_2$  esta se encuentra en fase cristalina.

### **Resistencia a la Compresión**

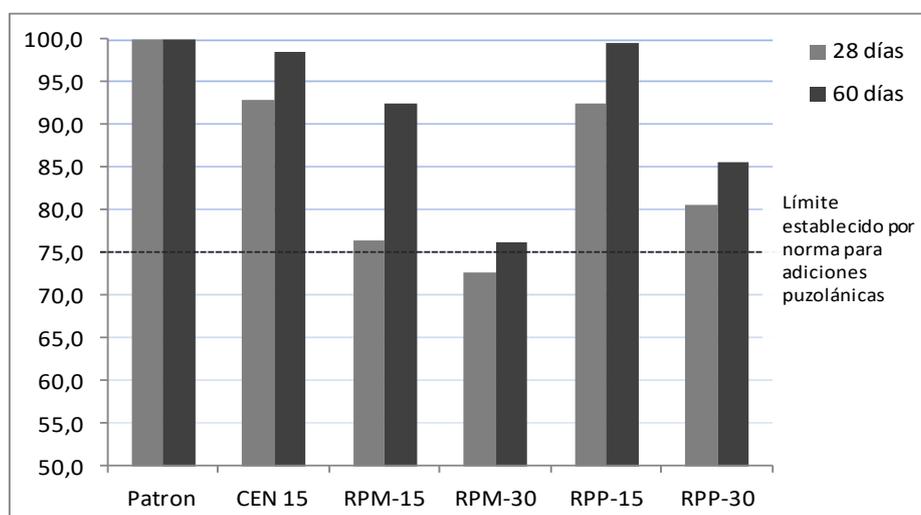
La resistencia mecánica a la compresión de los morteros con adición de cenizas se llevó a cabo de acuerdo a la IRAM 1622. Los valores obtenidos a diferentes edades se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4 - Resistencia a la compresión de los morteros con adición de desechos

Probeta	28 DÍAS		60 DIAS	
	Resistencia a la Compresión (Mpa)	%RDP	Resistencia a la Compresión (Mpa)	%RDP
Patron	21,2	100	25,1	100
CEN-15	19,7	92,9	24,7	98,4
RPM-15	16,2	76,4	23,2	92,4
RPM-30	15,4	72,6	19,1	76,1
RPP-15	19,6	92,5	25	99,6
RPP-30	17,1	80,7	21,5	85,7

La ceniza solo se evaluó a un 15% de sustitución de cemento. Para este desecho se observó un valor de resistencia similar al patrón, sobre todo a 60 días. El desecho RPM a 15% tiene un nivel de disminución marcado a 28 días pero casi no afectó la resistencia a 60 días. Diferente comportamiento se observó a 30% que tiene un valor de resistencia muy bajo a 28 y 60 días, y solo alcanza a superar ligeramente el comportamiento establecido por norma para adiciones puzolánicas. Es posible que el menor tamaño de partículas actúe disminuyendo la resistencia mecánica al comportarse solamente como mayor carga de filler calcáreo. El RPP A 15% se comporta muy bien tanto a 28 como a 60 días. A un nivel de 30% de sustitución ya se observa una disminución más marcada en la resistencia. En la Fig. 6 se muestra el gráfico de evolución de la resistencia a las edades ensayadas y los límites establecidos por la Norma IRAM 1654 para adiciones puzolánicas (75% respecto del mortero patrón).

Figura 6 - Resistencia a la compresión % de los morteros con adición de desechos



## **Caracterización de los suelos loésicos**

### **Límites de Atterberg**

La determinación del Límite Líquido (IRAM 10501) y del Límite Plástico (IRAM 10502), se efectuó sobre la muestra obteniéndose los siguientes resultados:

- Límite Líquido (LL) = 26,3 %
- Límite Plástico (LP) = 17,7 %
- Índice Plástico (IP) = 8,6

### **Análisis Granulométrico**

El análisis granulométrico se realizó mediante tamizado por vía seca de acuerdo a la Norma IRAM 10512 en las fracciones superiores a 74 micras (Serie Normalizada de Tamices IRAM N° 4, 10 y 40) y por lavado sobre el tamiz 200 conforme a la Norma IRAM 10507.

Los resultados indican que el material pasa en más de un 90% el tamiz 200 (0,074 mm), siendo entonces conformado mayoritariamente por limo y arcilla.

### **Ensayos de Compactación**

Los ensayos de compactación de la muestra de suelos se realizaron conforme a la Norma de Vialidad Nacional VN-E5-93 (Método I) con 25 golpes por capa, 3 capas, pisón de 2,5 kg., altura de caída de 30,6 cm y molde de 4" de diámetro.

Se obtuvo una densidad máxima de 1.678 kg/m<sup>3</sup>, para una humedad óptima de 17,6%, valores que se utilizaron para la confección de las probetas de las mezclas suelo-cal.

### **Análisis Químicos**

El suelo loésico analizado posee menos de un 0,1% de sales solubles y sulfatos y un valor de pH de 6,97.

## **4. APLICACIONES EN CAPAS DE USO VIAL**

En épocas modernas los ligantes puzolánicos se han utilizado en reemplazo del cemento portland, en aquellas obras de ingeniería que no precisan de elevadas resistencias estructurales ni controles de calidad estrictos. En la actividad vial estos materiales son muy adecuados para la ejecución de capas estabilizadas. Existen básicamente dos tipos de capas (Quintana, 2001): las denominadas SPC (suelo- puzolana- cal) y las GPC (grava- puzolana - cal). Las primeras son mezclas finas de suelos puzolánicos (suelos loésicos con cenizas volcánicas naturalmente incorporadas) estabilizados con cal; y las segundas son estabilizados granulares (grava, arena) de granulometrías continuas, que utilizan el ligante puzolana- cal como cementante de la estructura. El seguimiento de la reacción puzolánica a través de ensayos físico-mecánicos, como el de Resistencia a la Compresión Simple (RCS),

permite la comparación de resultados con otras mezclas y muestra la existencia de un mismo proceso de cementación: un período inicial, donde la resistencia crece de forma lineal con la edad y un segundo período que comienza entre los 85 y 120 días, donde el crecimiento se hace muy lento. El segundo período se activa a partir de los 6 meses de edad para los materiales más reactivos y es difícil reconocer el desarrollo de la segunda fase para los menos reactivos.

### **Resistencia a la Compresión simple (RCS)**

Para el caso de los ligantes suelo-cal analizados (90 % de suelo y 10% de cal) (Tabla 5) se puede observar un importante aumento de la resistencia a la compresión simple (RCS) hasta los 134 días, que se mantiene luego hasta el año. Podría deducirse que la evolución de la RCS hasta los 28 días corresponde a las reacciones rápidas de carbonatación y formación de óxidos de calcio, y que la duplicación del valor obtenido entre los 28 días y los 378 días, es consecuencia de las reacciones puzolánicas.

Tabla 5: Resistencia a la compresión simple del ligante suelo-cal.

<b>Resistencia a la compresión simple</b>	<b>Tensión Media</b>
<b>Edad (días)</b>	<b>kPa</b>
7	1256
14	2284
28	3061
56	4169
134	6517
378	6600

En las mezclas suelo-cenizas-cal, se logran valores del mismo orden de magnitud que en las anteriores (Tabla 6) hasta los 56 días, para luego mostrar una menor evolución hasta el fin del ensayo. Esto implica que es factible la incorporación de hasta un 15% de residuos agroindustriales (cenizas de cascaras de maní) dentro de un proceso de estabilización de suelos para obras viales, con el mantenimiento de resistencias a la compresión simple tanto en el corto, como en el largo plazo.

Tabla 6: Resistencia a la compresión simple del ligante suelo-ceniza-cal.

<b>Resistencia a la compresión simple</b>	<b>Tensión Media</b>
<b>Edad (días)</b>	<b>kPa</b>
7	907
14	1981
28	2711
56	4790
129	5569
373	5800

## Módulo Elástico (E)

La determinación de E permite establecer cómo influye el agregado de cenizas de cáscara de maní en la rigidez de las mezclas. El módulo se obtuvo considerando la etapa lineal de la curva del ensayo de RCS, entre 0,50 y 1,00 mm de deformación. Los resultados de las dos mezclas estudiadas pueden apreciarse en la Tabla 7.

Se puede apreciar que la mezcla con cenizas se mantiene con una menor rigidez hasta los 56 días de curado, para luego reflejar valores del mismo orden que la mezcla suelo cal. La importancia en el uso vial de mezclas poco rígidas es fundamental desde el punto de vista constructivo y para la durabilidad del paquete estructural.

Tabla 7: Módulo Elástico de las mezclas analizadas

Edad (días)	Módulo Elástico Suelo – Cal (MPa)	Suelo – Cenizas – Cal (MPa)
7	123	50
14	193	140
28	220	188
56	217	218
129	410	412

## 5. CONCLUSIONES

La caracterización química y morfológica de los desechos está de acuerdo con su naturaleza.

Las cenizas tienen una composición química que podría cumplir con los requisitos de una puzolana tipo C, con buen contenido de  $\text{SiO}_2$ , pero en gran porcentaje en fases cristalinas, y en los gráficos de conductividad no mostró un comportamiento puzolánico.

El RPM, tiene un alto contenido de silicatos y carbonatos mixtos y no presenta una composición química compatible con una puzolana, podría ser solo material de carga.

El RPP tiene una composición química rica en  $\text{SiO}_2$ , lo que sería muy conveniente para una puzolana, pero está en su mayoría como cuarzo cristalino y no permitiría un buen comportamiento en la adición al cemento, solo podría ser considerado como material de carga.

Los morteros con desechos a un nivel de sustitución del cemento del 15%, mostraron valores de resistencia a la compresión mayores al 90% respecto del patrón a 60 días para todos los desechos. A 30% de sustitución, la resistencia a la compresión disminuyó casi al límite permitido para la adiciones puzolánicas para el RPM, pero el RPP estuvo cerca del 85%, respecto del patrón.

El uso de residuo de pulido de porcelanato y cenizas de cáscaras de maní como material de adición del cemento al 15% podría ser una alternativa sustentable para agregar valor a estos desechos. Se podría evitar su destino de enterramiento, además de contribuir a la disminución de la contaminación por la fabricación del cemento.

En capas para uso vial, la incorporación de un 15% de ceniza a la mezcla suelo-cal permite mantener la variación de la RCS con la edad de las probetas en el mismo orden de magnitud que para las mezclas con 100% de suelo.

Los Módulos Elásticos de las mezclas van aumentando con la edad, en forma similar tanto para el ligante suelo loésico-cal, como para el ligante suelo loésico-cenizas-cal.

Las resistencias a la compresión simple de las distintas mezclas analizadas permiten su utilización en capas estructurales de caminos.

## REFERENCIAS

- ANDRADA C, BARONETTO C, POSITIERI M, OSHIRO A, ROMERO A, BORIONI C. Anais do 53º Congresso brasileiro do Concreto CBC2011. Florianopolis, Brasil. ISSN 2175-8182
- BIRICIK H, AKOZ F, BERKTAY I L, TULGAR A N. Study of Pozzolanic Properties of Wheat Straw Ash. Cement and Concrete Research, 29, 637-643, 1999.
- CHEAH C. B., RAMLI M. The Implementation of Wood Waste Ash As a Partial Cement Replacement Material in the Production of Structural Grade Concrete and Mortar: An Overview. Resources, Conservation and Recycling, 55, 669-685, 2011.
- KREIKER J, MANDRINI MR, SABLÉ L, GATANI M, QUINTANA CRESPO E. Caracterización química y morfológica de cenizas de cascaras de maní para promover su uso como aditivo puzolánico para cementos. VII CONGRESO NACIONAL “AMBIENTAL 2012”- PRODEA-UNSJ. San Juan, Argentina. 24-26 de Noviembre de 2012.
- MARTIRENA HERNANDEZ J. F., MIDDENDORF B., GEHRKE M., BUDELMANN H. Use of Wastes of the Sugar Industry As Pozzolana in Lime-Pozzolana Binders: Study of the Reaction. Cement and Concrete Research, 28, 1525-1536, 1998.
- MARTIRENA HERNANDEZ J F, BETANCOURT RODRIGUEZ S, MIDDENDORF B, RUBIO A, MARTINEZ-FERNANDEZ L, MACHADO-LOPEZ, GONZALES-LOPEZ. Pozzolanic Properties of Residues of Sugar Industries. Materiales de Construccion, 50, 71-78. 2000.

- NAIR D. G., FRAAIJ A., KLAASSEN A. A. K, KENTGENS A. P. M. A Structural Investigation Relating to the Pozzolanic Activity of Rice Husk Ashes. *Cement and Concrete Research*, 38, 861- 869, 2008. .
- PAPADAKIS V. G., TSIMAS S. Supplementary Cementing Materials in Concrete: Part I:Efficiency and Design. *Cement and Concrete Research*, 32, 1525-1532, 2002.
- PAYA J, BORRACHERO M V, MONZÓ J, PERIS-MORA E, AMAHJOUR F. Enhanced Conductivity Measurement Techniques for Evaluation of Fly Ash Pozzolanic Activity. *Cement and Concrete Research*, 31, 41-49, 2001.
- QUINTANA E. Utilización de materiales puzolánicos en la actividad vial de la Provincia de Córdoba. XIII Cong. Arg. Vialidad y Tránsito. Mem. Digital. ISBN N°: 987-98988-0-X. Buenos Aires. 2001
- QUINTANA E., y REDOLFI E. Evaluation of Pozzolanic Activity of Pampean Loess. XV International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Estambul. Mem. Vol 1. pp. 243 -246. 2001
- QUINTANA CRESPO E. Relación entre las propiedades geotécnicas y los componentes puzolánicos de los sedimentos pampeanos. Tesis Doctoral. 336 p. Ed. Universitat. ISBN-10: 978- 987-572-037-4. 2005
- QUINTANA CRESPO E. Estabilización de suelos loésicos. 368 p. Ed. Acad. Española. ISBN 978- 3-8443-4143-0. 2011
- QUINTANA CRESPO E., VILLAR COCIÑA E. A kinetic study about the pozzolanic reactivity of loessic soils by conductimetric methods: kinetic parameters. *Advances in Cement Research*, Volume 23, Issue 1, , pages 3 –10, ISSN: 0951-7197 -ISSN: 1751-7605 January 2011
- ZACHAR J. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2011. 789.
- ZERBINO R, GIACCIO, G, ISAIA G C. Concrete Incorporating Rice-Husk Ash Without Processing. *Construction and Building Materials*, 25, 371-378, 2011.
- Norma ASTM C68 - 30 Method of Test for Specific Gravity of Fine Aggregate
- Norma IRAM 1505 (2003). Agregados. Análisis granulométrico.
- Norma IRAM 1520 (2002). Agregados finos. Métodos de laboratorio para la determinación de la densidad relativa real, de la densidad relativa aparente y de la absorción de agua.
- Norma IRAM 1622 (2006). Cemento Pórtland Métodos de determinación de las resistencias a compresión y flexión.
- Norma IRAM 1627 (1997) Agregados. Granulometría de los agregados para hormigones.
- Norma IRAM 1654 (1968). Puzolanas. Métodos de ensayos generales.
- Norma IRAM 1676 (1993). Morteros para Mampostería Clasificación y Requisitos.

— Norma IRAM 5000 (2010). Cemento. Cemento para uso general. Composición, características. Evaluación de la conformidad y condiciones de recepción