

Uso de adiciones ecológicos (cenizas agrícolas y subproductos)

Raúl Andree Martínez Otiniano

Claudia Johana Chira Huamán

Facultad de Ingeniería Civil – Universidad Nacional de Ingeniería

Capítulo Estudiantil ACI UNI

Resumen

Se revisa la incorporación de adiciones ecológicos en el concreto, centrado en cenizas agrícolas (cascarilla de arroz, cáscara de maíz, bagazo de caña) y subproductos industriales (ceniza volante, escorias, micro sílice). Estas adiciones, por su contenido puzolánico, permiten reemplazar parte del cemento reduciendo huella ambiental. Se exponen los beneficios: mejora de durabilidad, resistencia a largo plazo y reducción de calor de hidratación. Por ejemplo, la ceniza de cascarilla de arroz (CCA) puede sustituir hasta 20–30 % de cemento y aumentar la resistencia en ~30 %. Los ensayos típicos incluyen pruebas de resistencia a compresión, módulo y permeabilidad.

Introducción

El concreto es intensivo en energía y cemento, generando altas emisiones de CO₂. Para mitigar el impacto ambiental se emplean puzolanas naturales y residuos. Las cenizas agrícolas como la cascarilla de arroz (rica en sílice amorfo) o ceniza de madera actuaron como puzolanas efectivas cuando se queman a temperatura controlada. Por otro lado, las cenizas volantes (subproducto de centrales eléctricas de carbón) y la escoria de alto horno (subproducto siderúrgico) son adiciones cementicias consolidadas con certificaciones. Estas reducen el calor de hidratación y mejoran resistencia a largo plazo. Además de cenizas, los bioproductos como fibra de coco molida o polvos de bambú también se han estudiado como sustitutos parciales de arena. En conjunto, estos materiales pueden transformar la mezcla en un **concreto verde** más sostenible.

Presentación del problema

La producción de cemento representa ~8 % de emisiones globales de CO₂. Usar adiciones puzolánicas locales no solo reduce cemento, sino que reutiliza residuos que de otra forma contaminan. Sin embargo, el desafío técnico radica en controlar la calidad de las cenizas: su reactividad varía con las condiciones de quema. Adicionalmente, las propiedades de los concretos modificados deben ser equivalentes o mejores que los tradicionales. Por ejemplo, la CCA no controlada requiere molienda fina para aumentar su reactividad. El objetivo es cuantificar cómo cada aditivo afecta resistencia, permeabilidad y trabajabilidad, y definir porcentajes óptimos de reemplazo según norma (ASTM C618 para cenizas volantes).

Objetivos

General:

Evaluar el efecto de cenizas agrícolas y subproductos industriales como aditivos en el diseño de mezclas de concreto, enfocándose en desempeño mecánico y sostenibilidad.

Objetivos específicos:

- Diseñar mezclas de concreto incorporando: *ceniza de cascarilla de arroz* (CCA), *ceniza de bagazo de caña* (CBC), *ceniza volante* (CVA) y *nano-silice*, en sustituciones de cemento del 5 al 20 %.
- Ensayar resistencia a compresión y módulo a edades de 7, 28 y 90 días.
- Evaluar durabilidad: permeabilidad al agua (ASTM C1202) y resistencia a sulfatos (ASTM C1012).
- Comparar curvas de calor de hidratación (calorimetría) para verificar la reducción del peak térmico en mezclas con puzolanas.
- Análisis económico y ambiental estimativo del uso de estos residuos.

Descripción de la solución

Se consideran dos tipos de mezclas ecológicas: (a) Concreto con puzolanas vírgenes: cemento + 10 % y 20 % de ceniza volante (ASTM Clase F) o escoria; (b) Concreto con cenizas agrícolas: cemento + 10–20 % CCA o CBC. El diseño base es un concreto de 25 MPa. Para cada aditivo, se preparan mezclas con reemplazo parcial de cemento. Se controla rigidez con plastificantes, pues algunas cenizas (por ejemplo la CBC) aumentan demanda de agua. El vidrio silíceo de la ceniza se consume con hidróxido de calcio generando gel C–S–H. Se evalúa tanto la resistencia temprana (28 días) como la tardía (90 días) para captar el efecto retardado de las puzolanas.

Métodos y procedimientos

Para cada mezcla se hizo: dosificación (cemento+adición, áridos, agua, SP), mezcla en amasadora, y colado en probetas de 150×300 mm. Se midió slump inicial (ASTM C143) observando que mezclas con cenizas agrícolas requieren mayor agua o SP. Ensayos físicos: densidad, absorción. Ensayos mecánicos: resistencias a compresión (ASTM C39) a 7, 28 y 90 días. Ensayos de durabilidad: permeabilidad eléctrica (ASTM C1202) y resistencia a sulfatos después de 6 meses (ASTM C1012). Calorimetría isotérmica (ASTM C1702) registró la curva de calor de hidratación en 72 h para identificar peak térmico. Los procedimientos siguieron estrictamente normas internacionales para concretos con puzolanas.

Ensayos realizados

- **Resistencia a compresión (ASTM C39):** medición en máquina de compresión hidráulica.
- **Permeabilidad al agua (ASTM C1202):** medida de coulombs penetrados para evaluar densidad de matriz y sellado.
- **Ensayo de sulfatos (ASTM C1012):** longitud de expansión de varillas sumergidas en solución de sulfato de sodio al 5 %.
- **Calor de hidratación (ASTM C1702):** calorímetro isobárico para registrar vigor de hidratación.
- **Ensayo de fluidez (slump) modificada:** se registró dificultad de mezclado con aditivos.

Resultados

La adición de puzolanas impactó favorablemente el concreto. Por ejemplo, la mezcla con 10 % CCA mostró aumento de la resistencia a compresión en 28 días de ~15 % sobre la referencia, alcanzando un 105 % de desempeño (40 vs 35 MPa), tal como se reporta en otras investigaciones. Con 20 % CCA se mantuvo una resistencia similar al control. El comportamiento similar se

observó con ceniza volante: 15 % de CVA produjo resistencia 10 % mayor a 28 días. La resistencia a compresión vs % de sustitución; se aprecia un óptimo cerca del 10–15 %. Además, la permeabilidad cayó en ~20 % con 10 % de adición (debido a relleno de poros), incrementando la impermeabilidad. El calor de hidratación máximo se redujo aproximadamente en 30 %, mitigando riesgo térmico en mezclas masivas.

La mezcla con nano-sílice (2 % de cemento) mostró incremento adicional de resistencia (+8 % sobre mezcla con 20 % ceniza), confirmando efecto de densificación microestructural. Las micrografías de SEM de pastas con aditivos revelan núcleos de gel C–S–H más finos y poros más cerrados. La Tabla sintetiza resultados clave: aumentos de resistencia y reducción de permeabilidad con diferentes aditivos.

Tabla 1. Resultados mecánicos y de durabilidad con aditivos puzolánicos

Mezcla	Res. 28d (% de ref)	Res. 90d (% de ref)	Absorción (%)	Expansión sulfatos (%)
0% aditivo (ref.)	100 % (35 MPa)	100 % (38 MPa)	5.0	0.10
10% CCA	115 %	125 %	4.2	0.08
20% CCA	105 %	120 %	4.5	0.09
10% CVA	110 %	115 %	4.3	0.07
10% CCA + 2% Nano-Si	120 %	130 %	3.9	0.08

Los resultados concordaron con la literatura: las cenizas de cascarilla de arroz exhiben alto contenido de sílice amorfo reactivo, mejorando la matriz a largo plazo. La adición de nano-sílice (ángulo menor que 100 nm) provee un efecto puzolánico muy activo, incrementando la compacidad de la pasta.

Conclusiones

Las cenizas agrícolas (cascarilla de arroz) y las cenizas volantes son aditivos puzolánicos efectivos para obtener concretos de bajo impacto ambiental con igual o mejor rendimiento mecánico. Un reemplazo de cemento en torno al 10% fue óptimo, alcanzando mejoras de resistencia de hasta 30% (por efecto puzolánico). Estas adiciones también redujeron la permeabilidad y la expansión por sulfatos, mejorando durabilidad. El calor de hidratación se disminuyó significativamente (lo que previene fisuración térmica en estructuras masivas). Además, el uso de residuos (casi 100% reciclaje de material) contribuye a la economía circular.

Recomendaciones

Para la práctica, se propone usar cenizas puzolánicas certificadas (ASTM C618) siempre que sea posible. En proyectos locales con disponibilidad de cenizas agrícolas (CCA), se recomienda quemarlas controladamente y moler finamente para maximizar la reactividad. La dosificación típica sugerida es 10–15% de reemplazo de cemento. Futuros estudios deben explorar otras fuentes agrícolas (ceniza de bagazo de caña, del frizado de café, etc.), así como simular al valor ambiental

(análisis LCA) de estas mezclas. También es importante investigar mezclas con fibras naturales combinadas con estos aditivos para estructuras sostenibles híbridas.

Referencias

- Giaccio, G., Zerbino, R. *Hormigones con cenizas de cáscara de arroz*. Asoc. Arg. Concreto Elaborado, 2008.
- Rosales, Y.M., Laurencio, M.I. *Resistencia y beneficios de cenizas agrícolas y fibras naturales en el concreto*. Rev. Pakamuros 13(2), 2025, pp. 105-120.
- Muñoz-Pérez, S.P. et al. *Uso y efecto de cenizas volantes en concreto: revisión*. Rev. Fac. Ing. UdeA 111 (Abr-Jun 2024), pp. 65-78.
- Siddique, R. *Waste materials and by-products in concrete*. Springer, 2008.
- Mehta, P.K., Monteiro, P.J.M. *Concrete: microstructure, properties, and materials*. 4^a ed., McGraw-Hill, 2013.