

End Uses of MSWI Ash in the Concrete Industry

by Jordan K. Magnuson, Ashish D. Patel, Timothy G. Townsend, and Christopher C. Ferraro

This article discusses end uses of municipal solid waste incineration (MSWI) ash in the concrete industry, focusing on low-strength road construction and nonstructural (NS) uses. Reusing MSWI ash is common worldwide, and pilot projects have been incorporated in the United States.¹⁻⁹ Pilot projects throughout Florida, USA, include reusing MSWI ash in road base or as aggregate in portland cement concrete (PCC) in Pasco, Hillsborough, and Palm Beach Counties, and creating cement clinker using 1 to 2% MSWI ash in North and South Central Florida.

Overview of MSWI

MSWI is the process of converting municipal solid waste (MSW) into energy through controlled combustion.¹⁰ This method addresses the issue of waste accumulation in landfills while also harnessing the calorific content of waste materials to generate electricity or heat.¹⁰ Approximately 34.6 million tons (31.4 million tonnes), about 12%, of MSW are incinerated annually in the United States, producing about 8.5 million tons (7.7 million tonnes) of MSWI ash as a by-product.¹¹

Stemming from the U.S. regulatory requirements, the fly ash (FA) and bottom ash (BA) produced during MSWI are mixed to produce combined ash (CA).¹² MSWI BA refers to the noncombustible residue remaining after the incineration process, primarily comprising inorganic materials such as glass, metals, and ceramics, as shown in Fig. 1. This material possesses residual calorific value and is either landfilled or reused in construction applications.¹²⁻¹⁵ MSWI FA constitutes fine particulates captured by air pollution control devices during incineration. While MSWI FA can be used in various reuse applications, its proper management is crucial due to potential health and environmental implications associated with its composition.¹⁰ MSWI CA contains approximately 80% MSWI BA and 20% MSWI FA.

Minimal amounts of MSWI BA are currently recycled or reused as road base or construction aggregate in the United States.¹²⁻¹⁵ MSWI ash is useful in these markets due to its strength properties and elemental composition (calcium, silica, aluminum, and iron [Ca, Si, Al, and Fe]). Additional

applications are still being explored, such as cement kiln feed.^{12,16,17}

Global cement production is approximately 4.1 billion tons (3.7 billion tonnes) annually,¹⁸ which provides an opportunity to recycle large amounts of MSWI ash as a cement ingredient or replacement, even at low replacement percentages.¹⁷ Establishing such a recycling program not only reduces the volume of landfilled waste but also reduces the need for coal FA and naturally mined materials, which ultimately reduces the environmental footprint of the construction industry.¹⁷

This article explores past, present, and potential future applications of MSWI ash in the concrete industry, particularly related to MSWI BA as a concrete aggregate, a cement replacement as a supplementary cementitious material (SCM), and a cement ingredient (kiln feed).

Uses of MSWI Ash

MSWI BA is a granular and highly compactable material with similar properties to natural aggregates commonly used in road construction as a base or aggregate material. Laboratory studies have documented physical and geotechnical properties such as bearing strength, showing that MSWI ash can be suitable for use as road base, despite its heterogeneity.¹⁵ Recent advancements in pilot project data



Fig. 1: MSWI BA fresh (left) and washed (right)

yield promising performance and environmental results of reusing MSWI ash in road base and other construction applications. While prior research has explored MSWI BA in road base, current work evaluates reusing BA in encapsulated forms, stemming from the idea that encapsulation will help prevent heavy metals and other constituents leaching from the ash, preserving human health and the surrounding environment.

Concrete aggregate

The use of MSWI BA as a coarse aggregate replacement in PCC has recently been studied in Florida.^{1,13,19} Reusing MSWI ash as an aggregate in concrete reduces reliance on mined aggregates like limestone and granite and uses a resource that would otherwise be considered a waste. This practice is not uncommon throughout the world, with many European and Asian countries using MSWI BA in up to 50% replacement of coarse aggregates in NS concrete.¹⁹ In these applications, the performance of BA-amended PCC specimens and pilot projects conducted throughout Florida has successfully met required Florida Department of Transportation (FDOT) performance thresholds.^{1,19}

Collaboration between the Solid Waste Authority (SWA) of Palm Beach County, FL, and the University of Florida, Gainesville, FL, has found MSWI BA to be a suitable aggregate in NS concrete according to the FDOT Road and Bridge Specification.²⁰ Strength testing (Fig. 2) of MSWI BA in concrete has been promising, with up to 50% coarse aggregate replacement meeting performance thresholds.¹⁹ For example, a sidewalk made with MSWI BA-amended PCC (Fig. 3) was constructed at the SWA of Palm Beach County in collaboration with the University of Florida.

Recent advancements in MSWI BA-amended PCC include performing advanced metals recovery (AMR) on the BA prior to use. The AMR process removes metallic components through sieving, magnets, and eddy current separators. At the SWA, AMR-processed BA has been tested in PCC to assess strength and performance characteristics compared to unprocessed BA (traditional metals recovery [TMR]).¹⁹

Research has shown that concrete incorporating AMR or TMR BA met compressive strength requirements for NS and low-strength concrete (17 MPa [2470 psi]). Little to no difference in compressive strength was observed between specimens incorporating AMR versus TMR BA, although AMR BA-amended specimens exhibited twice the average shrinkage compared to TMR specimens, likely due to the increased AI reactions in the TMR specimens counteracting the shrinkage.¹⁹

Another notable pilot project includes a test road made with sections of MSWI BA-amended PCC in Pasco County, FL. Constructed in 2015 at the Pasco County landfill, this project incorporated MSWI BA into road base, asphalt pavement, and PCC pavement test sections alongside control sections made without MSWI BA.^{1,21} Since its initial construction, the pilot road has been used by vehicles at the landfill site and periodically tested for performance and environmental parameters such as cracking and groundwater monitoring.

Due to the nature of MSWI BA, some material constituents exist at concentrations that must be monitored to ensure human and environmental safety. Before the development of the Pasco County pilot road, a risk assessment evaluated the implications of MSWI BA exposure to humans and the environment. The primary pathway of concern is leaching to groundwater, which is the travel of constituents through the road and to the aquifer. Using MSWI BA as an aggregate ensures that it remains encapsulated within the pavement, reducing exposure to the environment.²¹ In addition, concrete prevents significant infiltration of water through the road, so little to no leaching to groundwater is expected. This was supported by groundwater monitoring results, which revealed no noticeable changes in groundwater quality below the test road compared to groundwater collected from the site before construction.²¹ Figure 4 shows this section of the pilot road during construction and a decade after. The pilot road continues to function as a usable route for landfill employees, contractors, and construction equipment associated with ongoing projects at the Pasco County landfill.



Fig. 2: Test cylinders with MSWI BA as aggregate



Fig. 3: Sidewalk with MSWI BA at the Solid Waste Authority of Palm Beach County, FL



Fig. 4: Pasco County, FL, PCC section with MSWI BA coarse aggregate during construction (left) and a decade after (right)

These findings demonstrate that MSWI BA can be safely and effectively used as a coarse aggregate in PCC, offering a practical, performance-tested reuse option for practitioners seeking sustainable alternatives to virgin materials.

Cement replacement

In recent years, researchers have evaluated alternative SCMs due to the decreasing availability of coal FA.^{12,22} The possibility of using MSWI ash as an SCM is promising, primarily due to its elemental composition and pozzolanic properties. MSWI ash contains significant proportions of Ca, Si, Al, and Fe oxides, essential constituents for pozzolanic reactivity and cementitious development in concrete.^{12,23} Supplementing even a small percentage of cement or traditional SCMs with MSWI BA could reduce energy and resource needs associated with concrete production while providing a closed-loop recycling opportunity for the ash.

Recent work has involved investigating the characteristics of MSWI BA—including identifiable physical components such as glass, ceramic, and slag—for potential reuse as an SCM.¹² The unique physical components of the MSWI BA can be identified in Fig. 1. Separating the components of MSWI BA can optimize reuse and performance, as it allows manufacturers to select which components to use as an SCM. MSWI BA glass and ceramic are ideal for use as an SCM based on their elemental compositions and compressive strengths. At 28 days, the compressive strength of mortar with MSWI BA glass was 75% of mortar made with ordinary portland cement (OPC) alone. The study suggests that the strength of BA glass mortar may continue to increase at later testing ages.^{12,24}

One observed flaw was the production of hydrogen gas in the mortar cubes during curing. This caused expansion of mortar specimens, as shown in Fig. 5. Metallic aluminum in MSWI BA reacts with the alkaline cementitious mixture to produce hydrogen gas. Because metallic aluminum was most prevalent in the slag component, the specimens made with MSWI BA slag experienced the greatest degree of expansion and strength reduction from hydrogen gas formation.¹² Some

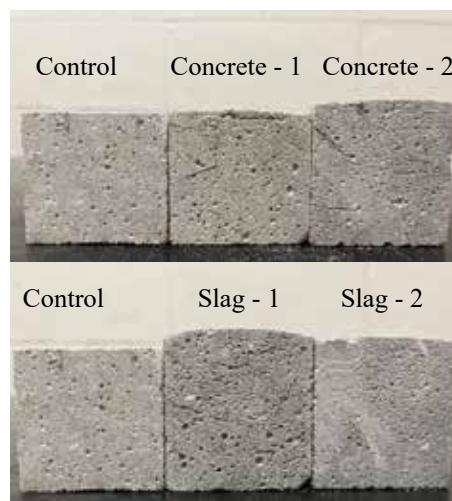


Fig. 5: Mortar cubes made with 25% MSWI BA as SCM, compared to the control specimen, where height difference indicates expansion (from Reference 12)

studies report that hydrogen gas formation in the final concrete product can be mitigated by alkaline washing of the MSWI BA before reuse.²⁵ Additionally, autoclaved aerated concrete (AAC) producers use metallic aluminum as an aerating agent,²⁶ leading to exploration into AAC as an alternative pathway for reusing MSWI BA. These findings highlight MSWI BA's potential to serve as a viable SCM in certain concrete applications if material processing and mixture design are carefully managed to control gas formation and optimize performance.

Autoclaved aerated concrete

The presence of metallic aluminum in MSWI BA, particularly the fine fraction, limits reuse in conventional concrete systems due to the uncontrolled production of hydrogen gas.^{13,27-29} Hydrogen gas generation in concrete entraps air, leads to cracking, and lowers both strength and durability. However, AAC producers extensively use metallic aluminum powder and pastes as aerating agents.²⁶ Silica and calcium are required for AAC to generate sufficient strength and dimensional stability during autoclaving. Given the presence of metallic aluminum, silica, and calcium in MSWI

BA, the AAC industry provides a sustainable, alternative pathway for recycling the ash in large quantities.

During AAC production, fresh slurries consisting of cement, lime, finely ground quartz (silica) sand, and water are admixed with metallic aluminum. The metallic aluminum reacts with water in the alkaline slurry to rapidly produce hydrogen gas. This expands and uniformly entrains small air bubbles within the slurry. After setting, the material is autoclaved at high temperatures and pressures to promote the reaction between silica and calcium. This process results in a cellular, lightweight cementitious material with high porosity (up to 80% volume), excellent thermal and acoustic insulation properties, adequate strength and dimensional stability, low shrinkage, and high fire resistance. Furthermore, AAC can be easily machined and reinforced for certain geometries and structural loads. These properties make AAC advantageous in load-bearing and non-load-bearing building construction, such as cladding, walls, roofs, and floors.²⁶

Past literature evaluated the technical feasibility of using MSWI BA as the sole aerating agent and partial fine silica sand replacement in AAC production.³⁰⁻³² Similar or better strength, thermal insulation, and drying shrinkage performance are reported for laboratory-scale AAC made with MSWI BA compared to AAC made using conventional materials. Grinding MSWI BA to sufficient fineness is critical to ensure proper aeration of AAC. Faster aeration ensures that air voids are uniform in both size and distribution, leading to better structural properties.^{30,33} Although MSWI BA needs to be ground, obtaining and processing MSWI BA generally costs less than conventional aerating agents.

Metallic aluminum content (0.2 to 2% by weight) tends to be low and variable in MSWI BA.^{28,30,34} For proper aeration, sufficiently high substitution rates in AAC are needed. High quantities of MSWI BA in AAC mixtures reduce fresh fluidity, resulting in poor air-void distribution and lower strength and thermal properties.³⁴ Recent research by the University of Florida found that workability and air-entraining admixtures can offset some of the adverse effects of MSWI BA on fresh and hardened AAC properties.³⁵ However, MSWI BA-based AAC still had less uniform void distribution compared to conventional AAC, as shown in Fig. 6. The study also raised concerns related to the fate of MSWI BA-borne chloride content in reinforced AAC due to the potential for corrosion and the impact of unburnt organic content on workability and admixture performance, both of which require further investigation.³⁵

AAC is mostly used in Europe and Asia. Approximately 450 million m³ (590 million yd³) of AAC were produced globally in 2018.³⁶ Although use in the United States lags behind other countries, AAC production and demand are expected to grow domestically and abroad. The growing AAC industry offers a promising and scalable pathway for recycling MSWI BA, provided that material variability and performance challenges are addressed through proper processing and mixture design.



Fig. 6: AAC made using conventional metallic aluminum powder (left) and AAC made using MSWI BA (right)

Cement ingredient

A new avenue being explored is reusing MSWI ash as an ingredient in cement production. Due to MSWI ash's high contents of Ca, Si, Fe, and Al, it can feasibly be used as a cement ingredient. This could create a new market for MSWI ash reuse, redirect the ash from landfills, and decrease reliance on cement raw materials such as limestone for Ca addition, thereby decreasing carbon dioxide (CO₂) emissions in the cement industry.¹²

The study discussed previously investigated MSWI BA reuse as a cement ingredient. After sorting the BA into visible components, researchers investigated the elemental oxide composition using X-ray fluorescence (XRF) in the same way that cement producers would analyze their cement and raw ingredients. The resulting analysis revealed MSWI BA components to be high in silicon dioxide (SiO₂) and calcium oxide (CaO), with concentrations of alumina or aluminum oxide (Al₂O₃), iron(III) oxide (Fe₂O₃), magnesium oxide (MgO), and disodium trioxide (Na₂O₃) appropriate for use in a cement kiln feed.¹²

Full-scale pilot studies involving the use of MSWI BA as a kiln feed ingredient in cement production have been performed.^{16,17} Researchers conducted distinct kiln trials using 0, 1, and 2% washed and unwashed MSWI BA additions. The studies reported both performance and environmental impacts of MSWI BA reuse in cement manufacture. The BA was washed to remove soluble constituents such as chloride—which can volatilize in a cement kiln and result in clogging of the air ducts—and to reduce the concentration of other constituents that may be harmful in the kiln or to the final cement product. Figure 7 shows the washing procedure, wherein MSWI BA was washed, and the washed BA and water were poured from the chute onto the ground. The entire washing procedure took place on top of a lined landfill.

In previous studies, researchers identified washing as a beneficial practice for mitigating air emissions during cement production. There were no meaningful differences in air emissions measured over the duration of the trial, suggesting that, given a washing procedure and careful control of ash replacement, cement plant operators may use MSWI ash with no significant changes to operating conditions or air emissions permits.¹⁷



Fig. 7: Washing of MSWI ash to decrease contaminant concentration and increase reusability



Fig. 8: MSWI ash-amended clinker created using 1 to 2% MSWI BA addition to the cement kiln feed

MSWI BA-amended clinker (shown in Fig. 8) produced during each of the kiln trials was processed into cement. The physical and environmental properties of all resulting cements were comparable. Generally, there were no elements of concern present in the 1 and 2% BA-amended cements that were not observed at similar concentrations in the control cement. While a greater compressive strength than the control was observed for 1% BA-amended cements (51 MPa [7400 psi]) at 28 days, the 2% BA-amended cement strength (45 MPa [6490 psi]) was lower than that of the control group (48 MPa [6910 psi]). The 2% BA-amended cement had a quicker initial setting time when tested with the Vicat apparatus (95 minutes) compared to the 1% BA-amended (119 minutes) and control (130 minutes) cements.¹⁷

MSWI ash reuse in cement production decreases the overall environmental and economic burden associated with cement manufacturing. Given the financial costs of disposal, MSWI operators may be willing to provide MSWI ash to cement manufacturers for free or at a greatly reduced cost. Results of the studies discussed in this section suggest that incorporating MSWI BA into cement manufacture is feasible, with no significant operational changes or compromise in material performance.

Summary

Repurposing MSWI ash in construction provides a sustainable solution to waste management while reducing carbon emissions and conserving natural resources. By using the MSWI ash as an SCM, waste that would otherwise be landfilled is transformed into a valuable resource, reducing landfill strain and minimizing environmental hazards. This process extends the material's life cycle, fostering a circular economy within the built environment.

Field and laboratory evaluations demonstrate that MSWI BA can be incorporated into PCC to meet strength and durability performance characteristics and established service thresholds. The oxide composition of MSWI BA makes it suitable for cementitious applications and kiln feed. Beyond

sustainability, incorporating MSWI ash in concrete decreases reliance on virgin resources, lowers mining costs, and maintains concrete quality. Any performance limitations can be mitigated through pretreatment methods or optimized supplementation levels. Ongoing research continues to refine pretreatment technologies, making MSWI ash more accessible to the cement and concrete industries.

Expanding the market for MSWI ash has additional economic benefits. Increased demand will free up landfill space while supporting waste-to-energy initiatives.

MSWI facilities generate electricity, reducing reliance on coal and natural gas and creating jobs in waste management and incineration. Unlike landfiling, MSWI lowers transportation costs, particularly for northeastern states that currently ship waste out of state for disposal. Additionally, MSWI facilities require less land than landfills and provide local electricity, further reducing costs.

In the absence of formal standards for MSWI ash use in concrete, project-specific testing is essential to ensure structural performance and compliance with existing codes. As demonstrated by the studies discussed in this article, future practitioners should validate strength, durability, and leaching characteristics using established ASTM International or AASHTO test methods prior to field implementation. Ultimately, the widespread adoption of MSWI ash reuse leads to cleaner air, cost savings, and more sustainable energy solutions. As industries continue to embrace circular economy principles, MSWI ash presents a practical and scalable opportunity to transform a "waste" into a long-term resource.

References

1. Ferraro, C.C.; Power, J.P.; Roessler, J.; Paris, J.; and Townsend, T.G., "From Trash to Treasure," *Concrete International*, V. 38, No. 11, Nov. 2016, pp. 46-51.
2. Diliberto, C.; Meux, E.; Diliberto, S.; Garoux, L.; Marcadier, E.; Rizet, L.; and Lecomte, A., "A Zero-Waste Process for the Management of MSWI Fly Ashes: Production of Ordinary Portland Cement," *Environmental Technology*, V. 41, No. 9, Sept. 2020, pp. 1199-1208.

3. Pan, J.R.; Huang, C.; Kuo, J.-J.; and Lin, S.-H., "Recycling MSWI Bottom and Fly Ash as Raw Materials for Portland Cement," *Waste Management*, V. 28, No. 7, 2008, pp. 1113-1118.
4. Poletti, A.; Pomi, R.; and Carcani, G., "The Effect of Na and Ca Salts on MSWI Bottom Ash Activation for Reuse as a Pozzolanic Admixture," *Resources, Conservation and Recycling*, V. 43, No. 4, Mar. 2005, pp. 403-418.
5. Shih, P.-H.; Chang, J.-E.; and Chiang, L.-C., "Replacement of Raw Mix in Cement Production by Municipal Solid Waste Incineration Ash," *Cement and Concrete Research*, V. 33, No. 11, Nov. 2003, pp. 1831-1836.
6. Shimaoka, T.; Komiya, T.; Takahashi, F.; and Nakayama, H., "Dechlorination of Municipal Solid Waste Incineration Residues for Beneficial Reuse as a Resource for Cement," *Journal of ASTM International*, V. 8, No. 10, Nov. 2011, Article No. 103671.
7. Spreadbury, C.J.; Weiksnar, K.D.; Laux, S.; and Townsend, T.G., "Distributions of Trace Elements within MSWI Bottom and Combined Ash Components: Implications for Reuse Practices," *Chemosphere*, V. 336, Sept. 2023, Article No. 139198.
8. Wang, L.; Jin, Y.; Nie, Y.; and Li, R., "Recycling of Municipal Solid Waste Incineration Fly Ash for Ordinary Portland Cement Production: A Real-Scale Test," *Resources, Conservation and Recycling*, V. 54, No. 12, Oct. 2010, pp. 1428-1435.
9. Zhang, S.; Ghoul, Z.; He, Z.; Hu, L.; and Shao, Y., "Use of Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash as a Supplementary Cementitious Material in Dry-Cast Concrete," *Construction and Building Materials*, V. 266, Part A, Jan. 2021, Article No. 120890.
10. EPA, "Energy Recovery from the Combustion of Municipal Solid Waste (MSW)," United States Environmental Protection Agency, Washington, DC, 2025, <https://www.epa.gov/smm/energy-recovery-combustion-municipal-solid-waste-msw>. (last accessed Aug. 21, 2025).
11. EPA, "Advancing Sustainable Materials Management: 2018 Fact Sheet," United States Environmental Protection Agency, Washington, DC, Dec. 2020, 25 pp., https://www.epa.gov/sites/default/files/2021-01/documents/2018_ff_fact_sheet_dec_2020_fnl_508.pdf.
12. Magnuson, J.K.; Weiksnar, K.D.; Patel, A.D.; Clavier, K.A.; Ferraro, C.C.; and Townsend, T.G., "Processing Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash for Integration into Cement Product Manufacture," *Resources, Conservation and Recycling*, V. 198, Nov. 2023, Article No. 107139.
13. Roessler, J.; Paris, J.; Ferraro, C.C.; Watts, B.; and Townsend, T., "Use of Waste to Energy Bottom Ash as an Aggregate in Portland Cement Concrete: Impacts of Size Fractionation and Carbonation," *Waste and Biomass Valorization*, V. 7, No. 6, Dec. 2016, pp. 1521-1530.
14. Schafer, M.L.; Clavier, K.A.; Townsend, T.G.; Kari, R.; and Worobel, R.F., "Assessment of the Total Content and Leaching Behavior of Blends of Incinerator Bottom Ash and Natural Aggregates in View of Their Utilization as Road Base Construction Material," *Waste Management*, V. 98, Oct. 2019, pp. 92-101.
15. Spreadbury, C.J.; McVay, M.; Laux, S.J.; and Townsend, T.G., "A Field-Scale Evaluation of Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash as a Road Base Material: Considerations for Reuse Practices," *Resources, Conservation and Recycling*, V. 168, May 2021, Article No. 105264.
16. Clavier, K.A.; Watts, B.; Liu, Y.; Ferraro, C.C.; and Townsend, T.G., "Risk and Performance Assessment of Cement Made Using Municipal Solid Waste Incinerator Bottom Ash as a Cement Kiln Feed," *Resources, Conservation and Recycling*, V. 146, July 2019, pp. 270-279.
17. Clavier, K.A.; Ferraro, C.C.; and Townsend, T.G., "Pilot-Scale Cement Production Using Treated Waste Incineration Bottom Ash: Physical and Environmental Performance," *Resources, Conservation and Recycling*, V. 175, Dec. 2021, Article No. 105862.
18. Tkachenko, N.; Tang, K.; McCarten, M.; Reece, S.; Kampmann, D.; Hickey, C.; Bayarara, M.; Foster, P.; Layman, C.; Rossi, C.; Scott, K.; Yoken, D.; Christiaen, C.; and Caldecott, B., "Global Database of Cement Production Assets and Upstream Suppliers," *Scientific Data*, V. 10, Oct. 2023, Article No. 696.
19. Weiksnar, K.D.; Marks, E.J.; Deaderick, M.J.; Meija-Ruiz, I.; Ferraro, C.C.; and Townsend, T.G., "Impacts of Advanced Metals Recovery on Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash: Aggregate Characteristics and Performance in Portland Limestone Cement Concrete," *Waste Management*, V. 187, Oct. 2024, pp. 70-78.
20. FDOT, "Standard Specifications for Road and Bridge Construction, FY 2024-25," Florida Department of Transportation, Tallahassee, FL, 2024-2025, 1319 pp.
21. Townsend, T., and Roessler, J., "Pasco County Use Case Scenarios to Examine the Recycling of Waste to Energy Bottom Ash in Road Construction Applications," Pasco County Utilities, FL, 2014, 460 pp.
22. Sarmiento, L.M.; Clavier, K.A.; Paris, J.M.; Ferraro, C.C.; and Townsend, T.G., "Critical Examination of Recycled Municipal Solid Waste Incineration Ash as a Mineral Source for Portland Cement Manufacture – A Case Study," *Resources, Conservation and Recycling*, V. 148, Sept. 2019, pp. 1-10.
23. Clavier, K.A.; Paris, J.M.; Ferraro, C.C.; Bueno, E.T.; Tibbetts, C.M.; and Townsend, T.G., "Washed Waste Incineration Bottom Ash as a Raw Ingredient in Cement Production: Implications for Lab-Scale Clinker Behavior," *Resources, Conservation and Recycling*, V. 169, June 2021, Article No. 105513.
24. Bueno, E.T.; Paris, J.M.; Clavier, K.A.; Spreadbury, C.; Ferraro, C.C.; and Townsend, T.G., "A Review of Ground Waste Glass as a Supplementary Cementitious Material: A Focus on Alkali-Silica Reaction," *Journal of Cleaner Production*, V. 257, June 2020, Article No. 120180.
25. Tian, Y.; Themelis, N.J.; and Boutsalas, A.C., "Effects of Water, Acid, or Alkali Washing on Waste-to-Energy (WTE) Bottom Ash, Fly Ash, and Combined Ash," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, V. 12, No. 2, Apr. 2024, Article No. 111936.
26. ACI Committee 526, "Guide for Design and Construction with Autoclaved Aerated Concrete Panels (ACI PRC-526-19)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2019, 82 pp.
27. Müller, U., and Rübner, K., "The Microstructure of Concrete Made with Municipal Waste Incinerator Bottom Ash as an Aggregate Component," *Cement and Concrete Research*, V. 36, No. 8, Aug. 2006, pp. 1434-1443.
28. Saffarzadeh, A.; Arumugam, N.; and Shimaoka, T., "Aluminum and Aluminum Alloys in Municipal Solid Waste Incineration (MSWI) Bottom Ash: A Potential Source for the Production of Hydrogen Gas," *International Journal of Hydrogen Energy*, V. 41, No. 2, Jan. 2016, pp. 820-831.
29. Pecqueur, G.; Crignon, C.; and Quéneé, B., "Behaviour of

Cement-Treated MSWI Bottom Ash,” *Waste Management Series, Volume 1: Waste Materials in Construction Wascon 2000: Proceedings of the International Conference on the Science and Engineering of Recycling for Environmental Protection, Harrogate, England 31 May, 1–2 June 2000*, G.R. Woolley, J.J.J.M. Goumans, and P.J. Wainwright, eds., V. 1, 2000, pp. 541–547.

30. Song, Y.; Li, B.; Yang, E.-H.; Liu, Y.; and Ding, T., “Feasibility Study on Utilization of Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash as Aerating Agent for the Production of Autoclaved Aerated Concrete,” *Cement and Concrete Composites*, V. 56, Feb. 2015, pp. 51–58.

31. Liao, S.-K.; Lu, W.-C.; Chen, Y.-L.; and Shen, Y.-H., “Production of Autoclaved Aerated Concrete by Using Municipal Solid Waste Incinerator Fly Ash as an Alternative Raw Material,” *Case Studies in Construction Materials*, V. 21, Dec. 2024, Article No. e03914.

32. Brossat, M.; Prud’homme, E.; Lupsea-Toader, M.; Blanc, D.; and de Brauer, C., “Characterization of Lightweight Aerated Mortars Using Waste-to-Energy Bottom Ash (WtE-BA) as Aerating Agent,” *Journal of Environmental Management*, V. 356, Apr. 2024, Article No. 120443.

33. Dupiano, P.; Stamatis, D.; and Dreizin, E.L., “Hydrogen

Production by Reacting Water with Mechanically Milled Composite Aluminum-Metal Oxide Powders,” *International Journal of Hydrogen Energy*, V. 36, No. 8, Apr. 2011, pp. 4781–4791.

34. Liu, Y.; Kumar, D.; Zhu, W.; Chen, Z.; Lim, K.H.; Lai, Y.L.; Hu, Z.; and Yang, E.-H., “Utilization of Coarse Non-Ferrous Fraction of Incineration Bottom Ash as Aerating Agent in Autoclaved Aerated Concrete,” *Construction and Building Materials*, V. 375, Apr. 2023, Article No. 130906.

35. Ferraro, C.; Riding, K.; Patel, A.; and Posada, R., “Autoclaved Aerated Concrete Using MSWI Bottom Ash as an Aerating Agent,” Report No. 2023-07, Hinkley Center for Solid and Hazardous Waste Management, Gainesville, FL, 2024, 86 pp.

36. Shrestha, A.R.; Xia, J.; Di Sarno, L.; and Chin, C.S., “Feasibility Study of Utilizing Autoclaved Aerated Concrete (AAC) Waste for the Production of Cold Bonded Lightweight Artificial Aggregate Using High Volume Fly Ash (HVFA) Binders,” *Construction and Building Materials*, V. 449, Oct. 2024, Article No. 138414.

Selected for reader interest by the editors.



Jordan K. Magnuson is a PhD Student in environmental engineering at the Engineering School of Sustainable Infrastructure & Environment, University of Florida, Gainesville, FL, USA. Her research interests include the reuse of industrial waste products in construction applications. She has experience in environmental analysis, beneficiation

and recycling of industrial wastes, nondestructive and laboratory testing of construction materials, and environmental characterization and risk assessments.



Ashish D. Patel is a Postdoctoral Research Associate in the Department of Civil & Coastal Engineering at the University of Florida. He received his BA in applied mathematics from the University of California, Berkeley, Berkeley, CA, USA; his MS in civil engineering from California State University, Fullerton, Fullerton, CA;

and his PhD in civil engineering from the University of Florida. His research interests include cement and concrete materials engineering. He has experience in concrete nuclear shielding, alkali-silica reaction, hydration kinetics and phase development, admixture development, and beneficiation and upcycling of industrial waste products.



Timothy G. Townsend is the Program Director & Jones, Edmunds & Associates, Inc. Distinguished Professor at the Engineering School of Sustainable Infrastructure & Environment, University of Florida. His research interests include all facets of solid and hazardous waste management, including recycling and

waste reduction, reuse of combustion and thermal treatment residues, and landfill design and operation. He has over 30 years of experience working with state and federal regulatory agencies, municipalities, and private industry.



Christopher C. Ferraro, FACI, is an Associate Professor of civil engineering at the Engineering School of Sustainable Infrastructure & Environment, University of Florida. He has over 25 years of experience in structural and concrete materials engineering in the public, private, and academic sectors. His research interests include structural

materials assessment and analysis, and nondestructive and laboratory testing of construction materials. He is Vice Chair of ACI Committee 323, Low-Carbon Code Concrete, and a member of the ACI Technical Activities Committee, and ACI Committees 207, Mass and Thermally Controlled Concrete; 224, Cracking; 228, Nondestructive Testing of Concrete; 236, Material Science of Concrete; 301, Specifications for Concrete Construction; and 565, Lunar Concrete.

Aprovechamiento final de las cenizas de residuos sólidos urbanos en la industria del concreto

Por Jordan K. Magnuson, Ashish D. Patel, Timothy G. Townsend y Christopher C. Ferraro.

Este artículo analiza el aprovechamiento final de las cenizas procedentes de la incineración de residuos sólidos urbanos (RSU) en la industria del concreto, centrándose en la construcción de carreteras con baja resistencia y en usos no estructurales (NE). La reutilización de las cenizas de la incineración de RSU es una práctica habitual en todo el mundo, y en Estados Unidos se han puesto en marcha proyectos piloto¹⁻⁹. Entre los proyectos piloto llevados a cabo en Florida (EE. UU.) se incluyen la reutilización de cenizas de la incineración de RSU en la base de carreteras o como agregado en concreto de cemento Portland (CCP) en los condados de Pasco, Hillsborough y Palm Beach, y la creación de clinker de cemento utilizando entre un 1 % y un 2 % de cenizas de la incineración de RSU en el centro-norte y el centro-sur de Florida.

Visión general de la incineración de RSU

La incineración de RSU es el proceso de convertir los RSU en energía mediante la combustión controlada¹⁰. Este método aborda el problema de la acumulación de residuos en los vertederos, al tiempo que aprovecha el contenido calorífico de los materiales de desecho para generar electricidad o calor¹⁰. Aproximadamente 34.6 millones de toneladas (31.4 millones de toneladas métricas), alrededor del 12% de los RSU, se incineran anualmente en los Estados Unidos, lo que produce alrededor de 8.5 millones de toneladas (7.7 millones de toneladas métricas) de cenizas de la incineración de RSU como subproducto¹¹.

De acuerdo con los requisitos normativos estadounidenses, las cenizas volantes (FA, por sus siglas en inglés) y las cenizas de fondo (BA, por sus siglas en inglés) producidas durante la incineración de RSU se mezclan para producir cenizas combinadas (CA, por sus siglas en inglés)¹². Las BA de la incineración de RSU se refieren a los residuos no combustibles que quedan después del proceso de incineración,

que se componen principalmente por materiales inorgánicos como vidrio, metales y cerámica, como se muestra en la Fig. 1. Este material posee un valor calorífico residual y se deposita en vertederos o se reutiliza en proyectos de construcción¹²⁻¹⁵. Las FA de la incineración de RSU constituyen partículas finas capturadas por dispositivos de control de la contaminación atmosférica durante la incineración. Aunque la FA de la incineración de RSU se puede emplear en diversas actividades de reutilización, su gestión adecuada es crucial debido a las posibles implicaciones para la salud y el medio ambiente asociadas a su composición¹⁰. La CA de la incineración de RSU contiene aproximadamente un 80% de BA de la incineración de RSU y un 20% de FA de la incineración de RSU.

En la actualidad, en Estados Unidos se reciclan o reutilizan cantidades mínimas de BA procedente de la incineración de RSU como base para carreteras o agregados para la construcción¹²⁻¹⁵. Las cenizas de la incineración de RSU son útiles en estos mercados debido a sus propiedades de resistencia y a su composición elemental (calcio, sílice, aluminio y hierro [Ca, Si, Al y Fe]). Además, se siguen estudiando otras aplicaciones, como la alimentación de hornos de cemento^{12,16,17}.

La producción mundial de cemento es de aproximadamente 4.1 millones de toneladas (3.7 millones de toneladas métricas) al año¹⁸, lo que brinda la oportunidad de reciclar grandes cantidades de cenizas de la incineración de RSU como ingrediente o sustituto del cemento, incluso en porcentajes de sustitución bajos¹⁷. El establecimiento de un programa de reciclaje de este tipo no sólo reduce el volumen de residuos que se envían al vertedero, sino que también reduce la necesidad de utilizar FA de carbón y materiales extraídos de forma natural, lo que en última instancia reduce la huella medioambiental del sector de la construcción¹⁷.

Este artículo explora las aplicaciones pasadas, presentes y potenciales futuras de las cenizas en la industria del concreto, particularmente las relacionadas con las BA de la incineración de RSU como agregado para concreto, sustituto del cemento como material cementante suplementario (SCM, por sus siglas en inglés) e ingrediente del cemento (alimentación del horno).

Usos de las cenizas de la incineración de RSU

La BA de la incineración de RSU es un material granular y altamente compactable con propiedades similares a las de los agregados naturales que se utilizan habitualmente en la construcción de carreteras como material básico o agregado. Los estudios de laboratorio han documentado propiedades físicas y geotécnicas, como la resistencia a la carga, que demuestran que las cenizas de la incineración de RSU pueden ser adecuadas para su uso como base de carreteras, a pesar de su heterogeneidad¹⁵. Los recientes avances en los datos del proyecto piloto arrojan resultados prometedores en cuanto al comportamiento y el medio ambiente de la reutilización de cenizas de la incineración de RSU en bases de carreteras y otras aplicaciones en la construcción. Mientras que en investigaciones anteriores se ha estudiado el uso de BA procedente de incineración de RSU en bases de carreteras, el trabajo actual evalúa la reutilización de BA en formas encapsuladas, partiendo de la idea de que el encapsulado ayudará a evitar la lixiviación de metales pesados y otros componentes de las cenizas, preservando así la salud humana y el medio ambiente circundante.



Fig. 1. Cenizas de fondo (BA) frescas (izq.) y lavadas (der.) de la incineración de RSU

Agregado para concreto

Recientemente se ha estudiado en Florida el uso de la BA de la incineración de RSU como sustituto del agregado grueso en el CCP^{1,13,19}. La reutilización de la ceniza de la incineración de RSU como agregado en el concreto reduce la dependencia de los agregados extraídos, como la piedra caliza y el granito, y aprovecha un recurso que, de otro modo, se consideraría un desecho. Esta práctica no es inusual en el mundo, ya que muchos países europeos y asiáticos utilizan la BA de la incineración de RSU para sustituir hasta el 50% de los agregados gruesos en el concreto NE¹⁹. En estas aplicaciones, el rendimiento

de las muestras de CCP modificadas con BA y los proyectos piloto llevados a cabo en toda Florida han cumplido con éxito los umbrales de rendimiento exigidos por el Departamento de Transporte de Florida (FDOT, por sus siglas en inglés)^{1,19}.

La colaboración entre la Autoridad de Residuos Sólidos (ARS) del condado de Palm Beach, FL, y la Universidad de Florida, Gainesville, FL, ha determinado que la BA de la incineración de RSU es un agregado adecuado para el concreto NE según la Especificación para Carreteras y Puentes de la FDOT²⁰. Las pruebas de resistencia (Fig. 2) de la BA de la incineración de RSU en el concreto han sido prometedoras, con hasta un 50 % de sustitución del agregado grueso que cumple con los umbrales de rendimiento¹⁹. Por ejemplo, se construyó una acera con CCP modificado con la BA de la incineración de RSU (Fig. 3) en la RSU del condado de Palm Beach, en colaboración con la Universidad de Florida.

Los avances recientes en el CCP modificado con BA de la incineración de RSU incluyen la realización de una recuperación avanzada de metales (AMR, por sus siglas en inglés) en la BA antes de su uso. El proceso de AMR elimina los elementos metálicos mediante tamices, imanes y separadores de corrientes de Foucault. En la RSU, la BA procesada mediante AMR se ha probado en el CCP para evaluar sus características de resistencia y comportamiento en comparación con la BA sin procesar (recuperación tradicional de metales [TMR, por sus siglas en inglés])¹⁹.



Fig. 2. Cilindros de ensaye con BA de la incineración de RSU como agregado



Fig. 3: Banqueta con BA de la incineración de RSU en la Autoridad de Residuos Sólidos del condado de Palm Beach, FL

Las investigaciones han demostrado que el concreto que incorpora la AMR o la BA por TMR cumple con los requisitos de resistencia a la compresión para el concreto NE y de baja resistencia (17 MPa [2 470 psi]). Se observó poca o ninguna diferencia en la resistencia a la compresión entre los especímenes que incorporaban la AMR y los que incorporaban BA de la TMR, aunque los especímenes modificados con BA de la AMR mostraron el doble de contracción media en comparación con los especímenes de la TMR, probablemente debido al aumento de las reacciones del Al en los especímenes de la TMR, que contrarrestaron la contracción¹⁹.

Otro proyecto piloto destacable es una carretera de pruebas construida con secciones de CCP modificado con BA de la incineración de RSU en el condado de Pasco, FL. Construido en 2015 en el vertedero del condado de Pasco, este proyecto incorporó BA de la incineración de RSU en la base de la carretera, el pavimento asfáltico y las secciones de prueba del pavimento de CCP, junto con secciones de control construidas sin BA de la incineración de RSU ^{1,21}. Desde su construcción inicial, la carretera piloto ha sido utilizada por vehículos en el vertedero y se han realizado pruebas periódicas para evaluar su comportamiento y parámetros ambientales, como la aparición de grietas y el monitoreo de las aguas subterráneas.

Debido a la naturaleza de las BA de la incineración de RSU, algunos de los materiales que la componen se encuentran en concentraciones que deben controlarse para garantizar la seguridad de las personas y el medio ambiente. Antes de la construcción de la carretera piloto del condado de Pasco, se llevó a cabo una evaluación de riesgos para valorar las implicaciones de la exposición de las personas y el medio ambiente a las BA de la incineración de RSU. La principal fuente de preocupación es la filtración al agua subterránea, es decir, el desplazamiento de los compuestos a través de la carretera hasta el manto acuífero. El uso de BA de la incineración de RSU como agregado garantiza que permanezca encapsulado dentro del pavimento, lo que reduce la exposición al medio ambiente²¹. Además, el concreto evita la infiltración significativa de agua a través de la carretera, por lo que se espera que haya poca o ninguna filtración al agua subterránea. Esto fue respaldado por los resultados del monitoreo del agua subterránea, que



Fig. 4: Condado de Pasco, FL, sección del CCP con agregado grueso de BA de la incineración de RSU durante la construcción (izq.) y una década después (der.)

no revelaron cambios notables en la calidad de ésta debajo de la carretera de prueba en comparación con el agua subterránea recolectada del sitio antes de la construcción²¹. La Figura 4 muestra esta sección de la carretera piloto durante su construcción y una década después. La carretera piloto sigue funcionando como una ruta utilizable para los empleados del vertedero, los contratistas y la maquinaria de construcción relacionada con los proyectos en curso en el vertedero del condado de Pasco.

Estos hallazgos demuestran que la BA de la incineración de RSU puede utilizarse de forma segura y eficaz como agregado grueso en el CCP, lo que ofrece una opción de reutilización práctica y probada para los profesionales que buscan alternativas sostenibles a los materiales no procesados.

Sustitución del cemento

En los últimos años, los investigadores han evaluado SCM alternativos debido a la disminución de la disponibilidad de FA de carbón^{12,22}. La posibilidad de utilizar cenizas de la incineración de RSU como SCM es prometedora, principalmente debido a su composición elemental y sus propiedades puzolánicas. Las cenizas de la incineración de RSU contienen cantidades significativas de óxidos de Ca, Si, Al y Fe, elementos esenciales para la reactividad puzolánica y el desarrollo cementante en el concreto^{12,23}. Complementar incluso un pequeño porcentaje de cemento o SCM tradicionales con las BA de la incineración de RSU podría reducir las necesidades energéticas y de recursos asociadas a la producción de concreto, al tiempo que proporcionaría una oportunidad de reciclaje de ciclo cerrado para las cenizas.

En estudios recientes se han investigado las características de la BA de la incineración de RSU, incluyendo los elementos físicos identificables como vidrio, cerámica y escoria, para su posible reutilización como SCM¹². Los elementos físicos únicos de la BA de la incineración de RSU se pueden identificar en la Fig. 1. Separar los elementos de los residuos sólidos urbanos incinerados puede optimizar su reutilización y rendimiento, ya que permite a los fabricantes seleccionar qué elementos utilizar como SCM. El vidrio y la cerámica de los residuos sólidos urbanos incinerados son ideales para su uso como SCM debido a su composición elemental y resistencia a la compresión. A los 28 días, la resistencia a la compresión del mortero con vidrio de BA de la incineración de RSU era del 75 % de la del mortero fabricado únicamente con cemento portland ordinario (CPO). El estudio sugiere que la resistencia del mortero de vidrio de la BA podría

seguir aumentando en pruebas realizadas a edades posteriores^{12,24}.

Un defecto observado fue la producción de gas hidrógeno en los cubos de mortero durante el curado. Esto provocó la expansión de las muestras de mortero, como se aprecia en la Fig. 5. El aluminio metálico presente en la BA de la incineración de RSU reacciona con la mezcla cementante alcalina y produce gas hidrógeno. Dado que el aluminio metálico era el componente más abundante en la escoria, las muestras fabricadas con escoria de BA de la incineración de RSU experimentaron el mayor grado de expansión y reducción de la resistencia debido a la formación de gas hidrógeno¹². Algunos estudios indican que la formación de gas hidrógeno en el producto final de concreto puede mitigarse mediante el lavado alcalino de la BA de la incineración de RSU antes de su reutilización²⁵. Además, los productores de concreto celular curado en autoclave (AAC por sus siglas en inglés) utilizan aluminio metálico como agente aireador²⁶, lo que ha llevado a investigar el AAC como una vía alternativa para reutilizar la BA de la incineración de RSU. Estos hallazgos ponen de relieve el potencial de la BA de la incineración de RSU para servir como un SCM viable en determinadas aplicaciones concretas si se gestiona cuidadosamente el procesamiento de los materiales y el diseño de la mezcla para controlar la formación de gases y optimizar el desempeño.

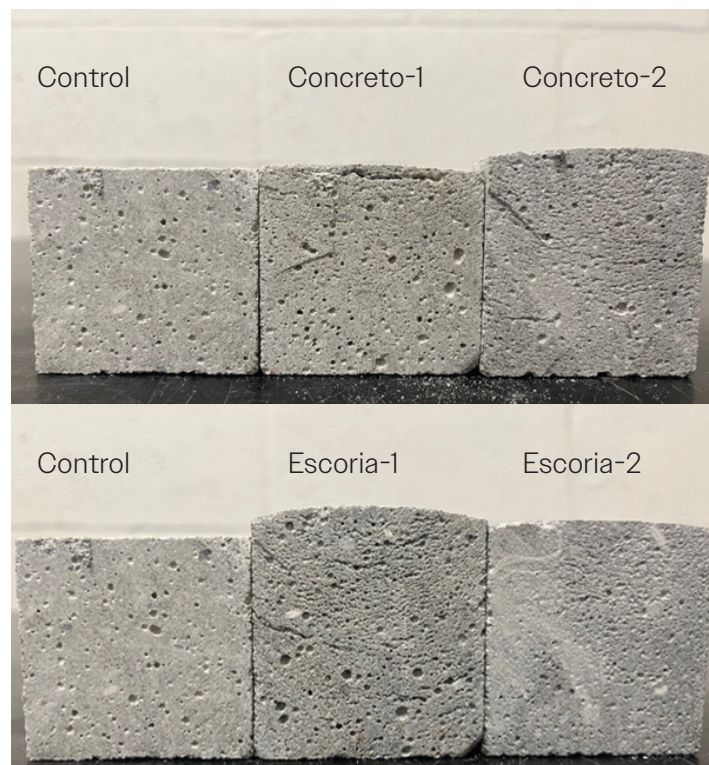


Fig. 5: Cubos de mortero fabricados con un 25 % de BA de la incineración de RSU como SCM, en comparación con la muestra de control, donde la diferencia de altura indica la expansión (tomado de la Referencia 12).

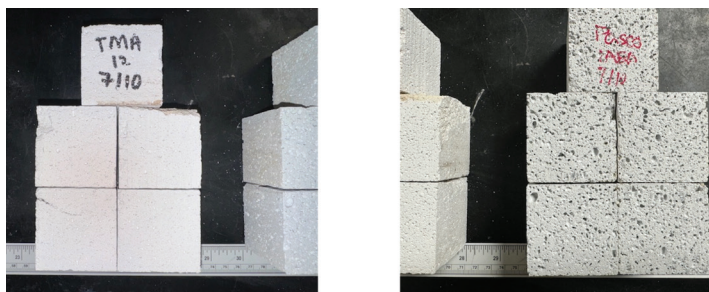


Fig. 6: AAC fabricados con polvo de aluminio metálico convencional (izq.) y AAC fabricados con BA de la incineración de RSU (dcha.)

Concreto celular curado en autoclave

La presencia de aluminio metálico en la BA de la incineración de RSU, especialmente en la fracción fina, limita su reutilización en sistemas de concreto convencionales debido a la producción descontrolada de gas hidrógeno^{13,27-29}. La generación de gas hidrógeno en el concreto atrapa el aire, provoca grietas y reduce tanto la resistencia como la durabilidad. Sin embargo, los productores de AAC utilizan ampliamente polvo y pastas de aluminio metálico como agentes aireadores²⁶. El AAC necesita sílice y calcio para generar la resistencia y la estabilidad dimensional suficientes durante el proceso de autoclave. Dada la presencia de aluminio metálico, sílice y calcio en las BA de la incineración de RSU, la industria de AAC ofrece una vía alternativa y sostenible para reciclar las cenizas en grandes cantidades. Durante la producción de AAC, se mezclan lodos frescos compuestos por cemento, cal, arena de cuarzo (sílice) finamente molida y agua con aluminio metálico. El aluminio metálico reacciona con el agua del lodo alcalino y produce rápidamente gas hidrógeno. Esto expande y arrastra uniformemente pequeñas burbujas de aire dentro de la lechada. Después del fraguado, el material se esteriliza en autoclave a altas temperaturas y presiones para promover la reacción entre la sílice y el calcio. Este proceso da como resultado un material cementante celular y ligero con alta porosidad (hasta un 80 % del volumen), excelentes propiedades de aislamiento térmico y acústico, resistencia y estabilidad dimensional adecuadas, baja contracción y alta resistencia al fuego. Además, el AAC se puede mecanizar y reforzar fácilmente para determinadas geometrías y cargas estructurales. Estas propiedades hacen que el AAC sea muy útil en la construcción de edificios con y sin carga, como revestimientos, paredes, techos y suelos²⁶.

En publicaciones anteriores se evaluó la viabilidad técnica de utilizar la BA de la incineración de RSU como único agente aireador y sustituto parcial de la arena fina de sílice en la producción de AAC³⁰⁻³². Se ha observado que el AAC fabricado a escala de laboratorio con BA de la incineración de RSU

presenta una resistencia, un aislamiento térmico y un comportamiento frente a la contracción por secado similares o superiores a los del AAC fabricado con materiales convencionales. Es fundamental moler la BA de la incineración de RSU hasta obtener la finura adecuada para garantizar un correcto aireado del AAC. Un aireado más rápido garantiza que los huecos de aire sean uniformes tanto en tamaño como en distribución, lo que mejora las propiedades estructurales^{30,33}. Aunque la BA de la incineración de RSU debe triturarse, su obtención y procesamiento suelen ser menos costosos que los agentes aireadores convencionales.

El contenido de aluminio metálico (entre el 0.2 y el 2% en peso) tiende a ser bajo y variable en los residuos sólidos urbanos incinerados^{28,30,34}. Para una aireación adecuada, se necesitan índices de sustitución suficientemente altos en el AAC. Las altas cantidades de la BA de la incineración de RSU en las mezclas de AAC reducen la fluidez en estado fresco, lo que da lugar a una mala distribución de los huecos de aire y a una menor resistencia y propiedades térmicas³⁴. Una investigación reciente de la Universidad de Florida descubrió que los aditivos para mejorar la trabajabilidad y la inclusión de aire pueden compensar algunos de los efectos adversos de la BA de la incineración de RSU en las propiedades del AAC fresco y endurecido³⁵. Sin embargo, el AAC a base de BA de la incineración de RSU seguía teniendo una distribución de huecos menos uniforme en comparación con el AAC convencional, como se muestra en la Fig. 6. El estudio también planteó inquietudes relacionadas con el destino del contenido de cloruro procedente de la BA de la incineración de RSU en el AAC reforzado, debido al potencial de corrosión y al impacto del contenido orgánico sin quemar en la trabajabilidad y el comportamiento de los aditivos, aspectos que requieren una investigación más profunda³⁵.

El AAC se utiliza principalmente en Europa y Asia. En 2018 se produjeron aproximadamente 450 millones de m³ (590 millones de yd³) de AAC en todo el mundo³⁶. Aunque su uso en Estados Unidos va a la zaga de otros países, se espera que la producción y la demanda de AAC crezcan tanto a nivel nacional como internacional. La creciente industria del AAC ofrece una vía prometedora y escalable para el reciclaje de BA de la incineración de RSU, siempre que se aborden los retos de variabilidad y comportamiento de los materiales mediante un procesamiento y un diseño de mezclas adecuados.

Ingredientes del cemento

Una nueva vía que se está explorando es la reutilización de las cenizas de la incineración de RSU

como ingrediente en la producción de cemento. Debido al alto contenido de Ca, Si, Fe y Al de las cenizas de la incineración de RSU, es factible utilizarlas como ingrediente del cemento. Esto podría crear un nuevo mercado para la reutilización de las cenizas de la incineración de RSU, desviar las cenizas de los vertederos y reducir la dependencia de materias primas del cemento, como la piedra caliza para la adición de Ca, lo que reduciría las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) en la industria cementera¹².

El estudio mencionado anteriormente investigó la reutilización de la BA de la incineración de RSU como ingrediente del cemento. Tras clasificar la BA en compuestos visibles, los investigadores analizaron la composición de óxidos elementales mediante fluorescencia de rayos X (FRX), del mismo modo que los productores de cemento analizarían su cemento y sus materias primas. El análisis resultante reveló que los compuestos de la BA de la incineración de RSU tienen un alto contenido en dióxido de silicio (SiO_2) y óxido de calcio (CaO), con concentraciones de alúmina u óxido de aluminio (Al_2O_3), óxido de hierro (III) (Fe_2O_3), óxido de magnesio (MgO) y trióxido disódico (Na_2O_3) adecuadas para su uso en la alimentación de hornos de cemento¹². Se han realizado estudios piloto a gran escala sobre el uso de la BA de la incineración de RSU como ingrediente para la alimentación de hornos en la producción de cemento^{16,17}. Los investigadores llevaron a cabo distintos ensayos en hornos utilizando adiciones de BA de la incineración de RSU lavada y sin lavar en proporciones del 0,1 y 2 %. Los estudios reportaron tanto el comportamiento como el impacto ambiental de la reutilización de la BA de la incineración de RSU en la fabricación de cemento. La BA se lavó para eliminar los compuestos solubles, como el cloruro, que puede volatilizarse en un horno de cemento y provocar la obstrucción de los conductos de aire, y para reducir la concentración de otros compuestos que pueden ser perjudiciales para el horno o para el producto final de cemento. La Figura 7 muestra el procedimiento de lavado, en el que se lavó la BA de la incineración de RSU y la BA lavada y el agua se vertieron desde la tolva al suelo. Todo el procedimiento de lavado se llevó a cabo sobre un vertedero revestido.

En estudios anteriores, los investigadores identificaron el lavado como una práctica ventajosa para mitigar las emisiones atmosféricas durante la producción de cemento. No se observaron diferencias significativas en las emisiones atmosféricas medidas durante el ensayo, lo que sugiere que, con un procedimiento de lavado y un control cuidadoso de la sustitución de cenizas, los

operadores de plantas cementeras pueden utilizar cenizas de la incineración de RSU sin cambios significativos en las condiciones de comportamiento o en los permisos de emisiones atmosféricas⁷.



Fig. 7: Lavado de cenizas de incineración de RSU para reducir la concentración de contaminantes y aumentar la reutilización.



Fig. 8: Clínter modificado con cenizas de la incineración de RSU creado utilizando una adición del 1 al 2% de BA de la incineración de RSU a la alimentación del horno de cemento.

El clínter modificado con BA de la incineración de RSU (mostrado en la Fig. 8) producido durante cada una de las pruebas del horno fue procesado para obtener cemento. Las propiedades físicas y ambientales de todos los cementos resultantes fueron comparables. En general, no se observaron elementos preocupantes en los cementos modificados con un 1% y un 2% de BA que no se observaran en concentraciones similares en el cemento de control. Si bien se observó una mayor resistencia a la compresión que el control para los cementos modificados con un 1% de BA (51 MPa [7 400 psi]) a los 28 días, la resistencia del cemento modificado con un 2 % de BA (45 MPa [6 490 psi]) fue inferior a la del grupo de control (48 MPa [6 910 psi]). El cemento modificado con un 2% de BA tuvo un tiempo de fraguado inicial más rápido cuando se probó con el aparato Vicat (95 minutos) en comparación con los cementos modificados con un 1% de BA (119 minutos) y el control (130 minutos)¹⁷.

La reutilización de las cenizas de incineración de RSU en la producción de cemento reduce la carga ambiental y económica global asociada a la fabricación de cemento. Dados los costos financieros de la eliminación, los operadores de incineración de RSU pueden estar dispuestos a proporcionar las

cenizas de incineración de RSU a los fabricantes de cemento de forma gratuita o a un costo muy reducido. Los resultados de los estudios analizados en esta sección sugieren que la incorporación de BA de incineración de RSU en la fabricación de cemento es factible, sin cambios operativos significativos ni comprometer el rendimiento del material.

Resumen

La reutilización de las cenizas de la incineración de RSU en la construcción ofrece una solución sostenible para la gestión de residuos, al tiempo que reduce las emisiones de carbono y conserva los recursos naturales. Al utilizar las cenizas de la incineración de RSU como material de sustitución del cemento, los residuos que de otro modo acabarían en vertederos se transforman en un recurso valioso, lo que reduce la presión sobre los vertederos y minimiza los riesgos para el medio ambiente. Este proceso prolonga el ciclo de vida del material, fomentando una economía circular dentro del entorno construido.

Las evaluaciones de campo y de laboratorio demuestran que la BA de la incineración de RSU puede incorporarse al CCP para cumplir con las características de comportamiento en cuanto a resistencia y durabilidad y los umbrales de servicio establecidos. La composición de óxido de la BA de la incineración de RSU la hace adecuada para aplicaciones cementantes y para la alimentación de hornos. Más allá de la sostenibilidad, la incorporación de cenizas de la incineración de RSU en el concreto reduce la dependencia de los recursos vírgenes, disminuye los costos de extracción y mantiene la calidad del concreto. Cualquier limitación en el comportamiento puede mitigarse mediante métodos de pretratamiento o niveles de suplementación optimizados. Las investigaciones en curso continúan perfeccionando las tecnologías de pretratamiento, lo que hace que las cenizas de la incineración de RSU sean más accesibles para las industrias del cemento y el concreto.

La expansión del mercado de las cenizas de la incineración de RSU tiene beneficios económicos adicionales. El aumento de la demanda liberará espacio en los vertederos y respaldará las iniciativas de conversión de residuos en energía.

Las instalaciones de incineración de RSU generan electricidad, lo que reduce la dependencia del carbón y el gas natural y crea puestos de trabajo en la gestión de residuos y la incineración. A diferencia de los vertederos, la incineración de RSU reduce los gastos de transporte, especialmente para los estados del noreste que actualmente envían los residuos

fuera del estado para su eliminación. Además, las instalaciones de incineración de RSU requieren menos terreno que los vertederos y proporcionan electricidad local, lo que reduce aún más los costos.

A falta de normas formales para el uso de cenizas de la incineración de RSU en el concreto, es esencial realizar pruebas específicas para cada proyecto a fin de garantizar el comportamiento estructural y el cumplimiento de los códigos vigentes. Tal y como demuestran los estudios analizados en este artículo, los futuros profesionales deben validar la resistencia, la durabilidad y las características de lixiviación utilizando métodos de prueba establecidos por ASTM International o AASHTO antes de su implementación en el campo. En última instancia, la adopción generalizada de la reutilización de las cenizas de la incineración de RSU conduce a un aire más limpio, a un ahorro en los gastos y a soluciones energéticas más sostenibles. A medida que las industrias continúan adoptando los principios de la economía circular, las cenizas de la incineración de RSU presentan una oportunidad práctica y escalable para transformar un “residuo” en un recurso a largo plazo.

Referencias

1. Ferraro, C.C.; Power, J.P.; Roessler, J.; Paris, J.; and Townsend, T.G., “From Trash to Treasure,” *Concrete International*, V. 38, No. 11, Nov. 2016, pp. 46-51.
2. Diliberto, C.; Meux, E.; Diliberto, S.; Garoux, L.; Marcadier, E.; Rizet, L.; and Lecomte, A., “A Zero-Waste Process for the Management of MSWI Fly Ashes: Production of Ordinary Portland Cement,” *Environmental Technology*, V. 41, No. 9, Sept. 2020, pp. 1199-1208.
3. Pan, J.R.; Huang, C.; Kuo, J.-J.; and Lin, S.-H., “Recycling MSWI Bottom and Fly Ash as Raw Materials for Portland Cement,” *Waste Management*, V. 28, No. 7, 2008, pp. 1113-1118.
4. Poletini, A.; Pomi, R.; and Carcani, G., “The Effect of Na and Ca Salts on MSWI Bottom Ash Activation for Reuse as a Pozzolanic Admixture,” *Resources, Conservation and Recycling*, V. 43, No. 4, Mar. 2005, pp. 403-418.
5. Shih, P.-H.; Chang, J.-E.; and Chiang, L.-C., “Replacement of Raw Mix in Cement Production by Municipal Solid Waste Incineration Ash,” *Cement and Concrete Research*, V. 33, No. 11, Nov. 2003, pp. 1831-1836.
6. Shimaoka, T.; Komiya, T.; Takahashi, F.; and Nakayama, H., “Dechlorination of Municipal Solid Waste Incineration Residues for Beneficial Reuse as a Resource for Cement,” *Journal of ASTM International*, V. 8, No. 10, Nov. 2011, Article No. 103671.
7. Spreadbury, C.J.; Weiksnar, K.D.; Laux, S.; and Townsend, T.G., “Distributions of Trace Elements within MSWI Bottom and Combined Ash Components: Implications for Reuse Practices,” *Chemosphere*, V. 336, Sept. 2023, Article No. 139198.
8. Wang, L.; Jin, Y.; Nie, Y.; and Li, R., “Recycling of Municipal Solid Waste Incineration Fly Ash for Ordinary Portland Cement

- Production: A Real-Scale Test,” *Resources, Conservation and Recycling*, V. 54, No. 12, Oct. 2010, pp. 1428-1435.
9. Zhang, S.; Ghouleh, Z.; He, Z.; Hu, L.; and Shao, Y., “Use of Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash as a Supplementary Cementitious Material in Dry-Cast Concrete,” *Construction and Building Materials*, V. 266, Part A, Jan. 2021, Article No. 120890.
 10. EPA, “Energy Recovery from the Combustion of Municipal Solid Waste (MSW),” United States Environmental Protection Agency, Washington, DC, 2025, <https://www.epa.gov/smm/energy-recoverycombustion-municipal-solid-waste-msw>. (last accessed Aug. 21, 2025).
 11. EPA, “Advancing Sustainable Materials Management: 2018 Fact Sheet,” United States Environmental Protection Agency, Washington, DC, Dec. 2020, 25 pp., https://www.epa.gov/sites/default/files/2021-01/documents/2018_ff_fact_sheet_dec_2020_fnl_508.pdf.
 12. Magnuson, J.K.; Weiksnar, K.D.; Patel, A.D.; Clavier, K.A.; Ferraro, C.C.; and Townsend, T.G., “Processing Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash for Integration into Cement Product Manufacture,” *Resources, Conservation and Recycling*, V. 198, Nov. 2023, Article No. 107139.
 13. Roessler, J.; Paris, J.; Ferraro, C.C.; Watts, B.; and Townsend, T., “Use of Waste to Energy Bottom Ash as an Aggregate in Portland Cement Concrete: Impacts of Size Fractionation and Carbonation,” *Waste and Biomass Valorization*, V. 7, No. 6, Dec. 2016, pp. 1521-1530.
 14. Schafer, M.L.; Clavier, K.A.; Townsend, T.G.; Kari, R.; and Worobel, R.F., “Assessment of the Total Content and Leaching Behavior of Blends of Incinerator Bottom Ash and Natural Aggregates in View of Their Utilization as Road Base Construction Material,” *Waste Management*, V. 98, Oct. 2019, pp. 92-101.
 15. Spreadbury, C.J.; McVay, M.; Laux, S.J.; and Townsend, T.G., “A Field-Scale Evaluation of Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash as a Road Base Material: Considerations for Reuse Practices,” *Resources, Conservation and Recycling*, V. 168, May 2021, Article No. 105264.
 16. Clavier, K.A.; Watts, B.; Liu, Y.; Ferraro, C.C.; and Townsend, T.G., “Risk and Performance Assessment of Cement Made Using Municipal Solid Waste Incinerator Bottom Ash as a Cement Kiln Feed,” *Resources, Conservation and Recycling*, V. 146, July 2019, pp. 270-279.
 17. Clavier, K.A.; Ferraro, C.C.; and Townsend, T.G., “Pilot-Scale Cement Production Using Treated Waste Incineration Bottom Ash: Physical and Environmental Performance,” *Resources, Conservation and Recycling*, V. 175, Dec. 2021, Article No. 105862.
 18. Tkachenko, N.; Tang, K.; McCarten, M.; Reece, S.; Kampmann, D.; Hickey, C.; Bayaraa, M.; Foster, P.; Layman, C.; Rossi, C.; Scott, K.; Yoken, D.; Christiaen, C.; and Caldecott, B., “Global Database of Cement Production Assets and Upstream Suppliers,” *Scientific Data*, V. 10, Oct. 2023, Article No. 696.
 19. Weiksnar, K.D.; Marks, E.J.; Deaderick, M.J.; Meija-Ruiz, I.; Ferraro, C.C.; and Townsend, T.G., “Impacts of Advanced Metals Recovery on Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash: Aggregate Characteristics and Performance in Portland Limestone Cement Concrete,” *Waste Management*, V. 187, Oct. 2024, pp. 70-78.
 20. FDOT, “Standard Specifications for Road and Bridge Construction, FY 2024-25,” Florida Department of Transportation, Tallahassee, FL, 2024-2025, 1319 pp.
 21. Townsend, T., and Roessler, J., “Pasco County Use Case Scenarios to Examine the Recycling of Waste to Energy Bottom Ash in Road Construction Applications,” Pasco County Utilities, FL, 2014, 460 pp.
 22. Sarmiento, L.M.; Clavier, K.A.; Paris, J.M.; Ferraro, C.C.; and Townsend, T.G., “Critical Examination of Recycled Municipal Solid Waste Incineration Ash as a Mineral Source for Portland Cement Manufacture – A Case Study,” *Resources, Conservation and Recycling*, V. 148, Sept. 2019, pp. 1-10.
 23. Clavier, K.A.; Paris, J.M.; Ferraro, C.C.; Bueno, E.T.; Tibbetts, C.M.; and Townsend, T.G., “Washed Waste Incineration Bottom Ash as a Raw Ingredient in Cement Production: Implications for Lab-Scale Clinker Behavior,” *Resources, Conservation and Recycling*, V. 169, June 2021, Article No. 105513.
 24. Bueno, E.T.; Paris, J.M.; Clavier, K.A.; Spreadbury, C.; Ferraro, C.C.; and Townsend, T.G., “A Review of Ground Waste Glass as a Supplementary Cementitious Material: A Focus on Alkali-Silica Reaction,” *Journal of Cleaner Production*, V. 257, June 2020, Article No. 120180.
 25. Tian, Y.; Themelis, N.J.; and Bourtsalas, A.C., “Effects of Water, Acid, or Alkali Washing on Waste-to-Energy (WTE) Bottom Ash, Fly Ash, and Combined Ash,” *Journal of Environmental Chemical Engineering*, V. 12, No. 2, Apr. 2024, Article No. 111936.
 26. ACI Committee 526, “Guide for Design and Construction with Autoclaved Aerated Concrete Panels (ACI PRC-526-19),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2019, 82 pp.
 27. Müller, U., and Rübner, K., “The Microstructure of Concrete Made with Municipal Waste Incinerator Bottom Ash as an Aggregate Component,” *Cement and Concrete Research*, V. 36, No. 8, Aug. 2006, pp. 1434-1443.
 28. Saffarzadeh, A.; Arumugam, N.; and Shimaoka, T., “Aluminum and Aluminum Alloys in Municipal Solid Waste Incineration (MSWI) Bottom Ash: A Potential Source for the Production of Hydrogen Gas,” *International Journal of Hydrogen Energy*, V. 41, No. 2, Jan. 2016, pp. 820-831.
 29. Pecqueur, G.; Crignon, C.; and Quéneé, B., “Behaviour of Cement-Treated MSWI Bottom Ash,” *Waste Management Series, Volume 1: Waste Materials in Construction Wascon 2000: Proceedings of the International Conference on the Science and Engineering of Recycling for Environmental Protection*, Harrogate, England 31 May, 1-2 June 2000, G.R. Woolley, J.J.J.M. Goumans, and P.J. Wainwright, eds., V. 1, 2000, pp. 541-547.
 30. Song, Y.; Li, B.; Yang, E.-H.; Liu, Y.; and Ding, T., “Feasibility Study on Utilization of Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash as Aerating Agent for the Production of Autoclaved Aerated Concrete,” *Cement and Concrete Composites*, V. 56, Feb. 2015, pp. 51-58.
 31. Liao, S.-K.; Lu, W.-C.; Chen, Y.-L.; and Shen, Y.-H., “Production of Autoclaved Aerated Concrete by Using Municipal Solid Waste Incinerator Fly Ash as an Alternative Raw Material,” *Case Studies in Construction Materials*, V. 21, Dec. 2024, Article No. e03914.

32. Brossat, M.; Prud'homme, E.; Lupsea-Toader, M.; Blanc, D.; and de Brauer, C., "Characterization of Lightweight Aerated Mortars Using Waste-to-Energy Bottom Ash (WtE-BA) as Aerating Agent," *Journal of Environmental Management*, V. 356, Apr. 2024, Article No. 120443.
33. Dupiano, P.; Stamatis, D.; and Dreizin, E.L., "Hydrogen Production by Reacting Water with Mechanically Milled Composite Aluminum-Metal Oxide Powders," *International Journal of Hydrogen Energy*, V. 36, No. 8, Apr. 2011, pp. 4781-4791.
34. Liu, Y.; Kumar, D.; Zhu, W.; Chen, Z.; Lim, K.H.; Lai, Y.L.; Hu, Z.; and Yang, E.-H., "Utilization of Coarse Non-Ferrous Fraction of Incineration Bottom Ash as Aerating Agent in Autoclaved Aerated Concrete," *Construction and Building Materials*, V. 375, Apr. 2023, Article No. 130906.
35. Ferraro, C.; Riding, K.; Patel, A.; and Posada, R., "Autoclaved Aerated Concrete Using MSWI Bottom Ash as an Aerating Agent," Report No. 2023-07, Hinkley Center for Solid and Hazardous Waste Management, Gainesville, FL, 2024, 86 pp.
36. Shrestha, A.R.; Xia, J.; Di Sarno, L.; and Chin, C.S., "Feasibility Study of Utilizing Autoclaved Aerated Concrete (AAC) Waste for the Production of Cold Bonded Lightweight Artificial Aggregate Using High Volume Fly Ash (HVFA) Binders," *Construction and Building Materials*, V. 449, Oct. 2024, Article No. 138414.

Jordan K. Magnuson es estudiante de doctorado en ingeniería ambiental en la Escuela de Ingeniería de Infraestructura Sostenible y Medio Ambiente de la Universidad de Florida, Gainesville, Florida, EE. UU. Sus intereses de investigación incluyen la reutilización de residuos industriales en aplicaciones de construcción. Tiene experiencia en análisis ambiental, beneficio y reciclaje de residuos industriales, ensayos no destructivos y de laboratorio de materiales de construcción, y caracterización ambiental y evaluación de riesgos.



Ashish D. Patel es investigador asociado postdoctoral en el Departamento de Ingeniería Civil y Costera de la Universidad de Florida. Obtuvo su licenciatura en Matemáticas Aplicadas en la Universidad de California, Berkeley, Berkeley, California, EE. UU.; su maestría en Ingeniería Civil en la Universidad Estatal de California, Fullerton, Fullerton, California; y su doctorado en Ingeniería Civil en la Universidad de Florida. Sus intereses de investigación incluyen la ingeniería de materiales de cemento y concreto. Tiene experiencia en blindaje nuclear de concreto, reacción álcali-sílice, cinética de hidratación y desarrollo de fases, desarrollo de aditivos y beneficio y reciclaje de productos de desecho industrial.



Timothy G. Townsend es director de programas y profesor distinguido de Jones, Edmunds & Associates, Inc. en la Facultad de Ingeniería de Infraestructura Sostenible y Medio Ambiente de la Universidad de Florida. Sus intereses de investigación abarcan todas las facetas de la gestión de residuos sólidos y peligrosos, incluyendo el reciclaje y la reducción de residuos, la reutilización de residuos de combustión y tratamiento térmico, y el diseño y funcionamiento de vertederos. Cuenta con más de 30 años de experiencia trabajando con agencias reguladoras estatales y federales, municipios y la industria privada.



Christopher C. Ferraro, FACI, es profesor asociado de ingeniería civil en la Escuela de Ingeniería de Infraestructuras Sostenibles y Medio Ambiente de la Universidad de Florida. Cuenta con más de 25 años de experiencia en ingeniería de materiales estructurales y de concreto en los sectores público, privado y académico. Sus intereses de investigación incluyen la evaluación y el análisis de materiales estructurales, y las pruebas no destructivas y de laboratorio de materiales de construcción. Es vicepresidente del Comité 323 de la ACI, Código de Concreto con Bajas Emisiones de Carbono, y miembro del Comité de Actividades Técnicas del ACI, y de los Comités 207, Concreto Controlado Térmicamente y en Masa; 224, Agrietamiento; 228, Pruebas No Destructivas del Concreto; 236, Ciencia de los materiales del concreto; 301, Especificaciones para la construcción con concreto; y 565, Concreto lunar.



Título original en inglés:
A Contribution from ACI Committee 236.
**End Uses of MSWI Ash in the
Concrete Industry**

**La traducción de este artículo
correspondió al Capítulo México
Noreste**



Traductora:
**Lic. Iliana
Margarita
Garza Gutiérrez**



Revisora Técnica:
**Ing. Elissa Narro
Aguirre**