

# Ground-Glass Pozzolan for Use in Concrete

Members of ASTM Subcommittee C09.24 summarize industry context behind new ASTM standard specification

by Amanda Kaminsky, Marija Krstic, Prasad Rangaraju, Arezki Tagnit-Hamou, and Michael D.A. Thomas

The construction sector is continually seeking new sources of supplementary cementitious materials (SCMs) to augment the portland cement, fly ash, slag cement, and silica fume used in modern concrete mixtures. Extensive research and testing have shown that several types of ground glass will perform well as a pozzolan in concrete. Supported by those results, ASTM Subcommittee C09.24, Supplementary Cementitious Materials, has drafted ASTM C1866/C1866M-20, “Standard Specification for Ground-Glass Pozzolan for Use in Concrete.” The new specification was published earlier this year, after 3-1/2 years of balloting by the committee. This article provides much of the background information and industry context that accompanied the balloting.

## Motivation

Glass production is a major source of greenhouse gases. While recycling can reduce the environmental impact,<sup>1</sup> 8.4 million tons (7.6 million tonnes) of container glass is landfilled annually in the United States (almost triple the amount that is recycled).<sup>2</sup> A significant resource is therefore being discarded. A preliminary, third-party life-cycle assessment of one ground-glass pozzolan (GGP) producer’s output<sup>3</sup> indicates that the global warming potential (GWP) impact for 1 ton (0.9 tonne) of GGP is 56 kg (123 lb) CO<sub>2</sub>e. For comparison, the U.S. industry average GWP for portland cement is 1040 kg (2293 lb) CO<sub>2</sub>e. Thus, the GWP calculated for a recent New York City project concrete mixture with 50% cement replacement with GGP would be about 40% less than the GWP for a concrete mixture with cement only.

## Glass Sources and Chemistry

Much of the glass produced in the world is one of the following types:

- Container glass (used in packaging)—This material is

- generally soda-lime glass produced in flint (clear), green, blue, or amber colors and formed by air pressure in molds;
- Plate glass (used as glazing in buildings and automobiles)—This material is also generally soda-lime glass produced in clear or tinted colors and formed by floating on molten tin; or
- E-glass (used as reinforcement in fiber-reinforced polymers)—This material is low-alkali glass formed by extrusion through a bushing to form filaments that are rapidly drawn to a fine diameter before solidifying.

Table 1 summarizes the chemistry of these glass types and other pozzolanic or cementitious materials used in concrete, and Fig. 1 contextualizes GGP versus ordinary portland cement (OPC) and other SCMs. Although the chemistry of E-glass is quite different from the chemistry of container or plate glass, all three glass types have been shown to be suitable for use as a pozzolan in portland cement concrete. Also, because of the controlled processes used to manufacture these glass types, each has a very uniform chemistry worldwide, as demonstrated by the standard deviation reported in Table 2 for container glass chemistry.

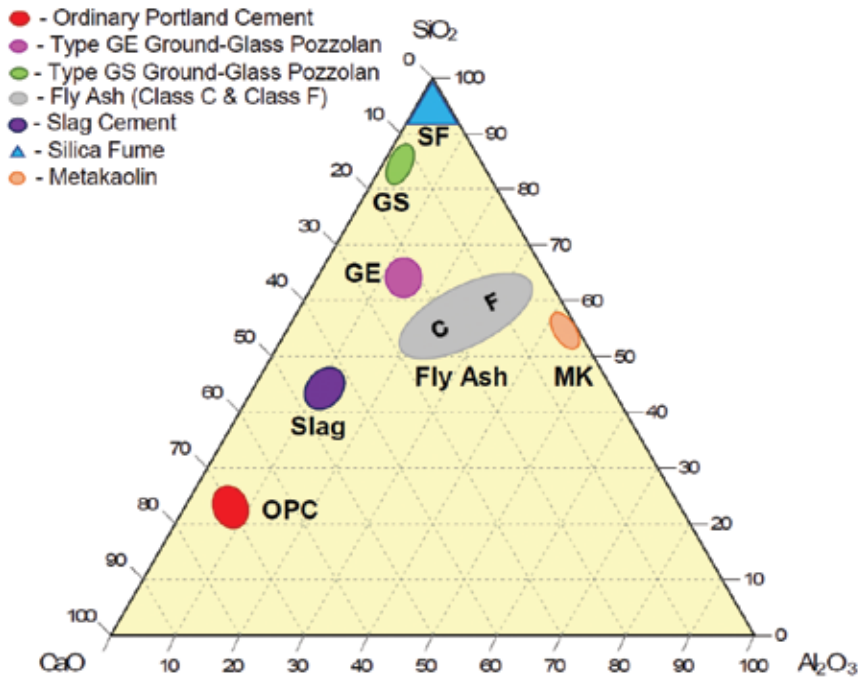
The subcommittee members agreed that the three glass sources listed in ASTM C1866/C1866M are produced in sufficient quantities to provide viable resources for concrete production. The subcommittee also agreed that ground glass could be used safely. Glass production is regulated to limit toxic materials content, and the glasses listed in the standard are not included on the U.S. Environmental Protection Agency (EPA) Resource Conservation and Recovery Act (RCRA) lists of hazardous wastes.<sup>9</sup> Further, the glass pozzolan sources are composed of amorphous silica. Unlike crystalline silica, amorphous silica has not been found to produce cancer in lung tissue.<sup>10,11</sup> However, as with all nonhazardous dusts, the U.S. Occupational Safety and Health Administration (OSHA) provides permissible exposure levels (PEL) for amorphous

**Table 1:**

**Typical composition of three principal glass types and common SCMs used in concrete<sup>4-6</sup>**

Compound	Composition, wt.%							
	Soda-lime glass		E-glass	Commonly specified materials				
	Container glass	Plate glass		Fly ash		Metakaolin	Slag cement	Silica fume
				Class F	Class C			
SiO <sub>2</sub>	71.0	71.2	59.9	50 to 60	30 to 50	51 to 53	39.4	94.7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.82	0.36	12.5	25 to 35	10 to 25	42 to 44	9.1	0.9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.61	0.44	0.37	5 to 10	4 to 10	0.52	0.32	1.2
CaO	10.9	9.33	21.4	1 to 12	15 to 30	<0.5	38.7	0.3
MgO	0.94	3.86	2.91	1 to 3	1 to 6	<0.5	11.9	1.8
Na <sub>2</sub> O	13.0	13.2	0.77	0.2 to 1.0	0 to 2	<0.1	0.29	—
K <sub>2</sub> O	0.52	0.04	0.06	1 to 3	0 to 4	<0.5	0.63	—
SO <sub>3</sub>	<0.1	<0.1	<0.1	0.1 to 1.0	1 to 4	<0.5	2	0.5
LOI	<0.5	<0.1	<0.1	0.5 to 5	0 to 3	0.7	<0.01	0.57
Amorphous silica*	~100	~100	~100	50 to 80	80 to 90	~100	>95	~100

\*Amorphous silica values are percentages of total silica content in the material



**Fig. 1: Ternary plot contextualizing GGPs versus OPC and other SCMs (Note: For ternary plots, values are in wt.%, and they are normalized to the sum of SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and CaO)<sup>4-8</sup>**  
(figure courtesy of Marija Krstic)

silica dust. The PEL (8-hour time-weighted average) for amorphous silica is 20 million particles/ft<sup>3</sup> of air (mppcf). For comparison, the PEL for mica or soapstone dust is also 20 mppcf, and the PEL for portland cement is 50 mppcf.<sup>12</sup>

### Glass Reserves and Supply Container glass

Per the EPA, the U.S. municipal solid waste (MSW) stream contained 11.4 million tons (10.3 million tonnes) of glass in 2017.<sup>2</sup> About 26%, or 3 million tons (2.7 million tonnes), was recovered for recycling, with the remaining 8.4 million tons (7.6 million tonnes) sent to landfills.<sup>2</sup> Most waste glass is collected in curbside pickup containers in which it is commingled with other recyclables such as paper, cardboard, plastics, and metals.<sup>1</sup> These materials go to single- and dual-stream material recovery facilities where the composite waste is crushed and the glass is separated via screens. Waste glass is also collected at bottle redemption centers in the 11 U.S. states that require bottle deposits on

**Table 2:****Chemical analyses of multiple samples of GGP produced from container glass (courtesy of Urban Mining Northeast)**

Constituent	Constituent amounts for GGP produced at various times, %						Mean	Std. deviation
	July 2018	Sept. 2018	Nov. 2018	Jan. 2019	Mar. 2019	May 2019		
SiO <sub>2</sub>	72.19	70.44	71.16	71.72	70.90	71.24	71.28	0.61
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.72	1.64	1.62	1.64	1.61	1.55	1.63	0.06
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.63	0.65	0.43	0.45	0.58	0.50	0.54	0.09
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	74.54	72.73	73.21	73.81	73.09	73.29	73.45	0.64
CaO	10.72	11.48	11.27	10.99	11.34	11.22	11.17	0.27
MgO	1.44	1.45	1.46	1.46	1.45	1.46	1.45	0.01
Na <sub>2</sub> O	12.49	13.52	13.27	12.96	13.31	13.25	13.13	0.36
K <sub>2</sub> O	0.45	0.47	0.46	0.46	0.47	0.48	0.47	0.01
SO <sub>3</sub>	0.18	0.18	0.16	0.16	0.15	0.13	0.16	0.02

some beverage purchases.<sup>13</sup> This glass is relatively clean and is suitable for color separation into cullet.

Much of the container glass processed at material recovery facilities is optically sorted, based on color, for sale to bottle manufacturers. However, about one-third of the glass is finer than 3/8 in. (9.51 mm), which is not economic to optically color separate.<sup>1</sup> Some of this glass may be suitable for re-melt into fiberglass insulation. Because it is not necessary to color-separate glass for use as a pozzolan, an additional 1 to 2 million tons (0.9 to 1.8 million tonnes) of glass can be sourced for that purpose. The total amount depends on future glass recycling rates in larger urban communities. The production of value-added pozzolans from waste glass will undoubtedly alter the negative perception of glass recycling, and recycling rates should increase significantly. Ultimately, far more than 2 million tons of container glass could be available for pozzolan production annually.

### Plate glass

From 1.5 to 2 million tons (1.4 to 1.8 million tonnes) of plate glass in the form of window trim, defective factory windshields, and post-consumer windshields and building window glass can be recycled. Many existing buildings are undergoing energy retrofits that include removal and replacement of envelope glass. Current major markets for recycled plate glass are glass spheres used for traffic paint and for rheology improvement, as well as for aggregate for road subgrades and structural fill. However, it is estimated that at least 400,000 to 500,000 tons (360,000 to 450,000 tonnes) would be available for the glass pozzolan market if the logistics can be streamlined. When processed, this glass will be as white as white cement, and it can be processed to 99.9% purity.

### E-glass

E-glass is typically recovered from the manufacture of fiberglass reinforcements at glass factories. It can be

processed from undrawn fiber waste, and it can be ground into a white powder without any fiber remnants. About 200,000 tons (180,000 tonnes) of this material are available per year.<sup>5</sup> Per Vitro Minerals, Inc. ([www.vitrominerals.com](http://www.vitrominerals.com)), E-glass pozzolans have been widely used for the past 10 years as pozzolans for white cement in decorative concrete applications.

### GGP Production

#### Glass cleaning

The primary sources of recycled glass are material recovery facilities and bottle redemption programs. Much lesser quantities come from bottle manufacturer rejects, municipal glass collection sites, and communities that require restaurants and bars to recycle their glass. Depending on the source of the glass, thermal, wet, and mechanical processes are employed to clean recycled glass for its next use. In thermal processes, the organic fraction is burned and metals are removed using magnets and eddy currents. While thermal processes are effective, state and local permitting authorities may require expensive air pollution control equipment. Wet processes are also effective but must include water treatment facilities. Mechanical cleaning processes use agitation and/or particle-on-particle collisions to abrade the organics off the glass. A series of screens and air jets (the air may be heated) are used to separate glass from nonglass components, and magnets are used to remove ferrous metals. Mechanical cleaning is commonly used for recycling container glass.

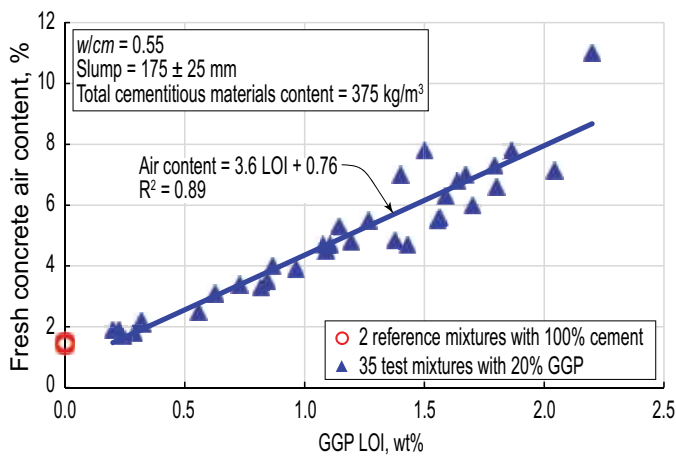
The average beverage bottle has a mass of about 225 g (8 oz) and an interior surface area of about 0.08 m<sup>2</sup> (0.86 ft<sup>2</sup>). When ground into a powder that passes a 325-mesh wet sieve, the resulting glass particles have a total surface area of about 2 m<sup>2</sup>/g. That totals about 550 m<sup>2</sup>/container (5920 ft<sup>2</sup>/container), so in effect only one glass particle in about 5600 particles will have been exposed to the bottle contents (usually, sugar). Further, the highly abrasive grinding environment abrades off most of any label or food residue material, and these materials are vacuumed into a dust

collector for disposal. However, because it is important to limit the amount of organic materials in any concrete mixture, the ASTM subcommittee investigated the effects of loss on ignition (LOI) values in glass powder.

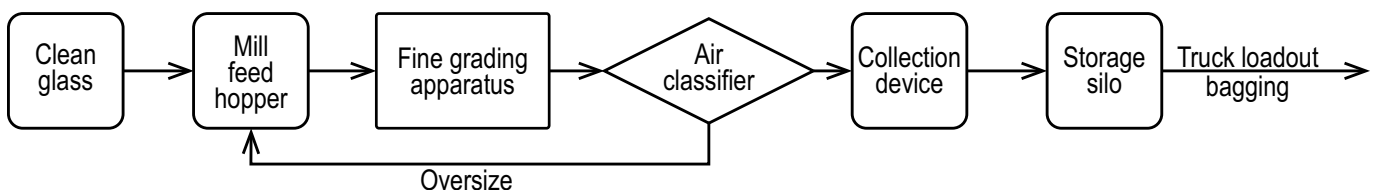
In practice, most of the LOI in recycled glass results from paper residues. To test the impact on concrete air content of organics associated with LOI, the University of Sherbrooke prepared and tested a total of 37 normalweight concrete mixtures with water-cementitious materials ratios ( $w/cm$ ) of 0.55, total cementitious materials content of  $375 \text{ kg/m}^3$  ( $632 \text{ lb/yd}^3$ ), and target slump of around  $175 \pm 25 \text{ mm}$  ( $7 \pm 1 \text{ in.}$ ). GGP samples with LOI values from 0.20 to 2.04 wt.% were used to replace 20% (by weight) of ASTM C1157/C1157M Type GU cement. Two reference mixtures were produced with 100% Type GU cement. A plot of fresh air content (measured per ASTM C231/C231M, “Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method”) versus LOI value in GGP (Fig. 2), shows that an LOI value of 0.5 wt.% or less can result in a 2% air content, which is acceptable for non-air-entrained concrete normally specified for interior applications. The committee chose to require the GGP manufacturer to clean glass powder to an LOI value of less than 0.5 wt.%.

### Glass grinding

Grinding glass on a commercial scale requires a closed-loop circuit in which the grinding device feeds an air classifier



**Fig. 2: Fresh air content versus LOI of GGP. The pozzolan comprised 20% of the total cementitious material in the 35 test mixtures (figure courtesy of Arezki Tagnit-Hamou) (Note: 1 mm = 0.04 in.; 1 kg/m<sup>3</sup> = 1.7 lb/yd<sup>3</sup>)**



**Fig. 3: Process overview for grinding clean glass pieces into pozzolan**

that separates material into two fractions: product having the desired particle size and oversize material (Fig. 3). The oversize material is conveyed back to the mill feed hopper. Product ground to spec is then conveyed pneumatically or via a closed screw auger to a silo for bulk truck loadout or bagging. Precrushing is often employed to reduce particle size prior to the grinding device to increase throughput.

The fineness limit in ASTM C1866/C1866M is set as 5 wt.% retained on a 325-mesh sieve. The fineness uniformity requirement in ASTM C1778, “Standard Guide for Reducing the Risk of Deleterious Alkali-Aggregate Reaction in Concrete,” states that the previous 10 tests cannot vary by more than 5%, so all material meeting the fineness requirement of C1866/C1866M will meet the uniformity requirement of C1778.

### ASR Mitigation Using Ground Glass

ASTM C1866/C1866M requires that a minimum of 95% of the glass powder passes a 325-mesh wet sieve (particles are smaller than 45 microns). Research suggests that particles smaller than 300 microns pose no risk for alkali-silica reaction (ASR).<sup>14,15</sup> When milling to 95% passing a 45-micron sieve, there is negligible risk of any remaining particles large enough to be of concern for ASR, particularly because the closed-loop grinding circuits should ensure that the 95% minimum is always exceeded. However, GGPs should be evaluated in accordance with ASTM C1778 to determine suitability for mitigating ASR. In the following sections, test data are provided for concrete mixtures with highly reactive aggregates. There are no data for glass pozzolans used with aggregates having low or moderate reactivity. As data become available, changes to ASTM C1778 may be proposed.

### Glass pozzolans versus other industry pozzolans

In comparison with other industry pozzolans, glass pozzolans have the following characteristics:

- Lower quantities available—Currently, 2 million tons of glass are available domestically per year, the majority of which can be used to make Type GS GGP. As glass-processing technology improves and the cost of competing SCMs increases, the economic viability of GGP processing plants will reach smaller markets that have recyclable glass available. This will increase the 2-million-ton potential;
- Greater purity—Glass pozzolans, sourced from the three identified categories, will have extremely uniform chemistry and be free of any hazardous elements<sup>5</sup>;
- Widespread sourcing—Sourcing of glass pozzolans will

**Table 3:**  
Reactivity and water demand for various pozzolans

Pozzolan	Potential cement replacement, % <sup>*</sup>	Reactivity	Water demand
Container glass	10 to 40	Moderate to high	Reduction
E-glass	10 to 30		
Plate glass	10 to 40		
Class F fly ash	10 to 30	Low <sup>†</sup>	Reduction
Class C fly ash	10 to 40	Moderate to high	Reduction
Natural pozzolan <sup>‡</sup>	10 to 20	Low to moderate	Moderate to large increase
Slag cement	25 to 50	Moderate	Neutral
Silica fume	5 to 8	High	Large increase
Metakaolin	5 to 15	High	Large increase

<sup>\*</sup>These values are intended to aid in contextualizing use of GGP among various materials. These materials have been/are used outside these ranges

<sup>†</sup>Low at early ages

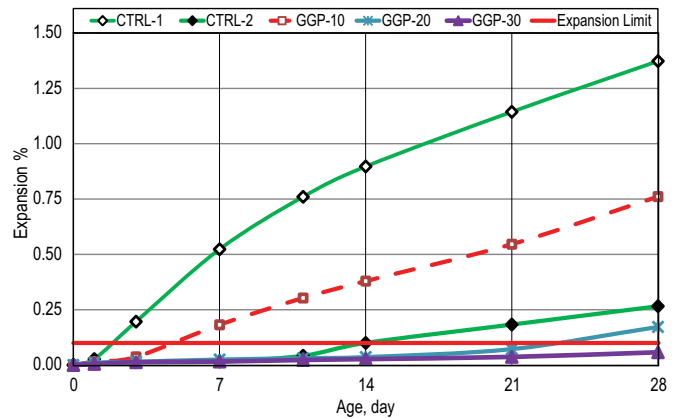
<sup>‡</sup>Natural pozzolans include a wide range of materials with a spectrum of properties

- likely be from smaller, more regional plants as compared with large power plants (fly ash) and steel mills (slag);
- Similar reactivity—Glass pozzolans have moderate to high reactivity, depending on their specific surface area (fineness) after processing (Table 3). Glass pozzolan performance permits cement replacement levels comparable with fly ash and slag<sup>5,14,16-33</sup>;
  - Lower water demand—Glass pozzolans have low water demand, like fly ash (Table 3). This helps to reduce admixture demand and cement factors in concrete<sup>5,16-20</sup>;
  - Similar environmental impacts—As glass pozzolans are recycled from postconsumer (Type GS) or postindustrial (Type GE) waste streams, their use in the concrete industry will have positive environmental benefits.<sup>29</sup>

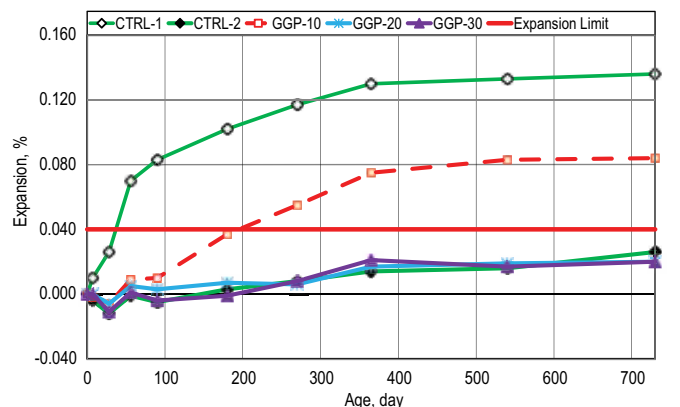
### Alkali content

It is important to use a cement with a low alkali content (low Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub>) when reactive aggregates will be present in mixtures with no pozzolan additions. E-glass has less than 1% Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub> content,<sup>5</sup> so it follows that its pozzolanic properties will dominate its behavior in concrete. This expectation is confirmed from studies conducted at Clemson University, through ASTM C1567, “Standard Test Method for Determining the Potential Alkali-Silica Reactivity of Combinations of Cementitious Materials and Aggregate (Accelerated Mortar-Bar Method),” and ASTM C1293, “Standard Test Method for Determination of Length Change of Concrete Due to Alkali-Silica Reaction,” tests (Fig. 4 and 5), which show the expansions over time for mortar and concrete mixtures containing reactive Las Placitas gravel aggregate and ground-glass fiber, a Type GE GGP, at various cement replacement levels.<sup>34,35</sup>

Soda-lime glass has a very high Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub> content of about 13.5%. However, data obtained per ASTM C1293 tests using Spratt aggregate, a known highly reactive aggregate, show that soda glass as ground pozzolan also provides mitigating effects (Fig. 6 and 7). Tests conducted at University of Sherbrooke (Fig. 6) show that Type GS GGP reduced



**Fig. 4: Accelerated mortar bar expansion per ASTM C1567 for mixtures with 10, 20, and 30% of ground-glass fiber (Type GE GGP) as cement replacement.<sup>34</sup> Mixtures CTRL-1 and CTRL-2 comprised OPC and OPC with 25% replacement with fly ash, respectively (GGP properties: LOI = 1 wt.%; avg. diameter = 4 microns; SG = 2.60; Blaine fineness = 1020 m<sup>2</sup>/kg)**



**Fig. 5: Concrete prism expansion per ASTM C1293 for mixtures with 10, 20, and 30% of Type GE GGP cement replacement.<sup>35</sup> Mixtures CTRL-1 and CTRL-2 comprised OPC and OPC with 25% replacement with fly ash, respectively (GGP properties: LOI = 1 wt.%; avg. diameter = 4 microns; SG = 2.60; Blaine fineness = 1020 m<sup>2</sup>/kg)**



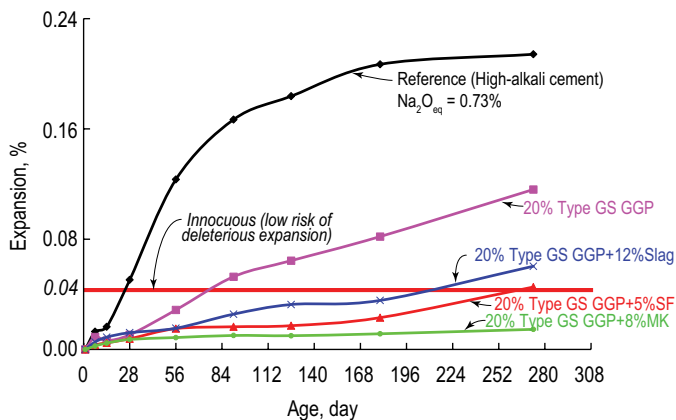
expansion to about 50% of the control mixture expansion but did not keep the expansion below the ASTM C1293 threshold of 0.04%. However, the threshold was met using a ternary blend with 8% metakaolin. Tests conducted at the University of New Brunswick (Fig. 7) show that at 20% cement replacement, E-glass (Type GE GGP) was effective in keeping prism expansion below the 0.04% limit at 2 years, while Type GS GGP sourced from plate glass reduced expansion compared to the high-alkali cement control (0.91%  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ ) but exceeded 0.1% and was greater than a control mixture with low-alkali cement (0.46%  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ ).

### Sulfate Resistance

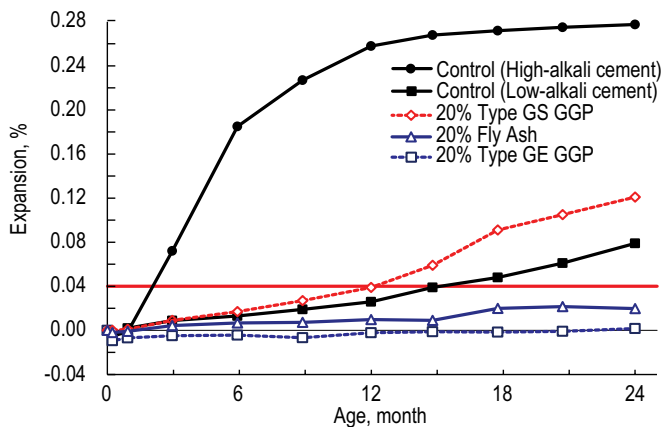
The results from two studies to evaluate sulfate resistance per ASTM C1012/C1012M, “Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution,” are shown in Fig. 8 and 9. The first of these studies (Fig. 8) evaluated the use of Type GE and GS pozzolan. As shown in Fig. 8(a), E-glass (Type GE) at 10 and

20% cement replacement levels reduced the expansion of a high-C3A portland cement concrete (control mixture expansion 0.459% at 6 months) to below the expansion limits specified for ASTM C1157/C1157M Type HS cement (0.05% at 6 months and 0.10% at 1 year), when blended with a high-C3A portland cement. The data also show in Fig. 8(b) that the expansion of mortar bars with either 25% cement replacement with Type GS or Type GE pozzolan was reduced to acceptable levels (again, meeting limits for Type HS cement) when blended with a high-C3A cement (control mixture expansion of 0.99% at 6 months).

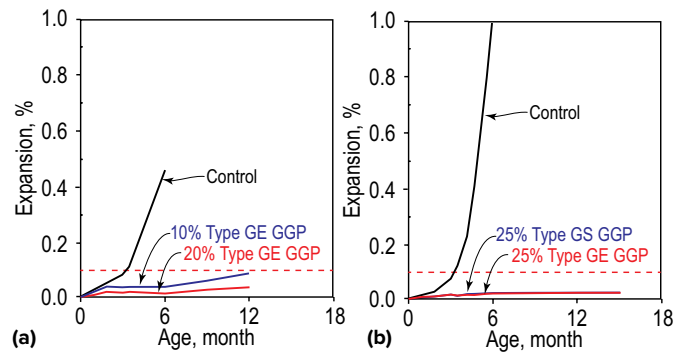
The second study was part of a wider study on the use of pozzolans in concrete (Fig. 9). Concrete mixtures containing 20 and 30% of Type GS ground glass cement replacements were studied in comparison with a control concrete mixture. The expansion due to sulfate attack shows that the control concrete exceeds the expansion limit of 0.10% recommended by ASTM C1157/C1157M from 130 days to reach 0.15% after 6 months. The mixtures incorporating 20 or 30% of Type GS GGP have very low expansions well below the limit prescribed by the standard. These expansions are of the same



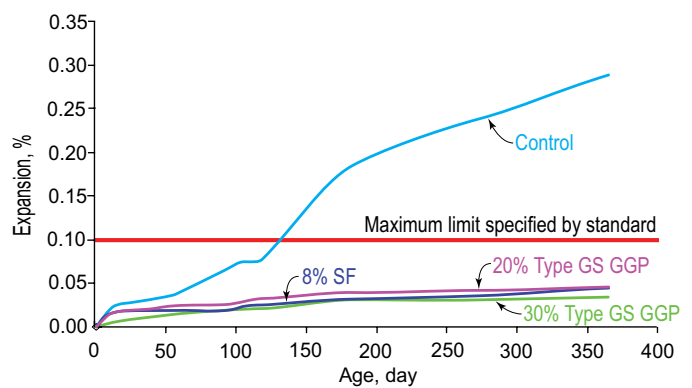
**Fig. 6:** Concrete prism expansion per ASTM C1293 for mixtures with Spratt aggregate, high-alkali cement, and cement replacement with Type GS GGP, silica fume (SF), and metakaolin (MK) (figure courtesy of Arezki Tagnit-Hamou)



**Fig. 7:** Concrete prism expansion per ASTM C1293 for mixtures with Spratt aggregate, high- or low-alkali cement, and cement replacement with Type GS GGP, Type GE GGP, or fly ash (figure courtesy of Michael D.A. Thomas)



**Fig. 8:** Expansion per ASTM C1012/C1012M for concrete mixtures with a high-C3A portland cement: (a) 10 and 20% E-glass (Type GE); and (b) 25% Type GS and GE pozzolan (figure courtesy of Michael D.A. Thomas)



**Fig. 9:** Expansion per ASTM C1012/C1012M for mixtures with 20 and 30% cement replacements with Type GS ground glass (figure courtesy of Michael D.A. Thomas)

order as that of cement type GUSF (general use cement containing around 8% of silica fume), which has strong resistance to sulfate attack.

### Chloride Permeability

Concrete mixtures containing GGP were evaluated per ASTM C1202, “Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete’s Ability to Resist Chloride Ion Penetration.” In one study, 16 concrete mixtures comprising portland cement and Type GS GGP at cement replacement levels of 20 and 30% were tested for 90 days. Control concrete mixtures included cement only. Mixtures were prepared with a *w/cm* of 0.55 or 0.40, and the GGP had a Blaine surface area of 374 or 436 m<sup>2</sup>/kg. As shown in Fig. 10, the total charge passed was low for all mixtures with GGP. The best performance was obtained for mixtures with 30% cement replacement.

In another study,<sup>36</sup> concrete mixtures were prepared using Type I/II portland cement (per ASTM C150/C150M, “Standard Specification for Portland Cement”) and Type GS GGP (with *d*<sub>50</sub> = 10 μm) at cement replacement levels of 20, 30, and 40% (GS-20, GS-30, and GS-40). All mixtures were prepared with a *w/cm* of 0.40. In addition to a control mixture with 100% portland cement (Control1), one mixture was prepared with 40% portland cement replacement with slag

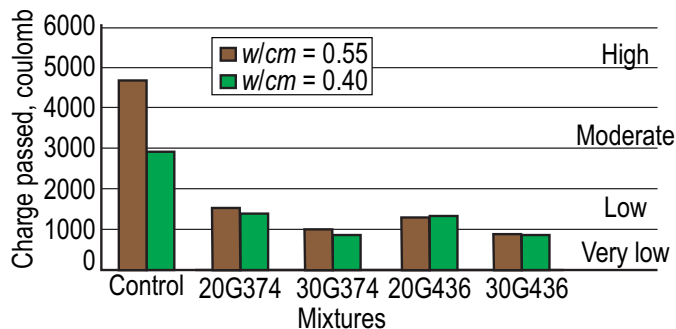


Fig. 10: Total charge passed per ASTM C1202 for concrete mixtures with Type GS GGP at 20 and 30% cement replacement after 90 days of curing<sup>16</sup>

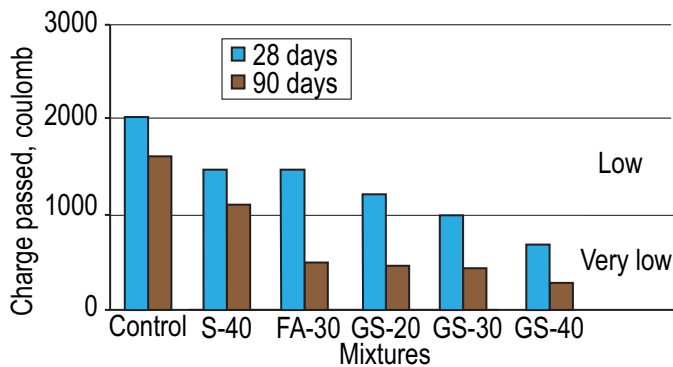


Fig. 11: Total charge passed per ASTM C1202 for concrete mixtures with various Type GS GGP cement replacement levels after 28 and 90 days of curing<sup>36</sup>

cement (S-40) and a second mixture was prepared with a 30% portland cement replacement with Class F fly ash (FA-30). As shown in Fig. 11, all concrete mixtures with Type GS GGP as a partial cement replacement exhibited very low passed-charge values at 90 days. All mixtures with GGP also performed better than the control mixture or the mixtures with slag cement or fly ash.

### Known Field Applications

Industrial-scale use of new alternative cementitious materials in the built environment cannot be expected without field validation through long-term exposure to realistic environmental conditions and loads. Many field installations of concrete mixtures with GGP have taken place over the past 15 years. Type GE GGP has been widely used for the past 15 years as a pozzolan for white cement in decorative concrete applications such as swimming pools, architectural precast concrete, and glass fiber-reinforced concrete (GFRC). Type GS GGP has been used as a partial replacement for cement for the past 10 years in applications such as concrete masonry units, pavers, precast concrete, and sidewalks. The City of Montréal, QC, Canada, began testing Type GS GGP as a cement replacement in sidewalks in 2010, in collaboration with the University of Sherbrooke.

The New York City Department of Design and Construction (NYC DDC), in collaboration with City College of New York, also started evaluating Type GS GGP in sidewalks, starting in 2016.<sup>37</sup> GGP is now included in NYC DDC concrete specifications. In collaboration with US Concrete, many structural concrete mixtures with Type GS GGP content have been tested and placed in New York City high-rise construction projects from 2016 through the present. These mixtures have included 35 to 40% cement replacement with Type GS GGP. Additional high-rise structural placements are being planned for New York City, NY, USA, and Philadelphia, PA, USA, also using Type GS GGP, in mixtures with up to 50% cement replacement. Some of these mixtures will also include slag cement.

Lastly, two bridges are being constructed on the Île-des-Soeurs, Montréal, QC, Canada (Fig. 12). The concrete bridges are being produced with 10% cement replacement with Type GS GGP, saving about 40 tonnes (44 tons) of cement.

### Acknowledgments

We thank ASTM staff and voting membership for their input. We also thank Boyd Clark, Julio Davalos, Louis Grasso, Dale Hauke, Doug Hooton, Joe Keating, Ahmed Omran, and Larry Sutter for contributing to this article.

### References

1. “Glass Recycling Facts,” Glass Packaging Institute, Arlington, VA, www.gpi.org/glass-recycling-facts. Accessed Oct. 5, 2020.
2. “Advancing Sustainable Materials Management, 2017 Fact Sheet,” United States Environmental Protection Agency, Washington, DC, Nov. 2019, www.epa.gov/sites/production/files/2019-11/documents/2017\_facts\_and\_figures\_fact\_sheet\_final.pdf.



**Fig. 12: One of two bridges under construction in Montréal comprising concrete with 10% cement replacement with Type GS GGP. The bridges will be instrumented and closely monitored by the University of Sherbrooke and the Ville de Montréal (photo courtesy of Ville de Montréal)**

3. “Pozzotive® Screening LCA – Pre-Production,” Climate Earth, 2020, [www.pozzotive.com/wp-content/uploads/2020/06/Pozzotive-LCA-Summary.pdf](http://www.pozzotive.com/wp-content/uploads/2020/06/Pozzotive-LCA-Summary.pdf).

4. “Global Glass Fibre Production: Changes Across the Board,” JEC Group, Feb. 21, 2011, [www.jeccomposites.com/knowledge/international-composites-news/global-glass-fibre-production-changes-across-board](http://www.jeccomposites.com/knowledge/international-composites-news/global-glass-fibre-production-changes-across-board).

5. Hemmings, R., “Process for Converting Waste Glass Fiber into Value-Added Products,” Report No. DE-FG36-03GO13015, Albacem LLC, Peoria, IL, Dec. 2005, 36 pp.

6. Snellings, R.; Mertens, G.; and Else, J., “Supplementary Cementitious Materials,” *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, V. 74, No. 1, Jan. 2012, pp. 211-278.

7. Duan, P.; Shui, Z.; Chen, W.; and Shen, C., “Effects of Metakaolin, Silica Fume and Slag on Pore Structure, Interfacial Transition Zone and Compressive Strength of Concrete,” *Construction and Building Materials*, V. 44, July 2013, pp. 1-6.

8. Poon, C.S.; Kou, S.C.; Lam, L., “Compressive Strength, Chloride Diffusivity and Pore Structure of High Performance Metakaolin and Silica Fume Concrete,” *Construction and Building Materials*, V. 20, No. 10, Dec. 2006, pp. 858-865.

9. “Defining Hazardous Waste: Listed, Characteristic and Mixed Radiological Wastes,” United States Environmental Protection Agency, Washington, DC, [www.epa.gov/hw/defining-hazardous-waste-listed-characteristic-and-mixed-radiological-wastes#listed](http://www.epa.gov/hw/defining-hazardous-waste-listed-characteristic-and-mixed-radiological-wastes#listed). Accessed Oct. 5, 2020.

10. Maier, M., “Amorphous Silica in Working Environments, A Toxicological Overview,” *Proceedings of International Conference on Silica Science and Technology: Silica 2001*, Mulhouse, France, Sept. 3-6, 2001.

11. “Fact Sheet: Silica, Amorphous and Other Non-Crystalline Forms,” Texas Commission on Environmental Quality (TCEQ), June 2011, 2 pp., [www.tceq.texas.gov/assets/public/implementation/tox/dsd/facts/amorphous\\_silica.pdf](http://www.tceq.texas.gov/assets/public/implementation/tox/dsd/facts/amorphous_silica.pdf).

12. “Table Z-3 Mineral Dust,” OSHA Standard 1910.1000 – Air Contaminants, Occupational Safety & Health Administration, Washington, DC, [www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.1000TABLEZ3](http://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.1000TABLEZ3). Accessed Oct. 5, 2020.

13. “Bottle Bill Resource Guide,” Container Recycling Institute, Culver City, CA, [www.bottlebill.org](http://www.bottlebill.org). Accessed Oct. 5, 2020.

14. Idir, R.; Cyr, M.; and Tagnit-Hamou, A., “Use of Fine Glass as ASR Inhibitor in Glass Aggregate Mortars,” *Construction and Building Materials*, V. 24, No. 7, July 2010, pp. 1309-1312.

15. Liu, S.; Wang, S.; Tang, W.; Hu, N.; and Wei, J., “Inhibitory Effect of Waste Glass Powder on ASR Expansion Induced by Waste Glass Aggregate,” *Materials*, V. 8, No. 10, Oct. 2015, pp. 6849-6862.

16. Zidol, A., “Optimization of the Fineness of Glass Powder in Binary Cementitious Systems,” MS thesis, University of Sherbrooke, Sherbrooke, QC, Canada, 2009, 168 pp.

17. Tagnit-Hamou, A., “The Use of Recycled Glass in Concrete and the Concept of Sustainable Development,” Sustainable Development and Concrete Seminar, American Concrete Institute – Québec and Eastern Ontario Chapter, Québec City, QC, Canada, Apr. 19, 2011.

18. Zidol, A.; Tognonvi, M.; and Tagnit-Hamou, A., “Advances in Durable Concrete Materials Applied to the African Context,” International Conference on Advances in Cement and Concrete Technology in Africa (ACCTA), Johannesburg, South Africa, Jan. 28-30, 2013.

19. Tagnit-Hamou, A., and Bengougam, A., “The Use of Glass Powder as Supplementary Cementitious Material,” *Concrete International*, V. 34, No. 3, Mar. 2012, pp. 56-61.

20. Hussein Abdalla, A.; Yahia, A.; and Tagnit-Hamou, A., “Statistical Modeling of Mechanical and Transport Properties of Concrete Incorporating Glass Powder,” *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, July 21, 2020, published online.

21. Nassar, R.-U.-D., and Soroushian, P., “Strength and Durability of Recycled Aggregate Concrete Containing Milled Glass as Partial Replacement for Cement,” *Construction and Building Materials*, V. 29, Apr. 2012, pp. 368-377.

22. Schwarz, N.; Cam, H.; and Neithalath, N., “Influence of a Fine Glass Powder on the Durability Characteristics of Concrete and Its Comparison to Fly Ash,” *Cement and Concrete Composites*, V. 30, No. 6, July 2008, pp. 486-496.

23. Shayan, A., and Xu, A., “Performance of Glass Powder as a Pozzolanic Material in Concrete: A Field Trial on Concrete Slabs,” *Cement and Concrete Research*, V. 36, No. 3, Mar. 2006, pp. 457-468.

24. Nassar, R.-U.-D., and Soroushian, P., “Field Investigation of Concrete Incorporating Milled Waste Glass,” *Journal of Solid Waste Technology and Management*, V. 37, No. 4, Nov. 2011, pp. 307-319.



25. Torres-Carrasco, M.; Tognonvi, M.T.; Tagnit-Hamou, A.; and Puertas, F., "Durability of Alkali-Activated Slag Concrete Prepared Using Waste Glass as Alternative Activator," *ACI Materials Journal*, V. 112, No. 6, Nov.-Dec. 2015, pp. 791-800.

26. Harbec, D.; Tagnit-Hamou, A.; and Gitzhofer, F., "Waste-Glass Fume Synthesized Using Plasma Spheroidization Technology: Reactivity in Cement Pastes and Mortars," *Construction and Building Materials*, V. 107, Mar. 2016, pp. 272-286.

27. Niang, A.; Roy, N.; and Tagnit-Hamou, A., "Structural Behavior of Concrete Incorporating Glass Powder Used in Reinforced Concrete Columns," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, V. 141, No. 3, Mar. 2015, 10 pp.

28. Soliman, N.A.; Omran, A.F.; and Tagnit-Hamou, A., "Laboratory Characterization and Field Application of Novel Ultra-High-Performance Glass Concrete," *ACI Materials Journal*, V. 113, No. 3, May-June 2016, pp. 307-316.

29. Soliman, N.A., and Tagnit-Hamou, A., "Development of Ultra-High-Performance Concrete Using Glass Powder—Towards Ecofriendly Concrete," *Construction and Building Materials*, V. 125, Oct. 2016, pp. 600-612.

30. Pavoine, A.; Harbec, D.; Chaussadent, T.; Tagnit-Hamou, A.; and Divet, L., "Impact of Alternative Cementitious Material on Mechanical and Transfer Properties of Concrete," *ACI Materials Journal*, V. 111, No. 3, May-June 2014, pp. 251-262.

31. Tognonvi, M.T.; Zidol, A.; Aitcin, C.-P.; and Tagnit-Hamou, A., "Aging of Glass Powder Surface," *Journal of Non-Crystalline Solids*, V. 427, Nov. 2015, pp. 175-183.

32. Idir, R.; Cyr, M.; and Tagnit-Hamou, A., "Use of Fine Glass as ASR Inhibitor in Glass Aggregate Mortars," *Construction and Building Materials*, V. 24, No. 7, July 2010, pp. 1309-1312.

33. Idir, R.; Cyr, M.; and Tagnit-Hamou, A., "Pozzolanic Properties of Fine and Coarse Color-Mixed Glass Cullet," *Concrete and Cement Composite*, V. 33, No. 1, Jan. 2011, pp. 19-29.

34. Rashidian-Dezfouli, H., and Rangaraju, P.R., "Role of Ground-Glass Fiber as a Pozzolan in Portland Cement Concrete," *Transportation Research Record*, V. 2629, No. 1, Jan. 2017, pp. 33-41.

35. Rashidian-Dezfouli, H., and Rangaraju, P.R., "Evaluation of Selected Durability Properties of Portland Cement Concretes Containing Ground Glass Fiber as a Pozzolan," *Transportation Research Record*, V. 2672, No. 27, May 2018, pp. 88-98.

36. Krstic, M., and Davalos, J.F., "Macro- and Micro-Structure Evaluations of Recycled Post-consumer Glass Cementitious Material for Concrete," *Proceedings of SynerCrete '18: International Conference on Interdisciplinary Approaches for Cement-Based Materials and Structural Concrete*, Funchal, Madeira Island, Portugal, Oct. 2018, pp. 261-266. [www.synercrete.com/wp-content/uploads/2018/10/SynerCrete18\\_Proceedings.pdf](http://www.synercrete.com/wp-content/uploads/2018/10/SynerCrete18_Proceedings.pdf).

37. Krstic, M., and Davalos, J.F., "Field Application of Recycled Glass Pozzolan for Concrete," *ACI Materials Journal*, V. 116, No. 4, July 2019, pp. 123-131.

Note: Additional information on the ASTM standards discussed in this article can be found at [www.astm.org](http://www.astm.org).

Selected for reader interest by the editors.



ACI member **Amanda Kaminsky** is Founder and Principal of Building Product Ecosystems LLC, New York City, NY, USA. She is a member of ACI Committee 240, Pozzolans. She is also a member of ASTM Committees C09, Concrete, and C11, Gypsum, and is the Technical Contact for ASTM C1866. She received her BS in architecture from the University of Virginia, Charlottesville, VA, USA.



ACI member **Marija Krstic** is a Postdoctoral Researcher and Adjunct Lecturer in civil engineering at the City College of New York (CCNY), New York City, NY, USA. She received her BS and MS from the University of Nis, Nis, Serbia, and her second MS in civil engineering and PhD in structural engineering and materials from CCNY.



**Prasad Rangaraju**, FACI, is a Professor of civil engineering at Clemson University, Clemson, SC, USA. He is a member of several technical committees of ACI and ASTM International. Rangaraju received his PhD in civil engineering from Purdue University, West Lafayette, IN, USA. He is a licensed professional engineer in Minnesota.



**Arezki Tagnit-Hamou**, FACI, is Professor of civil engineering and the Director of the Research Centre for Concrete Infrastructures at the University of Sherbrooke, Sherbrooke, QC, Canada. He serves on ACI Committee 130, Sustainability of Concrete, and ACI Subcommittees 130-D, Rating Systems/Sustainability Tools, and 239-D, Materials & Methods of Construction with UHPC. He is also active in RILEM and the Canadian Standards Association. Tagnit-Hamou received the 2011 ACI Jean-Claude Roumain Innovation in Concrete Award.



**Michael D.A. Thomas**, FACI, is Professor of civil engineering at the University of New Brunswick, Fredericton, NB, Canada. He is a member of ACI Committees 201, Durability of Concrete; 221, Aggregates; 232, Fly Ash in Concrete; 233, Ground Slag in Concrete; 234, Silica Fume in Concrete; 236, Material Science of Concrete; 240, Pozzolans; and 365, Service Life Prediction. His research interests include durability of reinforced concrete structures.

# Uso de vidrio molido como puzolana en el concreto

Los miembros del Subcomité ASTM C09.24 resumen el contexto industrial detrás de la nueva especificación de la norma ASTM

por Amanda Kaminsky, Marija Krstic, Prasad Rangaraju, Arezki Tagnit-Hamou, y Michael D.A. Thomas

El sector de la construcción está continuamente buscando nuevas fuentes de materiales cementantes suplementarios (MCS) para aumentar el cemento portland, la ceniza volante, la escoria de cemento y el humo de sílice utilizados en las mezclas modernas de concreto. Las amplias investigaciones y pruebas han demostrado que varios tipos de vidrio molido funcionará bien como puzolana en el concreto. Apoyado por esos resultados, el Subcomité ASTM C09.24, de Materiales Cementantes Suplementarios, ha redactado la norma ASTM C1866/C1866M-20, "Especificación estándar para uso de puzolana de vidrio molido en el concreto". La nueva especificación se publicó a principios de este año, después de 3 años y medio de votaciones por el comité. Este artículo proporciona gran parte de la información de fondo y el contexto de la industria que acompañó la votación.

## Motivación

La producción de vidrio es una fuente importante de gases de efecto invernadero. Si bien el reciclado puede reducir el impacto ambiental<sup>1</sup>, en los Estados Unidos se vierten anualmente 8.4 millones de toneladas (7.6 millones de toneladas) de vidrio para envases (casi el triple de la cantidad que se recicla)<sup>2</sup>. Una evaluación preliminar del ciclo de vida de un productor de puzolanas de vidrio molido (PVM) realizada por un tercero<sup>3</sup> indica que el impacto en el potencial de calentamiento global (PCG) para 1 tonelada (0.9 toneladas) de PVM es de 56 kg (123 lb) de CO<sub>2</sub>e. Como comparación, el promedio de PCG de la industria estadounidense para el cemento portland es de 1040 kg (2293 lb) CO<sub>2</sub>e. Por lo tanto, el PCG calculado para una mezcla de concreto en un proyecto reciente de la ciudad de Nueva York con un 50% de sustitución del cemento con PVM sería aproximadamente un 40% menos que el PCG para una mezcla de concreto con cemento solamente.

## Fuentes y Química del Vidrio

- La mayor parte del vidrio producido en el mundo es de uno de los siguientes tipos:
- Vidrio para envases (utilizado en el embalaje): Este material es generalmente vidrio sodocálcico producido en colores sílex (claro), verde, azul o ámbar y formado por la presión del aire en los moldes;

- Vidrio plano (utilizado como acristalamiento en edificios y automóviles): Este material también es generalmente vidrio sodocálcico producido en colores claros o teñidos y formado por la flotación en estaño fundido; o
- Vidrio clase E (usado como refuerzo en polímeros fibroreforzados): Este material es un vidrio de bajo contenido alcalino formado por extrusión a través de un buje para formar filamentos que son rápidamente llevados a un diámetro fino antes de solidificarse.

En la Tabla 1 se sintetiza la química de estos tipos de vidrio y otros materiales puzolánicos o cementantes utilizados en el concreto, y en la Fig. 1 se contextualiza la PVM frente al cemento portland ordinario (CPO) y otros MCS. Aunque la química del vidrio clase E es bastante diferente de la química del vidrio para envases o vidrio plano, se ha demostrado que los tres tipos de vidrio son adecuados para su uso como puzolana en el concreto de cemento portland. Además, debido a los procesos controlados que se utilizan para fabricar estos tipos de vidrio, cada uno tiene una química muy uniforme en todo el mundo, como demuestra la desviación estándar reportada en la Tabla 2 sobre la química del vidrio para envases.

Los miembros del subcomité coincidieron en que las tres fuentes de vidrio listadas en ASTM C1866/C1866M se producen en cantidades suficientes para proporcionar recursos viables para la producción de concreto. El subcomité también coincidió en que el vidrio molido podría utilizarse de forma segura. La producción de vidrio está regulada para limitar el contenido de materiales tóxicos, y los vidrios enumerados en la norma no están incluidos en las listas de desechos peligrosos de la Ley de Conservación y Recuperación de Recursos (RCRA por sus siglas en inglés) de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA).<sup>9</sup> Además, las fuentes de puzolana de vidrio están compuestas de sílice amorfa. A diferencia de la sílice cristalina, no se ha encontrado que la sílice amorfa produzca cáncer en el tejido pulmonar.<sup>10,11</sup> Sin embargo, como con todos los polvos no peligrosos, la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional de los Estados Unidos (OSHA por sus siglas en inglés)

Tabla 1:

Composición típica de tres principales tipos de vidrio y MCS comunes usados en el concreto <sup>4-6</sup>

Compuesto	Composición, peso %							
	Vidrio sodocálcico		Vidrio clase E	Materiales comúnmente especificados				
	Vidrio para envases	Vidrio plano		Ceniza volante		Metacaolín	Cemento con escoria	Humo de sílice
				Tipo F	Tipo C			
SiO <sub>2</sub>	71.0	71.2	59.9	50 to 60	30 to 50	51 to 53	39.4	94.7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.82	0.36	12.5	25 to 35	10 to 25	42 to 44	9.1	0.9
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.61	0.44	0.37	5 to 10	4 to 10	0.52	0.32	1.2
CaO	10.9	9.33	21.4	1 to 12	15 to 30	<0.5	38.7	0.3
MgO	0.94	3.86	2.91	1 to 3	1 to 6	<0.5	11.9	1.8
Na <sub>2</sub> O	13.0	13.2	0.77	0.2 to 1.0	0 to 2	<0.1	0.29	—
K <sub>2</sub> O	0.52	0.04	0.06	1 to 3	0 to 4	<0.5	0.63	—
SO <sub>3</sub>	<0.1	<0.1	<0.1	0.1 to 1.0	1 to 4	<0.5	2	0.5
LOI	<0.5	<0.1	<0.1	0.5 to 5	0 to 3	0.7	<0.01	0.57
Sílice amorfa*	~100	~100	~100	50 to 80	80 to 90	~100	>95	~100

\*Los valores de la sílice amorfa son los porcentajes del contenido total de sílice en el material

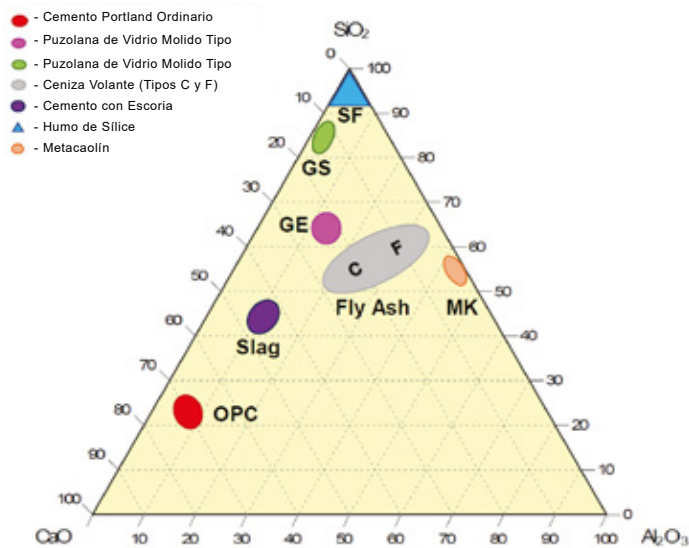


Fig. 1: Gráfica ternaria que contextualiza la PVM frente al CPO y otros MCS (Nota: Para las gráficas ternarias, los valores están en porcentaje de peso, y se normalizan a la suma de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y CaO)<sup>4-8</sup> (figura cortesía de Marija Krstic)

proporciona niveles de exposición permitidos (PEL por sus siglas en inglés) para la sílice amorfa. El PEL (promedio ponderado en 8 horas) para la sílice amorfa es de 20 millones de partículas/pie<sup>3</sup> de aire (mpppc). Como comparación, el PEL para la mica o el polvo de piedra de jabón es también de 20 mpppc, y el PEL para el cemento portland es de 50 mpppc.<sup>12</sup>

## Reservas y Suministro de Vidrio

### Vidrio para envases

Según la EPA, la corriente de desechos sólidos municipales (DSM) de los Estados Unidos contenía 11.4 millones de toneladas (10.3 millones de toneladas) de vidrio en 2017.2 Alrededor del 26%, o 3 millones de toneladas (2.7 millones de toneladas), se recuperaron para ser reciclados y los 8.4 millones de toneladas restantes (7.6 millones de toneladas) fueron enviados a los vertederos.<sup>2</sup> La mayor parte del vidrio de desecho se recoge en contenedores recolectores en la acera en los que se mezcla con otros materiales reciclables como papel, cartón, plásticos y metales.<sup>1</sup> Estos materiales van a instalaciones de recuperación de materiales de flujo simple y doble, donde los compuestos de desechos son triturados y el vidrio es separado a través de cribas. El vidrio de desecho también se recoge en los centros de canje de botellas en los 11 estados de EE. UU. que requieren depósitos para la compra de algunas bebidas.<sup>13</sup> Este vidrio está relativamente limpio y es adecuado para la separación por color de los desechos de vidrio.

Gran parte del vidrio para envases procesado en las instalaciones de recuperación de material se clasifican visualmente, con base en el color, para su venta a los fabricantes de botellas. Sin embargo, alrededor de un tercio del vidrio es más fino que 3/8 de pulgada (9.51 mm), lo que no es económico para la separación visual por color.<sup>1</sup> Algunos de estos vidrios pueden ser adecuados para fundirse nuevamente y fabricar

Tabla 2:

Análisis químico de múltiples muestras de PVM producido de vidrio para envases (cortesía de Urban Mining Northeast)

Componente	Valores constitutivos de PVM producidas en diversos momentos, %						Media	Desviación estándar
	Julio 2018	Sept. 2018	Nov. 2018	Ene, 2019	Mar. 2019	May 2019		
SiO <sub>2</sub>	72.19	70.44	71.16	71.72	70.90	71.24	71.28	0.61
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.72	1.64	1.62	1.64	1.61	1.55	1.63	0.06
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.63	0.65	0.43	0.45	0.58	0.50	0.54	0.09
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	74.54	72.73	73.21	73.81	73.09	73.29	73.45	0.64
CaO	10.72	11.48	11.27	10.99	11.34	11.22	11.17	0.27
MgO	1.44	1.45	1.46	1.46	1.45	1.46	1.45	0.01
Na <sub>2</sub> O	12.49	13.52	13.27	12.96	13.31	13.25	13.13	0.36
K <sub>2</sub> O	0.45	0.47	0.46	0.46	0.47	0.48	0.47	0.01
SO <sub>3</sub>	0.18	0.18	0.16	0.16	0.15	0.13	0.16	0.02

aislamiento de fibra de vidrio. Dado que no es necesario separar el vidrio por colores para su uso como puzolana, se pueden obtener de 1 a 2 millones de toneladas (0.9 a 1.8 millones de toneladas) adicionales de vidrio para ese fin. La cantidad total depende de las futuras tasas de reciclaje de vidrio en las grandes comunidades urbanas. La producción de puzolanas con valor añadido a partir de desechos de vidrio sin duda alterará la percepción negativa del reciclado de vidrio, y las tasas de reciclado deberían aumentar considerablemente. En última instancia, mucho más de 2 millones de toneladas de vidrio para envases podrían estar disponibles para la producción de puzolanas anualmente.

### Vidrio plano

De 1.5 a 2 millones de toneladas (1.4 a 1.8 millones de toneladas) de vidrio plano con forma de moldura de ventana, parabrisas con defecto de fábrica y parabrisas post-consumo y cristales para edificios puede ser reciclado. Muchos edificios existentes son sometidos a adaptaciones energéticas que incluyen la eliminación y reemplazo del cristal que los envuelven. Los principales mercados actuales para el vidrio plano reciclado son las esferas de vidrio utilizadas en la pintura de tráfico y en el mejoramiento de la reología, así como para agregados utilizados de las subrasantes de las carreteras y relleno estructural. Sin embargo, se estima que por lo menos de 400,000 a 500,000 toneladas (360,000 a 450,000 toneladas) estarían disponibles para el mercado de puzolanas de vidrio si se puede simplificar la logística. Cuando es procesado, este vidrio será tan blanco como el cemento blanco y puede ser procesado hasta una pureza del 99.9%.

### Vidrio clase E

Generalmente, el vidrio clase E se recupera de las fábricas de vidrio durante la manufactura de refuerzos de fibra de vidrio. Puede ser procesado a partir de residuos de fibra no utilizados y puede ser molido en un polvo blanco sin restos de fibra. Alrededor de 200,000 toneladas (180,000 toneladas) de este material están disponibles cada año.<sup>5</sup> La empresa Per Vitro Minerals, Inc. (www.vitrominerals.com), ha utilizado ampliamente las

puzolanas de vidrio clase E durante los últimos 10 años como puzolanas para cemento blanco en aplicaciones de concreto decorativo.

### Producción de PVM

#### Limpieza de vidrios

Las principales fuentes de vidrio reciclado son las instalaciones de recuperación de material y los programas de canje de botellas. Una cantidad mucho menor proviene de los desechos de los fabricantes de botellas, los sitios de recolección de vidrio municipales y las comunidades que requieren que los restaurantes y bares reciclen su vidrio. Dependiendo de la fuente del vidrio, se emplean procesos térmicos, húmedos y mecánicos para limpiar el vidrio reciclado para su próximo uso. En los procesos térmicos, la fracción orgánica se quema y los metales se eliminan usando imanes y corrientes parásitas. Si bien los procesos térmicos son eficaces, las autoridades estatales y locales encargadas de conceder los permisos pueden requerir un costoso equipo para el control de la contaminación del aire. Los procesos húmedos también son eficaces, pero deben incluir instalaciones de tratamiento de aguas. Los procesos de limpieza mecánica utilizan la agitación y/o las colisiones partícula-a-partícula para desgastar los compuestos orgánicos del vidrio. Se utilizan una serie de pantallas y chorros de aire (el aire puede calentarse) para separar el vidrio de los componentes que no lo son, y se utilizan imanes para eliminar los metales ferrosos. La limpieza mecánica suele emplearse para reciclar el vidrio para envases.

La botella de bebida promedio tiene una masa de aproximadamente 225 g (8 oz) y una superficie interior de aproximadamente 0.08 m<sup>2</sup> (0.86 pies<sup>2</sup>). Cuando se muele en un polvo para tamizarlo de forma húmeda en una malla 325, las partículas de vidrio resultantes tienen una superficie total de aproximadamente 2 m<sup>2</sup>/g. Eso suma unos 550 m<sup>2</sup>/envase (5.920 pies<sup>2</sup>/envase), por lo que en efecto sólo una partícula de vidrio de unas 5600 partículas habrá estado expuesta al contenido de la botella (generalmente, azúcar). Además, el entorno de molienda altamente abrasivo desgasta la mayor parte de cualquier material de etiquetas o residuos de alimentos, y estos materiales se aspiran en un colector de polvo para su eliminación. Sin embargo, debido



a que es importante limitar la cantidad de materiales orgánicos en cualquier mezcla de concreto, el subcomité de ASTM investigó los efectos de los valores de la pérdida por ignición (LOI) en el polvo de vidrio.

En la práctica, gran parte de la LOI en el vidrio reciclado se debe a los residuos de papel. Para probar el impacto en el concreto del contenido de aire de los orgánicos asociados con la LOI, la Universidad de Sherbrooke preparó y ensayó un total de 37 mezclas de concretos de peso normal con relaciones agua-materiales cementantes (a/mc) de 0.55, un contenido total de materiales cementantes de  $375 \text{ kg/m}^3$  ( $632 \text{ lb/yd}^3$ ), y un revenimiento objetivo de  $175 \pm 25 \text{ mm}$ . Las muestras de PVM con valores de LOI de 0.20 a 2.04 % en masa, fueron utilizadas para reemplazar el 20% (en masa) de cemento ASTM C1157/C1157M Tipo GU. Se produjeron dos mezclas de referencia con cemento 100% Tipo GU. Un diagrama del contenido de aire del concreto fresco (medido según la norma ASTM C231/C231M, "Método de prueba estándar para el contenido de aire del concreto recién mezclado por el método de presión") contra el valor de LOI en la PVM (Fig. 2), muestra que un valor de LOI de 0,5 % en masa o menos, puede dar lugar a un contenido de aire del 2%, lo que es aceptable para concreto sin aire incluido, normalmente especificado para aplicaciones en interiores. El comité decidió exigir al fabricante de PVM que limpiara el polvo de vidrio a un valor de LOI inferior a 0,5 % en peso.

### Molienda de vidrio

La molienda de vidrio a escala comercial requiere un circuito cerrado en el que el dispositivo de molienda alimenta un clasificador de aire que separa el material en dos fracciones: el producto que tiene el tamaño de partícula deseado y el material de mayor tamaño (Fig. 3).

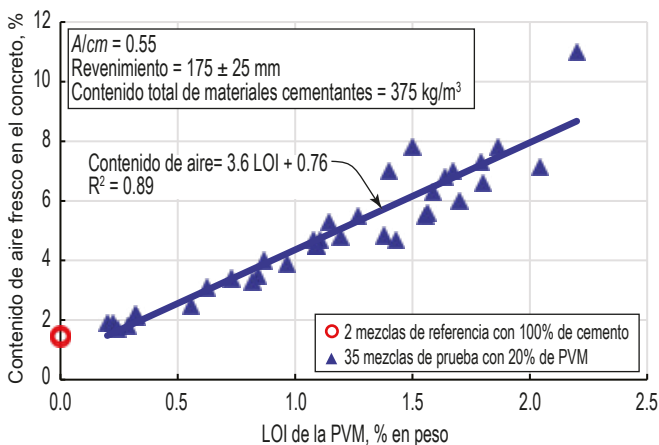


Fig. 2: Contenido de aire fresco versus LOI de la PVM. La puzolana comprende el 20% del total del material cementante de las 35 mezclas de prueba (figura cortesía de Arezki Tagnit-Hamou) (Nota:  $1 \text{ mm} = 0.04 \text{ pulg.}$ ;  $1 \text{ kg/m}^3 = 1.7 \text{ lb/yd}^3$ )

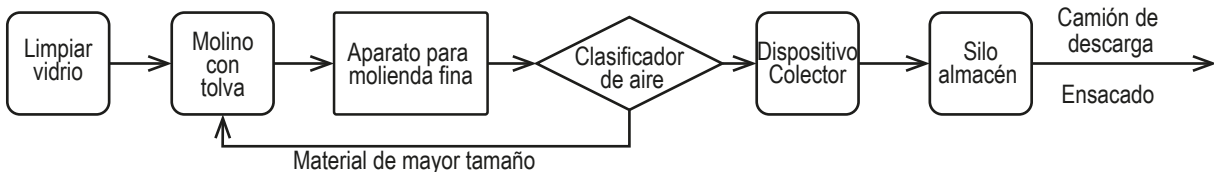


Fig. 3: Visión general del proceso para moler piezas de vidrio limpias y convertirlas en puzolana.

El material de mayor tamaño es transportado de vuelta a la tolva de alimentación del molino. El producto molido según las especificaciones se transporta luego neumáticamente o mediante un tornillo sinfin cerrado a un silo para la carga de camiones a granel o para su ensacado. A menudo se emplea la pre-trituración para reducir el tamaño de las partículas previo al dispositivo de molienda para aumentar el rendimiento.

El límite de finura en ASTM C1866/C1866M se fija en un 5 % de la masa retenida en la malla 325. El requisito de uniformidad de la finura en ASTM C1778, "Guía estándar para reducir el riesgo de reacción alérgica por álcalis en el concreto", establece que las 10 pruebas previas no pueden variar en más del 5%, de modo que todo el material que cumpla el requisito de finura de la norma C1866/C1866M cumplirá el requisito de uniformidad establecido en la norma C1778.

### Mitigación de la RAS utilizando Vidrio Molido

La norma ASTM C1866/C1866M requiere que un mínimo del 95% del polvo de vidrio pase un tamizado húmedo por la malla 325 (las partículas son más pequeñas que 45 micrones). Las investigaciones sugieren que las partículas menores de 300 micras no presentan riesgo alguno de reacción álcali-sílice (RAS).<sup>14,15</sup> Cuando se muele hasta el 95% pasando por un tamiz de 45 micras, hay un riesgo insignificante de que resulten partículas lo suficientemente grandes como para preocuparse por una RAS, sobre todo porque los circuitos de molienda del bucle cerrado deben asegurar que siempre se supere el mínimo del 95%. Sin embargo, los PVM deberán evaluarse de conformidad con la norma ASTM C1778 para determinar la conveniencia para mitigar la RAS. En las secciones siguientes se presentan datos de ensayo de mezclas de concreto con agregados altamente reactivos. No hay datos sobre las puzolanas de vidrio utilizadas con agregados de baja o moderada reactividad. A medida que se disponga de datos, se podrán proponer cambios en la norma ASTM C1778.

### Puzolanas de vidrio contra otras puzolanas industriales

En comparación con otras puzolanas en la industria, las puzolanas de vidrio tienen las siguientes características:

- Menor cantidad disponible: actualmente se dispone de 2 millones de toneladas de vidrio a nivel nacional por año, la mayoría de las cuales se pueden utilizar para fabricar PVM Tipo GS. Conforme mejore la tecnología de procesamiento de vidrio y aumente el costo de los MCS de la competencia, la viabilidad económica de las plantas de procesamiento de PVM llegará a los mercados más pequeños que tengan disponible vidrio reciclable. Esto aumentará su potencial en 2 millones de toneladas;

Tabla 3:

Reactividad y demanda de agua para varias puzolanas

Puzolana	Reemplazo potencial de cemento* †	Reactividad	Demanda de agua
Vidrio para envases	10 a 40	Moderado a alto	Reducción
Vidrio clase E	10 a 30		
Vidrio plano	10 a 40		
Ceniza volante tipo F	10 a 30	Bajo ‡	Reducción
Ceniza volante tipo C	10 a 40	Moderado a alto	Reducción
Puzolana natural †	10 a 20	Bajo a moderado	Aumento moderado a mayor
Cemento de escoria	25 a 50	Moderado	Neutral
Humo de sílice	5 a 8	Alto	Aumento mayor
Metacaolín	5 a 15	Alto	Aumento mayor

\* Estos valores pretenden ayudar a contextualizar el uso de la PVM entre distintos materiales. Estos materiales han sido/son utilizados fuera de estos rangos.

† Bajo a edades tempranas.

‡ Las puzolanas naturales incluyen una amplia gama de materiales con un espectro de propiedades.

- Mayor pureza: Las puzolanas de vidrio, provenientes de las tres categorías identificadas, tendrán una química extremadamente uniforme y estarán libres de cualquier elemento peligroso<sup>5</sup>;
- Amplio abastecimiento: el abastecimiento de puzolanas de vidrio probablemente provenga de plantas regionales más pequeñas en comparación con las grandes centrales eléctricas (cenizas volantes) y las acerías (escoria);
- Reactividad similar: las puzolanas de vidrio tienen una reactividad de moderada a alta, dependiendo de su superficie específica (finura) después de ser procesadas (Tabla 3). El rendimiento de la puzolana de vidrio permite niveles de sustitución del cemento comparables a los de la ceniza volante y escoria<sup>5,14,16-33</sup>;
- Menor demanda de agua: las puzolanas de vidrio tienen una baja demanda de agua, como la ceniza volante (Tabla 3). Esto ayuda a reducir la demanda de aditivos y los factores del cemento en el concreto<sup>5,16-20</sup>;
- Impactos ambientales similares: Como las puzolanas de vidrio se reciclan a partir de corrientes de desechos post-consumo (Tipo GS) o post-industriales (Tipo GE), su utilización en la industria del concreto tendrá beneficios ambientales positivos.<sup>29</sup>

### Contenido de álcalis

Es importante utilizar un cemento con bajo contenido de álcalis (bajo  $Na_2O_{eq}$ ) cuando los agregados reactivos estarán presentes en mezclas sin adiciones de puzolana. El vidrio clase E tiene menos del 1% de contenido de  $Na_2O_{eq}$ ,<sup>5</sup> por lo que sus propiedades puzolánicas dominarán su comportamiento en el concreto. Esta posibilidad se confirmó a partir de estudios realizados en la Universidad de Clemson, mediante ensayos según las normas ASTM C1567, "Método de Prueba Estándar para Determinar el Potencial de Reactividad Álcali-Sílice de las Combinaciones de Materiales Cementantes y Agregados (Método Acelerado de Barras de Mortero)", y la norma ASTM C1293, "Método de Prueba Estándar para la Determinación del Cambio de Longitud del Concreto debido a la Reacción Álcali-sílice", (Fig. 4 y 5),

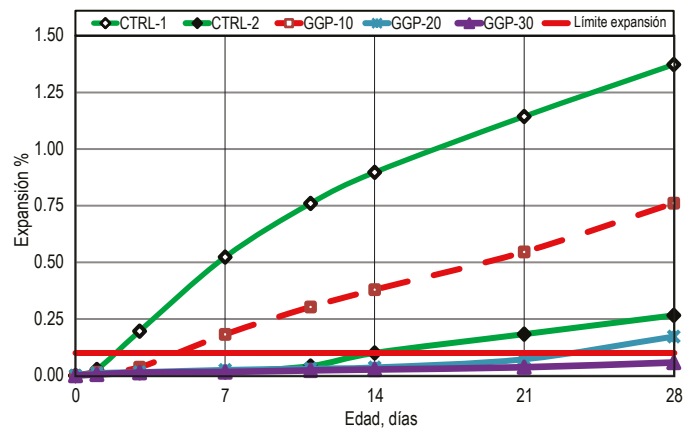


Fig. 4: Expansión acelerada de la barra de mortero según ASTM C1567 para mezclas con 10, 20 y 30% de fibra de vidrio molido (PVM tipo GE) como reemplazo del cemento.<sup>34</sup> Las mezclas CTRL-1 y CTRL-2 comprendían CPO y CPO con un 25% de reemplazo con ceniza volante respectivamente (propiedades de la PVM: LOI = 1% en peso; diámetro medio = 4 micras; SG = 2.60; finura Blaine = 1020 m<sup>2</sup>/kg)

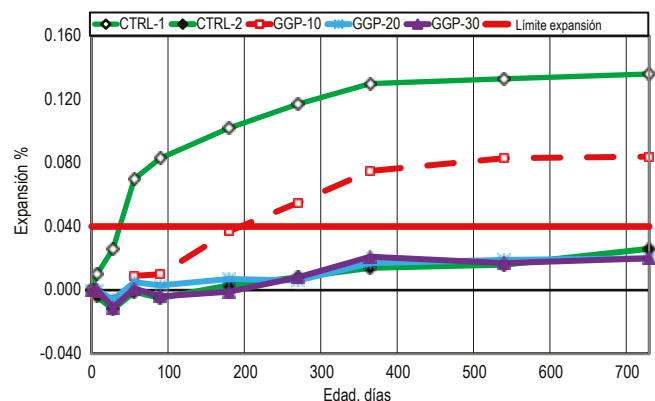


Fig. 5: Expansión del prisma de concreto según ASTM C1293 para mezclas con 10, 20 y 30% de reemplazo de cemento PVM tipo GE.<sup>35</sup> Las mezclas CTRL-1 y CTRL-2 comprendían CPO y CPO con 25% de reemplazo con ceniza volante, respectivamente (propiedades de la PVM: LOI = 1% en peso; diámetro medio = 4 micras; SG = 2,60; finura Blaine = 1020 m<sup>2</sup>/kg)

que muestran las expansiones con el paso del tiempo de mezclas de mortero y concreto que contienen agregado de grava reactiva de Las Placitas y fibra de vidrio molido, un tipo GE de PVM, en varios niveles de reemplazo de cemento.<sup>34,35</sup>

El vidrio sodocálcico tiene un contenido muy alto de Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub> de alrededor del 13.5%. Sin embargo, los datos obtenidos según las pruebas ASTM C1293 utilizando el agregado Spratt, un agregado conocido por su alta reactividad, muestran que el vidrio de soda como puzolana molida también proporciona efectos mitigantes (Fig. 6 y 7). Las pruebas realizadas en la Universidad de Sherbrooke (Fig. 6) muestran que las PVM tipo GS redujeron la expansión en cerca de un 50% de la expansión de la mezcla de control, pero no mantuvieron la expansión por debajo del límite del 0,04% establecido por la norma ASTM C1293. Sin embargo, el límite se alcanzó usando una mezcla ternaria con un 8% de metacaolín. Las pruebas realizadas en la Universidad de New Brunswick (Fig. 7) muestran que con un 20% de cemento en sustitución, el vidrio clase E (PVM Tipo GE) fue efectivo para mantener la expansión del prisma por debajo del límite del 0.04% a los 2 años, mientras que

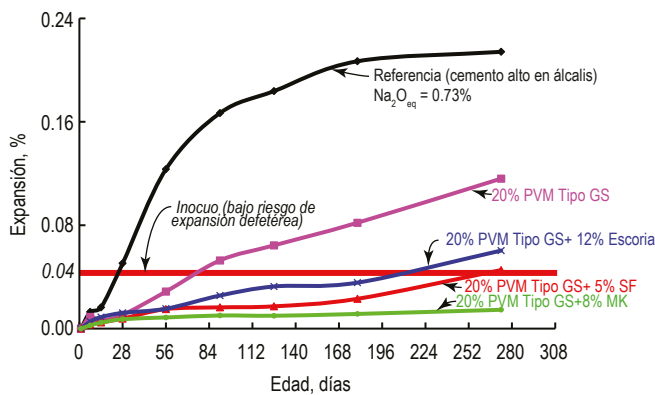


Fig. 6: Expansión del prisma de concreto según ASTM C1293 para mezclas con agregado Spratt, cemento con alto contenido de álcalis y sustitución de cemento con PVM Tipo GS, humo de sílice (SF) y metacaolín (MK) (figura cortesía de Arezki Tagnit-Hamou)

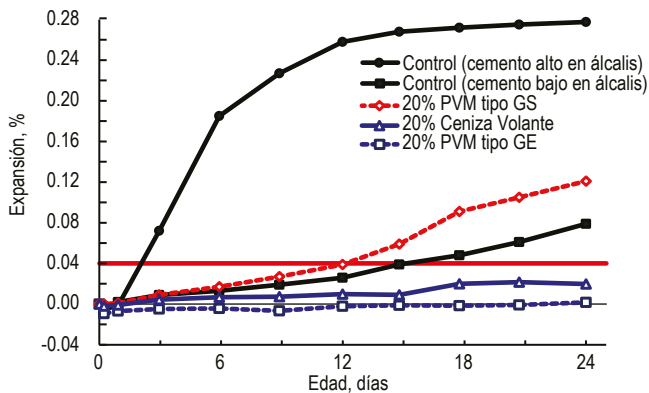


Fig. 7: Expansión del prisma de concreto según ASTM C1293 para mezclas con agregado Spratt, cemento de alto o bajo contenido de álcali, y reemplazo de cemento con PVM Tipo GS, PVM Tipo GE, o ceniza volante (figura cortesía de Michael D.A. Thomas)

el PVM Tipo GS obtenido del vidrio plano redujo la expansión en comparación con el cemento de control altamente alcalino (0.91% Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub>) pero superó el 0.1% y fue mayor que una mezcla de control con cemento poco alcalino (0,46% Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub>).

## Resistencia a los Sulfatos

Los resultados de dos estudios para evaluar la resistencia a los sulfatos según ASTM C1012/C1012M, "Método de prueba Estándar para el Cambio de Longitud de Morteros de Cemento Hidráulico Expuestos a una Solución de Sulfato", se muestran en las Fig. 8 y 9. El primero de estos estudios (Fig. 8) evaluó el uso de puzolanas de tipo GE y GS. Como se muestra en la Fig. 8(a), el vidrio clase E (Tipo GE) en niveles de sustitución de cemento del 10 y el 20% redujo la expansión de un concreto de cemento portland con alto contenido de C<sub>3</sub>A (expansión de la mezcla de control del 0.459% a los 6 meses) por debajo de los límites de expansión especificados para el cemento tipo HS según ASTM C1157/C1157M (0.05% a los 6 meses y 0.10% al año), cuando se mezcló con un cemento portland con alto contenido de C<sub>3</sub>A. Los datos también

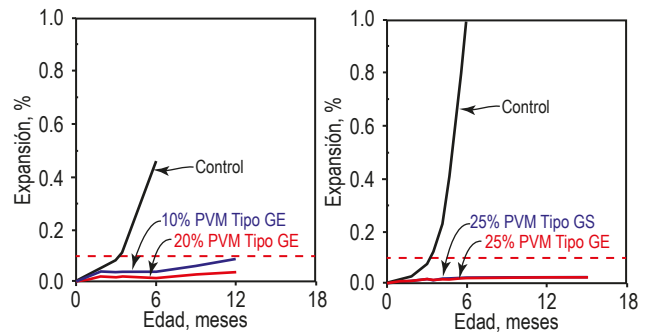


Fig. 8: Expansión según ASTM C1012/C1012M para mezclas de concreto con cemento portland con alto contenido de C<sub>3</sub>A: a) 10 y 20% de vidrio clase E (Tipo GE); y b) 25% de puzolana Tipo GS y GE (figura cortesía de Michael D.A. Thomas)

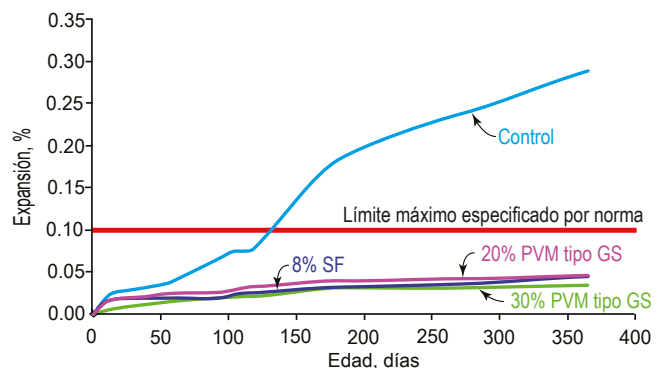


Fig. 9: Expansión según ASTM C1012/C1012M para mezclas con 20 y 30% de sustitución de cemento con vidrio molido Tipo GS (figura cortesía de Michael D.A. Thomas)

muestran en la Fig. 8(b) que la expansión de las barras de mortero con un 25% de sustitución de cemento con puzolana ya sea tipo GS o tipo GE se redujo a niveles aceptables (de nuevo, cumpliendo los límites para el cemento tipo HS) cuando se mezcló con un cemento con alto contenido de  $C_3A$  (expansión de la mezcla de control del 0.99% a los 6 meses).

El segundo estudio formaba parte de un estudio más amplio sobre el uso de las puzolanas en el concreto (Fig. 9). Se estudiaron mezclas de concreto que contenían 20 y 30% de sustituciones de cemento con vidrio molido tipo GS, comparándolas con una mezcla de concreto de control. La expansión causada por el ataque de sulfatos muestra que el concreto de control excede el límite de expansión de 0.10% recomendado por ASTM C1157/C1157M desde los 130 días hasta alcanzar el 0.15% después de 6 meses. Las mezclas que incorporan el 20 o el 30% de PVM tipo GS tienen expansiones muy bajas, muy por debajo del límite prescrito por la norma. Estas expansiones son del mismo orden que las del cemento tipo GUSF (cemento de uso general que contiene alrededor del 8% de humo de sílice), que tiene una fuerte resistencia al ataque de los sulfatos.

### Permeabilidad al cloruro

Las mezclas de concreto que contienen PVM fueron evaluadas de acuerdo con la norma ASTM C1202, "Método de prueba estándar para la indicación eléctrica de la capacidad del concreto para resistir la penetración de iones cloruro". En un estudio, se probaron durante 90 días 16 mezclas de concreto que contenían cemento portland y PVM tipo GS a niveles de reemplazo de cemento del 20 y 30%.

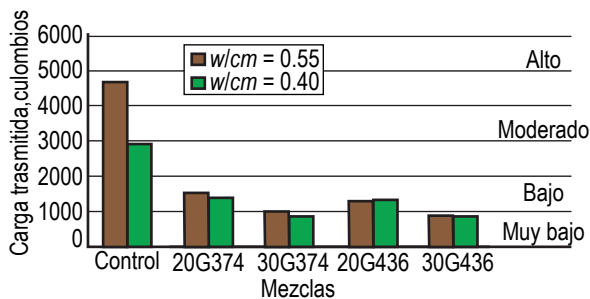


Fig. 10: Carga total transmitida según ASTM C1202 para mezclas de concreto con Tipo GS GGP a 20 y 30% de reemplazo de cemento después de 90 días de curado<sup>16</sup>

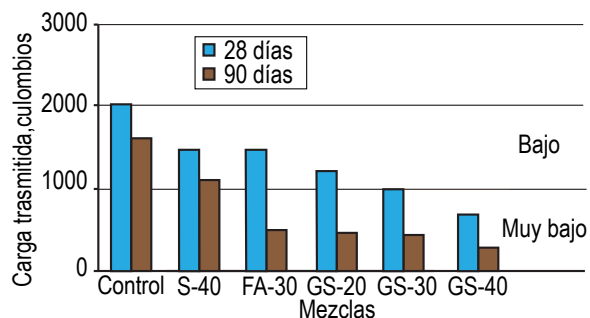


Fig. 11: Carga total transmitida según ASTM C1202 para mezclas de concreto con varios niveles de reemplazo de cemento con PVM Tipo GS después de 28 y 90 días de curado<sup>36</sup>

Las mezclas de concreto de control incluían sólo cemento. Las mezclas se prepararon con una relación a/cm de 0.55 o 0.40, y la PVM tenía una superficie Blaine de 374 o 436  $m^2/kg$ . Como se muestra en la Fig. 10, la carga total transmitida fue baja para todas las mezclas con PVM. El mejor rendimiento se obtuvo para las mezclas con un 30% de cemento en sustitución.

En otro estudio<sup>36</sup>, se prepararon mezclas de concreto usando cemento portland Tipo I/II (según ASTM C150/C150M, "Especificación estándar para el cemento portland") y PVM Tipo GS (con  $d_{50} = 10 \mu m$ ) a niveles de reemplazo de cemento de 20, 30 y 40% (GS-20, GS-30 y GS-40). Todas las mezclas se prepararon con una relación a/cm de 0.40. Además de una mezcla de control con 100% de cemento portland (Control1), se preparó una mezcla de cemento portland con 40% en sustitución con cemento de escoria (S-40) y una segunda mezcla de cemento portland con 30% en sustitución con ceniza volante clase F (FA-30). Tal como se muestra en la Fig. 11, todas las mezclas de concreto con PVM Tipo GS como reemplazo parcial del cemento exhibieron valores de carga transmitida muy bajos a los 90 días. Todas las mezclas con PVM también tuvieron un mejor rendimiento que la mezcla de control o las mezclas con cemento de escoria o ceniza volante.

### Aplicaciones de campo conocidas

No se puede esperar el uso a escala industrial de nuevos materiales cementantes alternativos en el entorno constructivo sin una validación de campo mediante la exposición a largo plazo a condiciones y cargas ambientales realistas. En los últimos 15 años se han realizado muchas aplicaciones en campo de mezclas de cemento con PVM. La PVM tipo GE se ha utilizado ampliamente durante los últimos 15 años como puzolana para el cemento blanco en aplicaciones de concreto decorativo como piscinas, concreto prefabricado arquitectónico y concreto reforzado con fibra de vidrio (GFRG). La PVM tipo GS se ha utilizado como un reemplazo parcial del cemento durante los últimos 10 años en aplicaciones tales como unidades de albañilería de concreto, pavimentos, concreto prefabricado y aceras. La ciudad de Montreal, QC, Canadá, comenzó a probar la PVM tipo GS como sustituto del cemento en las aceras en 2010, en colaboración con la Universidad de Sherbrooke.

El Departamento de Diseño y Construcción de la Ciudad de Nueva York (NYC DDC), en colaboración con el City College de Nueva York, también comenzó a evaluar la PVM Tipo GS en las aceras, a partir de 2016.<sup>37</sup> Ahora, la PVM está incluida en las especificaciones de concreto del NYC DDC. En la ciudad de Nueva York, desde 2016 y hasta la fecha, con la colaboración de la US Concrete, se han probado y colocado muchas mezclas de concreto estructural con contenido de PVM Tipo GS en proyectos de construcción de rascacielos. Estas mezclas han incluido entre un 35 y un 40% de PVM tipo GS en sustitución del cemento. Se están planeando colocar más estructuras en edificios altos en la ciudad de Nueva York, NY, y Filadelfia, PA, EE. UU., utilizando también PVM tipo GS, en mezclas con hasta un 50% de cemento en sustitución. Algunas de estas mezclas también incluirán cemento de escoria.





Fig. 12: Uno de los dos puentes que se están construyendo en Montreal, compuesto de concreto con 10% de cemento en sustitución con PVM Tipo GS. Los puentes serán instrumentados y supervisados a detalle por la Universidad de Sherbrooke y el Ayuntamiento de Montreal (foto cortesía del Ayuntamiento de Montreal)

Por último, se están construyendo dos puentes en la Île-des-Soeurs, Montréal, QC, Canadá (Fig. 12). Los puentes de concreto se están produciendo con un 10% del cemento por PVM Tipo GS, ahorrando alrededor de 40 toneladas (44 toneladas) de cemento.

## Reconocimientos

Agradecemos al personal y a los miembros votantes de la ASTM por sus aportaciones. También agradecemos a Boyd Clark, Julio Dávalos, Louis Grasso, Dale Hauke, Doug Hooton, Joe Keating, Ahmed Omran, y Larry Sutter por su contribución en este artículo.

## Referencias

1. "Glass Recycling Facts," Glass Packaging Institute, Arlington, VA, [www.gpi.org/glass-recycling-facts](http://www.gpi.org/glass-recycling-facts). Accessed Oct. 5, 2020.
2. "Advancing Sustainable Materials Management, 2017 Fact Sheet," United States Environmental Protection Agency, Washington, DC, Nov. 2019, [www.epa.gov/sites/production/files/2019-11/documents/2017\\_facts\\_and\\_figures\\_fact\\_sheet\\_final.pdf](http://www.epa.gov/sites/production/files/2019-11/documents/2017_facts_and_figures_fact_sheet_final.pdf).
3. "Pozzotive® Screening LCA – Pre-Production," Climate Earth, 2020, [www.pozzotive.com/wp-content/uploads/2020/06/Pozzotive-LCASummary.pdf](http://www.pozzotive.com/wp-content/uploads/2020/06/Pozzotive-LCASummary.pdf).
4. "Global Glass Fibre Production: Changes Across the Board," JEC Group, Feb. 21, 2011, [www.jeccomposites.com/knowledge/international-composites-news/global-glass-fibre-production-changes-across-board](http://www.jeccomposites.com/knowledge/international-composites-news/global-glass-fibre-production-changes-across-board).
5. Hemmings, R., "Process for Converting Waste Glass Fiber into Value-Added Products," Report No. DE-FG36-03GO13015, Albacem LLC, Peoria, IL, Dec. 2005, 36 pp.
6. Snellings, R.; Mertens, G.; and Else, J., "Supplementary Cementitious Materials," *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, V. 74, No. 1, Jan. 2012, pp. 211-278.
7. Duan, P.; Shui, Z.; Chen, W.; and Shen, C., "Effects of Metakaolin, Silica Fume and Slag on Pore Structure, Interfacial Transition Zone and Compressive Strength of Concrete," *Construction and Building Materials*, V. 44, July 2013, pp. 1-6.
8. Poon, C.S.; Kou, S.C.; Lam, L., "Compressive Strength, Chloride Diffusivity and Pore Structure of High Performance Metakaolin and Silica Fume Concrete," *Construction and Building Materials*, V. 20, No. 10, Dec. 2006, pp. 858-865.
9. "Defining Hazardous Waste: Listed, Characteristic and Mixed Radiological Wastes," United States Environmental Protection Agency, Washington, DC, [www.epa.gov/hw/defining-hazardous-waste-listed-characteristic-and-mixed-radiological-wastes#listed](http://www.epa.gov/hw/defining-hazardous-waste-listed-characteristic-and-mixed-radiological-wastes#listed). Accessed Oct. 5, 2020.
10. Maier, M., "Amorphous Silica in Working Environments, A Toxicological Overview," *Proceedings of International Conference on Silica Science and Technology: Silica 2001*, Mulhouse, France, Sept. 3-6, 2001.
11. "Fact Sheet: Silica, Amorphous and Other Non-Crystalline Forms," Texas Commission on Environmental Quality (TCEQ), June 2011, 2 pp., [www.tceq.texas.gov/assets/public/implementation/tox/dsd/facts/amorphous\\_silica.pdf](http://www.tceq.texas.gov/assets/public/implementation/tox/dsd/facts/amorphous_silica.pdf).
12. "Table Z-3 Mineral Dust," OSHA Standard 1910.1000 – Air Contaminants, Occupational Safety & Health Administration, Washington, DC, [www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.1000TABLEZ3](http://www.osha.gov/laws-regs/regulations/standardnumber/1910/1910.1000TABLEZ3). Accessed Oct. 5, 2020.
13. "Bottle Bill Resource Guide," Container Recycling Institute, Culvert City, CA, [www.bottlebill.org](http://www.bottlebill.org). Accessed Oct. 5, 2020.
14. Idir, R.; Cyr, M.; and Tagnit-Hamou, A., "Use of Fine Glass as ASR Inhibitor in Glass Aggregate Mortars," *Construction and Building Materials*, V. 24, No. 7, July 2010, pp. 1309-1312.
15. Liu, S.; Wang, S.; Tang, W.; Hu, N.; and Wei, J., "Inhibitory Effect of Waste Glass Powder on ASR Expansion Induced by Waste Glass Aggregate," *Materials*, V. 8, No. 10, Oct. 2015, pp. 6849-6862.
16. Zidol, A., "Optimization of the Fineness of Glass Powder in Binary Cementitious Systems," MS thesis, University of Sherbrooke, Sherbrooke, QC, Canada, 2009, 168 pp.

18. Zidol, A.; Tognonvi, M.; and Tagnit-Hamou, A., "Advances in Durable Concrete Materials Applied to the African Context," International Conference on Advances in Cement and Concrete Technology in Africa (ACCTA), Johannesburg, South Africa, Jan. 28-30, 2013.
19. Tagnit-Hamou, A., and Bengougam, A., "The Use of Glass Powder as Supplementary Cementitious Material," *Concrete International*, V. 34, No. 3, Mar. 2012, pp. 56-61.
20. Hussein Abdalla, A.; Yahia, A.; and Tagnit-Hamou, A., "Statistical Modeling of Mechanical and Transport Properties of Concrete Incorporating Glass Powder," *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, July 21, 2020, published online.
21. Nassar, R.-U.-D., and Soroushian, P., "Strength and Durability of Recycled Aggregate Concrete Containing Milled Glass as Partial Replacement for Cement," *Construction and Building Materials*, V. 29, Apr. 2012, pp. 368-377.
22. Schwarz, N.; Cam, H.; and Neithalath, N., "Influence of a Fine Glass Powder on the Durability Characteristics of Concrete and Its Comparison to Fly Ash," *Cement and Concrete Composites*, V. 30, No. 6, July 2008, pp. 486-496.
23. Shayan, A., and Xu, A., "Performance of Glass Powder as a Pozzolanic Material in Concrete: A Field Trial on Concrete Slabs," *Cement and Concrete Research*, V. 36, No. 3, Mar. 2006, pp. 457-468.
24. Nassar, R.-U.-D., and Soroushian, P., "Field Investigation of Concrete Incorporating Milled Waste Glass," *Journal of Solid Waste Technology and Management*, V. 37, No. 4, Nov. 2011, pp. 307-319.
25. Torres-Carrasco, M.; Tognonvi, M.T.; Tagnit-Hamou, A.; and Puertas, F., "Durability of Alkali-Activated Slag Concrete Prepared Using Waste Glass as Alternative Activator," *ACI Materials Journal*, V. 112, No. 6, Nov.-Dec. 2015, pp. 791-800.
26. Harbec, D.; Tagnit-Hamou, A.; and Gitzhofer, F., "Waste-Glass Fume Synthesized Using Plasma Spheroidization Technology: Reactivity in Cement Pastes and Mortars," *Construction and Building Materials*, V. 107, Mar. 2016, pp. 272-286.
27. Niang, A.; Roy, N.; and Tagnit-Hamou, A., "Structural Behavior of Concrete Incorporating Glass Powder Used in Reinforced Concrete Columns," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, V. 141, No. 3, Mar. 2015, 10 pp.
28. Soliman, N.A.; Omran, A.F.; and Tagnit-Hamou, A., "Laboratory Characterization and Field Application of Novel Ultra-High-Performance Glass Concrete," *ACI Materials Journal*, V. 113, No. 3, May-June 2016, pp. 307-316.
29. Soliman, N.A., and Tagnit-Hamou, A., "Development of Ultra-High-Performance Concrete Using Glass Powder—Towards Ecofriendly Concrete," *Construction and Building Materials*, V. 125, Oct. 2016, pp. 600-612.
30. Pavoiné, A.; Harbec, D.; Chaussadent, T.; Tagnit-Hamou, A.; and Divet, L., "Impact of Alternative Cementitious Material on Mechanical and Transfer Properties of Concrete," *ACI Materials Journal*, V. 111, No. 3, May-June 2014, pp. 251-262.
31. Tognonvi, M.T.; Zidol, A.; Aitcin, C.-P.; and Tagnit-Hamou, A., "Aging of Glass Powder Surface," *Journal of Non-Crystalline Solids*, V. 427, Nov. 2015, pp. 175-183.
32. Idir, R.; Cyr, M.; and Tagnit-Hamou, A., "Use of Fine Glass as ASR Inhibitor in Glass Aggregate Mortars," *Construction and Building Materials*, V. 24, No. 7, July 2010, pp. 1309-1312.
33. Idir, R.; Cyr, M.; and Tagnit-Hamou, A., "Pozzolanic Properties of Fine and Coarse Color-Mixed Glass Cullet," *Concrete and Cement Composite*, V. 33, No. 1, Jan. 2011, pp. 19-29.
34. Rashidian-Dezfouli, H., and Rangaraju, P.R., "Role of Ground-Glass Fiber as a Pozzolan in Portland Cement Concrete," *Transportation Research Record*, V. 2629, No. 1, Jan. 2017, pp. 33-41.
35. Rashidian-Dezfouli, H., and Rangaraju, P.R., "Evaluation of Selected Durability Properties of Portland Cement Concretes Containing Ground Glass Fiber as a Pozzolan," *Transportation Research Record*, V. 2672, No. 27, May 2018, pp. 88-98.
36. Krstic, M., and Davalos, J.F., "Macro- and Micro-Structure Evaluations of Recycled Post-consumer Glass Cementitious Material for Concrete," *Proceedings of SynerCrete' 18: International Conference on Interdisciplinary Approaches for Cement-Based Materials and Structural Concrete*, Funchal, Madeira Island, Portugal, Oct. 2018, pp. 261-266. [www.synercrete.com/wp-content/uploads/2018/10/SynerCrete18\\_Proceedings.pdf](http://www.synercrete.com/wp-content/uploads/2018/10/SynerCrete18_Proceedings.pdf).
37. Krstic, M., and Davalos, J.F., "Field Application of Recycled Glass Pozzolan for Concrete," *ACI Materials Journal*, V. 116, No. 4, July 2019, pp. 123-131.

Nota: Se puede encontrar información adicional sobre las normas de ASTM discutidas en este artículo en [www.astm.org](http://www.astm.org).

Seleccionado por los editores para el interés de los lectores.



La miembro de la ACI **Amanda Kaminsky** es fundadora y directora de Building Product Ecosystems LLC, Nueva York, NY, EE. UU. Forma parte del Comité ACI 240, Puzolanas. También es miembro de los Comités ASTM C09, Concreto, y C11, Yeso, y es el Contacto Técnico para el Comité ASTM C1866. Obtuvo su licenciatura en arquitectura en la Universidad de Virginia, en Charlottesville, VA, EE. UU



La miembro de la ACI **Marija Krstic** es investigadora de posdoctorado y profesora adjunta de ingeniería civil en el City College de Nueva York (CCNY), ciudad de Nueva York, NY, EE. UU. Recibió su licenciatura y maestría de la Universidad de Nis, Nis, Serbia, y su segunda maestría en ingeniería civil y doctorado en ingeniería estructural y materiales por parte del CCNY.



**Prasad Rangaraju**, FACI, es profesor de ingeniería civil en la Universidad de Clemson, Clemson, SC, USA. Es miembro de varios comités técnicos de ACI y ASTM International. Rangaraju obtuvo su doctorado en ingeniería civil en la Universidad de Purdue, West Lafayette, IN, USA. Es un ingeniero profesional licenciado en Minnesota.



**Arezki Tagnit-Hamou**, FACI, es profesor de ingeniería civil y director del Centro de Investigación de Infraestructuras de Concreto de la Universidad de Sherbrooke, Sherbrooke, QC, Canadá. Es miembro del Comité 130 del ACI, Sostenibilidad del Concreto, y de los Subcomités del ACI 130-D, Sistemas de Clasificación/Herramientas de Sostenibilidad, y 239-D, Materiales y Métodos de Construcción con UHPC (Concreto de Ultra Alto Comportamiento). También participa activamente en la RILEM y en la Asociación Canadiense de Normas. Tagnit-Hamou recibió en 2011 el Premio ACI Jean-Claude Roumain de Innovación en el Concreto.



**Michael D.A. Thomas**, FACI, es profesor de ingeniería civil en la Universidad de New Brunswick, Fredericton, NB, Canadá. Es miembro de los Comités ACI 201, Durabilidad del Concreto; 221, Agregados; 232, Ceniza volante en el concreto; 233, Escoria molida en el concreto; 234, Humo de sílice en el concreto; 236, Ciencia de los materiales del concreto; 240, Puzolanas; y 365, Predicción de la vida útil. Sus intereses de investigación incluyen la durabilidad de las estructuras de concreto reforzado.

**La traducción de este artículo correspondió a la Sección Noreste de México.**

*Título: Uso del vidrio molido como puzolana en el concreto.*



Traductor: Lic. Iliana M Garza Gutiérrez



Revisor técnico: Dr. Jorge M. Rivera Torres