

A Simplified Approach to Determine Pozzolanic Reactivity of Commercial Supplementary Cementitious Materials

What is SCM reactivity and why quantify it?

by Keshav Bharadwaj, O. Burkan Isgor, and W. Jason Weiss

A large portion of the concrete produced in the United States contains some amount of supplementary cementitious materials (SCMs).¹ SCMs can reduce the carbon footprint of concrete by replacing a portion of the cement. Additionally, SCMs can improve durability by reducing permeability^{2,3} or mitigating deleterious reactions, like alkali-silica reactions. SCMs have a wide range of chemical compositions and reactive phases (the fraction of the SCM that can react chemically), which affect the performance of concrete. The reactivity of an SCM influences the porosity, strength, and transport properties of concrete made with the SCM⁴⁻⁶ and differentiates SCMs from typical inert (unreactive) fillers used in concrete. While the chemical compositions of conventional SCMs that can be used in concrete are relatively well-defined in standard specifications,⁷⁻¹¹ there is a lack of a robust approach to quantify the fraction of the SCM that can react.

Pozzolanic Reactivity Test and ASTM C1897

Test methods have recently been developed to assess the performance of SCMs. Two of the more common tests that have emerged with growing use include: ASTM C1897¹² (R3 test) and the pozzolanic reactivity test (PRT).¹³ While similar in concept, ASTM C1897 assesses pozzolanic reactions of the SCM as well as reactions of limestone and sulfate additions, while the PRT focuses only on the pozzolanic reactions (sulfate and limestone reactions are not considered). Furthermore, unlike the R3 test, the PRT provides numerical value for the pozzolanic reactivity. Previous studies have outlined the similarities and differences

in the reaction products that can form between these tests.¹³ This article describes how the PRT can be simplified to enable the maximum degree of reactivity (DOR*) to be determined using only isothermal calorimetry (IC). This approach will save producers time and will enable more widespread use.

The PRT measures the DOR* that can be expected for an SCM.^{4,5,13-22} The PRT consists of mixing an SCM with calcium hydroxide (CH) (CH to SCM ratio of 3:1 by mass) in an alkaline solution (0.5N KOH; liquid: CH + SCM = 0.90 by mass). The test is performed at a temperature of 50°C for 10 days to achieve a relatively high degree of reaction in a short period. The PRT requires that both the heat released (Q) and the CH consumed are measured. The Q is measured using an isothermal calorimeter on a 7 g sample. The CH consumed is measured using thermogravimetric analysis (TGA) using a sample that is approximately 20 mg (taken from the IC ampule containing the reacted SCM + CH paste after measuring Q). More information on measuring the CH content in pastes using TGA is provided in Reference 23.

These tests require small volumes of material. The PRT procedure uses 40 g of the SCM that is mixed with 120 g of CH and 144 g of 0.5M KOH solution.¹⁸ Approximately 7 g of paste is sealed in a glass ampule and loaded into the isothermal calorimeter after mixing. After 10 days of reaction, approximately 20 mg of reacted paste is loaded onto the platinum crucible of the TGA machine and the mass fraction of CH remaining in the paste is calculated.

The approach proposed in this article removes the need for TGA testing and enables DOR* to be determined using only the Q. This dramatically reduces labor and increases the

Isothermal Calorimetry

Cementitious materials undergo an exothermic reaction which means they release heat when they react hydraulically or pozzolanically. IC is a technique to measure this heat release as a function of time. By measuring heat flow, the stages and extent of reaction can be tracked. For example, Fig. A illustrates the rate of heat release dQ/dt indicating the common stages of cement hydration (note, this figure represents a paste made with water and cement). Figure B illustrates typical results of the cumulative heat (integral of the rate of heat as a function of time). In the PRT method, the total heat release or the total rate of reaction is determined. While this may be thought of as the heat at a very late time (10 days at 50°C), procedures are generally used to extrapolate this infinite time as shown in Fig. B.

Isothermal calorimeters are increasingly becoming common in laboratories in the United States. University and research laboratories, as well as cement and large concrete producers^{12,21,22,24,25} are using IC to quantify various aspects of cement hydration, SCM reactions, and impacts of admixture dosage. This method is also being used for quality control.

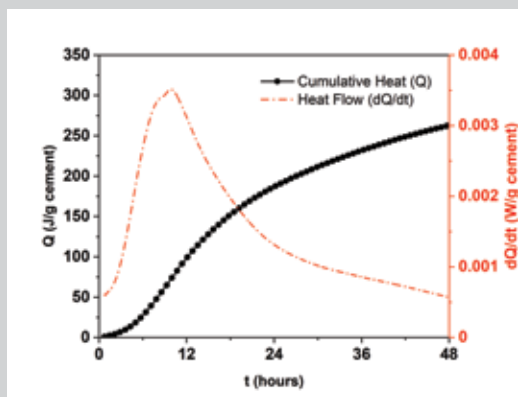


Fig. A: Plot of cumulative heat released as a function of time for the hydration of ordinary Portland cement (OPC)

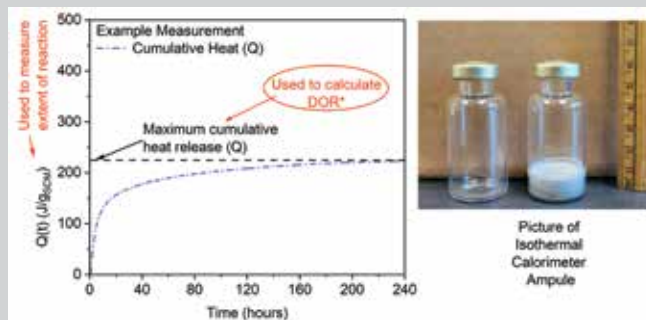
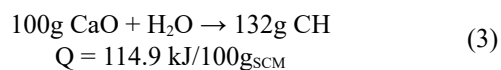
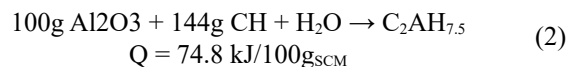
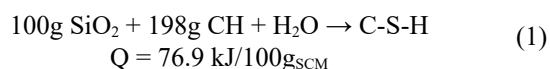


Fig. B: Cumulative heat released (Q) as a function of time for the PRT with an SCM reaction and a picture of IC ampules with and without samples

potential for this method to be used in a wider range of commercial testing and production laboratories as TGA analysis is no longer needed. While IC has been gaining adoption through standards like ASTM C1897 and ASTM C1679,²⁴ some readers may not be familiar with this test method, therefore, the use of this technique in the PRT is explained in the text box.

The major reactive components of SCMs (SiO_2 , Al_2O_3 , and CaO) participate in the chemical reactions shown in Eq. (1) through (3). The minor components of SCMs (Fe_2O_3 , MgO , Na_2O , K_2O , and others) are not discussed in this article, but are discussed in Reference 13. Equation (1) describes the silica reaction, Eq. (2) describes the alumina reaction, and Eq. (3) describes the calcium reaction. In the PRT, SiO_2 and Al_2O_3 react pozzolanically to form calcium-silicate-hydrate (C-S-H) and calcium-aluminate-hydrate ($\text{C}_2\text{AH}_{7.5}$), respectively. The CaO reaction is more complex as it reacts hydraulically to produce CH and/or provides calcium to react with the SiO_2 and Al_2O_3 in the SCM. All three reactions release heat (Q) and consume, or, in the case of Eq. (3), produce CH.



The reactions of 100% SiO_2 and 100% Al_2O_3 (Eq. (1) and (2)) provide the theoretical values of Q and CH consumed at different values of DOR* for each of the pure compounds.¹³ For example, 100% DOR* for the theoretical Al_2O_3 reaction corresponds to 144 g of CH consumption and 74.8 kJ of heat generation for every 100 g of Al_2O_3 consumed in the pozzolanic reaction. Similarly, 100% DOR* for the theoretical SiO_2 reaction corresponds to 198 g of CH consumption and 76.9 kJ of heat generation for every 100 g of SiO_2 consumed in the pozzolanic reaction. The theoretical values for other DOR*s (80, 60, 40, and 20%) are calculated as the corresponding percentage of the CH consumed and heat generated at 100% reactivity. The two lines in Fig. 1 serve as reference values of Q and CH consumed for the pozzolanic reaction of SiO_2 and Al_2O_3 . The DOR* of the SCM can be measured by interpolating between the two reference lines, as shown in Fig. 2.

Simplifying PRT for Commercial SCMs

Figure 2 shows the chemical compositions of the commercial SCMs typically used in concrete production in the United States.^{12,21,22,24-30} Three broad classifications of SCMs are marked in this plot as regions bounded by lines based on their chemistry: siliceous materials ($\text{SiO}_2/(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3) > 70\%$

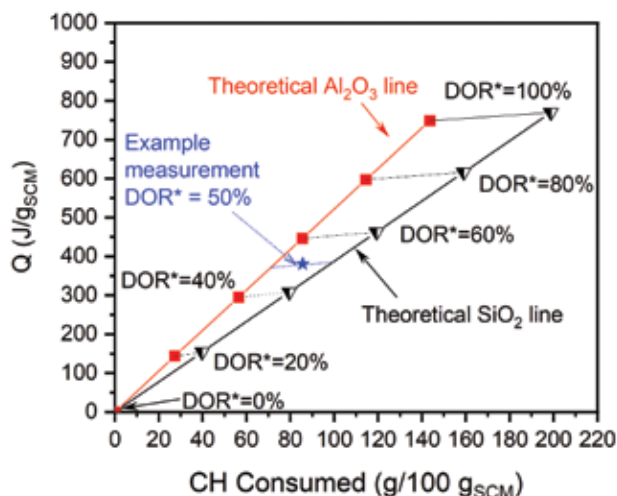


Fig. 1: Determination of the DOR* of an SCM using the PRT. The example measurement (blue star) demonstrates the quantification of DOR* from experimental measurements. For more information on how the theoretical SiO_2 and Al_2O_3 are obtained, refer to Reference 13

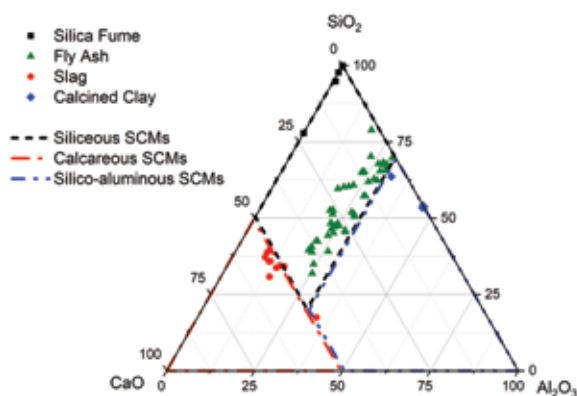


Fig. 2: A plot of the measured chemical composition of several commercial SCMs

and $\text{CaO} < 50\%$; for example, silica fume and fly ash), calcareous materials ($\text{CaO} > 50\%$; for example, slag cement), and silico-aluminous materials ($\text{SiO}_2/(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3) < 70\%$ and $\text{CaO} < 50\%$; for example, calcined clay and metakaolin).

A well-defined Q-CH relationship exists for a given type of SCM. Figure 3 illustrates the Q-CH relationships as obtained through thermodynamic modeling (shaded areas) and experimental analysis (symbols) for typical commercial silica fume, fly ash, slag cement, and calcined clay that meet the corresponding standard specifications.⁷⁻¹¹ All possible compositions of SiO_2 , Al_2O_3 , and CaO for each SCM type are considered in the calculations. As such, any combination of $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}$ that belongs to an SCM type would fall within the shaded region that provides bounds (two solid lines) for the Q and CH consumed. The regions also contain lines running across indicating the DOR* of the SCM from 0 to 100% at 20% intervals (similar to what is seen in Fig. 1).

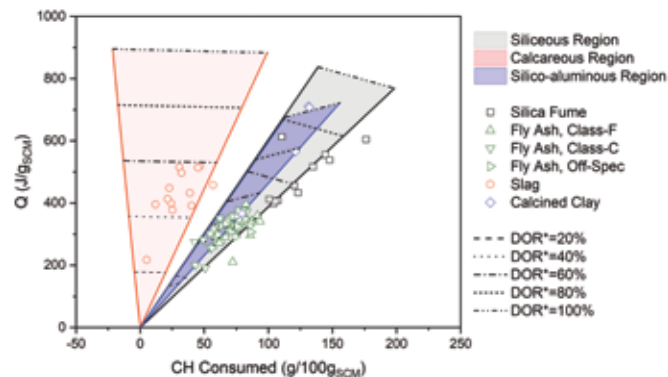


Fig. 3: Heat released versus CH consumed for typical commercial SCMs

The DOR* of the SCM can be read more accurately from the plot (with interpolation), when the experimentally measured Q and CH consumed are added to the plot.

It can be noticed that each of the SCMs occupies relatively narrow regions in the Q-CH space depending on their chemistry:

- Siliceous SCMs (silica fume and fly ash) occupy the gray-shaded region in the Q-CH space;
- Calcareous SCMs (slag cement) occupy the red-shaded region which is closer to the y-axis in the Q-CH space. This is due to the formation of CH from hydraulic reactions in calcareous systems (Eq. (3)); and
- Silico-aluminous SCMs (calcined clay) occupy the blue-shaded region within the gray-shaded siliceous region, but their range is narrower, and the Q and CH consumed for a given DOR* are lower than for siliceous SCMs.

Figure 3 can be used to calculate the DOR* of an SCM in practice as the chemical composition of the SCM is known and can be considered in the calculations.

The range of values of Q and CH consumed for different SCM types are compared with results from Fig. 3 for DOR* values of 25, 50, 75, and 100%. The range of heat release values for a given type of SCMs is quite narrow; the mean Q is within 4% of the highest/lowest value.

Estimating Reactivity of Commercial SCMs

Based on the observation that different classes of SCMs occupy a narrow region in the Q-CH space, a practical simplification to the PRT can be made. It can be assumed that each of the shaded areas can be represented by a single line in the center of the shaded area (the mean Q from Table 1). The ratio of Q to CH consumed is constant (the slope of this line). As such, once the heat is known, the DOR* of any SCM within that class can be determined. Speaking from a practical perspective, the PRT now only requires the measurement of Q to determine the DOR*, if the class of the SCM is known (TGA is no longer needed).

The DOR* can be computed using Eq. (4) or using a graphical approach shown in Fig. 4, where the mean Q for an SCM is a function of DOR*. The Q from the PRT can be measured and a horizontal line can be drawn that intersects

the SCM-specific line to obtain DOR* (refer to Fig. 4).

$$DOR^* = Q / Q_{100} \quad (4)$$

where Q_{100} is the average heat released by an SCM of the given type at 100% DOR* (the mean value listed in Table 1).

There are some practical considerations to be kept in mind when measuring the DOR* using the PRT. First, the heat release at the same level of reaction (DOR*) differs for the various classes of SCMs. This is expected as each type of SCM has a different chemical composition (different proportions of SiO_2 , Al_2O_3 , and CaO), and the reaction of each component (SiO_2 , Al_2O_3 , and CaO) result in different reaction products and different values of Q (refer to Eq. (1) through (3)).

Different SCM types that release the same Q have different

DOR* values. For example, a Q of 300 J/g_{SCM} for slag cement (calcareous) corresponds to a DOR* of 34%, but a heat release of 300 J/g_{SCM} for calcined clay (silico-aluminous) corresponds to a DOR* of 43%. The measured Q is not directly the indicator of performance, rather DOR* is the indicator of how much of SCM has reacted.

Based on the experimental data from the literature, information can be obtained about typical values of DOR* determined from testing. Figure 5 provides a cumulative frequency plot of the measured DOR* of silica fume, fly ash, and slag cement using experimental results from previous research.^{13,18,21,22,26-28}

The DOR* could be used to compare SCMs within a given type of materials. For example, a fly ash with a DOR* of 65% is a highly reactive fly ash, while a silica fume with a DOR* of 65% would be silica fume with a lower reactivity. The results plotted in Fig. 5 may be useful in developing specifications for SCMs that are required to meet specific performance criteria when used in concrete.¹⁵ As more experimental data become available, the curve is expected to become more refined.

Commercially available silica fumes and calcined clays in general are seen to have the highest DOR*, followed by the typical commercially available slag cements, followed by the commercially available fly ashes that were tested. It is important to remember that while DOR* is a good performance indicator, it could also be used in conjunction with other performance prediction tools to develop mixture proportions.^{4,5,14,15,26,31}

Summary

The PRT can be used to calculate DOR* of an SCM using measurements of the cumulative Q and CH consumed when an SCM is combined with CH in an alkaline environment. If the chemical composition of the SCM is unknown, both the Q and the CH consumed by the SCM in the PRT are needed to determine the DOR*.

This research points out that for commercial SCMs the chemical compositions of the material obtained from standard

Table 1:
Q and CH consumed by typical commercial SCMs in the PRT*

Measured properties	DOR*, %	SCM type		
		Siliceous	Calcareous	Silico-aluminous
Q, J/g _{SCM} (mean ± 1/2 the range)	25	201 ± 9	223 ± 2	175 ± 6
	50	402 ± 17	445 ± 3	350 ± 12
	75	603 ± 26	667 ± 5	525 ± 18
	100	804 ± 35	889 ± 6	699 ± 23
CH consumed, g/100g _{SCM} (mean ± 1/2 the range)	25	43 ± 8	10 ± 15	34 ± 6
	50	85 ± 15	20 ± 31	68 ± 11
	75	127 ± 23	29 ± 45	121 ± 36
	100	169 ± 30	39 ± 60	135 ± 22

* Values shown are the mean Q and CH consumed and the range of Q /CH consumed from the mean for the SCM type

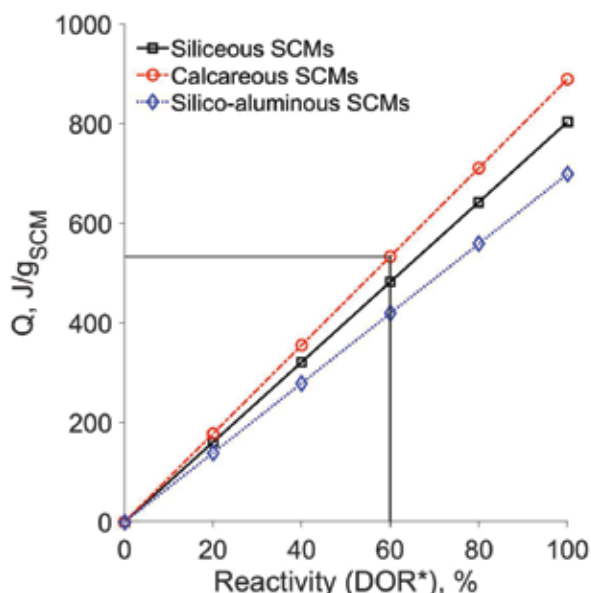


Fig. 4: Heat released versus DOR* of typical commercial SCMs

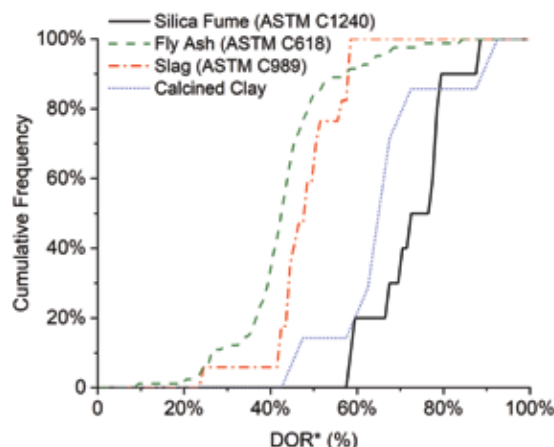


Fig. 5: Cumulative frequency plot of reactivities for commercial SCMs

specifications have a relatively constant Q/CH (the difference in the value of Q for any composition of SCM in a given class is within 4%). This observation allows DOR* for commercial SCMs to be determined using calorimetry alone (TGA measurement of CH consumed is not needed) making this easier to be performed in quality control and production labs.

The calculated DOR* is a performance measure that is used to compare two different SCMs from the same class. SCMs of different compositions have different measured Q in the PRT for the same DOR*. The PRT may be able to serve as an alternative to factors like the strength activity index because it provides a numerical value of DOR*. This can be used to quantify performance of an SCM as well as an input to thermodynamic models to predict the performance of concrete.^{4,5,14-16,24,26,32}

References

1. Juenger, M.C.G.; Snellings, R.; and Bernal, S.A., "Supplementary Cementitious Materials: New Sources, Characterization, and Performance Insights," *Cement and Concrete Research*, V. 122, Aug. 2019, pp. 257-273.
2. Thomas, M., *Supplementary Cementing Materials in Concrete*, CRC Press, Boca Raton, FL, 2013, 210 pp.
3. Lothenbach, B.; Scrivener, K.; and Hooton, R.D., "Supplementary Cementitious Materials," *Cement and Concrete Research*, V. 41, No. 12, Dec. 2011, pp. 1244-1256.
4. Bharadwaj, K.; Ghantous, R.M.; Sahan, F.; Isgor, O.B.; and Weiss, W.J., "Predicting Pore Volume, Compressive Strength, Pore Connectivity, and Formation Factor in Cementitious Pastes Containing Fly Ash," *Cement and Concrete Composites*, V. 122, Sept. 2021, Article 104113.
5. Bharadwaj, K.; Isgor, O.B.; and Weiss, W.J., "Supplementary Cementitious Materials and Portland Limestone Cements," *ACI Materials Journal*, DOI: 10.14359/51734356 (pending publication in 2022).
6. Bharadwaj, K.; Chopperla, K.S.T.; Choudhary, A.; Glosser, D.; Ghantous, R.M.; Vasedevan, G.; Ideker, J.H.; Isgor, O.B.; Trejo, D.; and Weiss, W.J., "CALTRANS: Impact of the Use of Portland-Limestone Cement on Concrete Performance as Plain or Reinforced Material," Oregon State University, Corvallis, OR, 2021, 296 pp.
7. AASHTO M 307, "Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures," American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 2013, 13 pp.
8. AASHTO M 295, "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete," American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 2019, 6 pp.
9. ASTM C989/C989M-18a, "Standard Specification for Slag Cement for Use in Concrete and Mortars," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, 7 pp.
10. ASTM C618-19, "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, 5 pp.
11. ASTM C1240-20, "Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020, 7 pp.
12. ASTM C1897-20, "Standard Test Methods for Measuring the Reactivity of Supplementary Cementitious Materials by Isothermal Calorimetry and Bound Water Measurements," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020, 5 pp.
13. Choudhary, A.; Bharadwaj, K.; Ghantous, R.M.; Isgor, O.B.; and Weiss, W.J., "Pozzolanic Reactivity Test for Supplementary Cementitious Materials," *ACI Materials Journal*, DOI: 10.14359/51734349 (pending publication in 2022).
14. Bharadwaj, K.; Glosser, D.; Moradillo, M.K.; Isgor, O.B.; and Weiss, W.J., "Toward the Prediction of Pore Volumes and Freeze-Thaw Performance of Concrete Using Thermodynamic Modelling," *Cement and Concrete Research*, V. 124, Oct. 2019, Article 105820.
15. Bharadwaj, K.; Isgor, O.B.; Weiss, W.J.; Chopperla, K.S.T.; Choudhary, A.; Vasudevan, G.D.; Glosser, D.; Ideker, J.H.; and Trejo, D.,

ACI Multi-User/ Multi-Site Solutions

From a single title, to a custom selection, to ACI's full collection, the American Concrete Institute partners with leading distributors to provide access to the Institute's published content for multiple locations and/or multiple users.



CUSTOMIZABLE COLLECTION
MULTIPLE USERS | MULTIPLE LOCATIONS
BUNDLE WITH OTHER PUBLISHERS



Techstreet



American Concrete Institute
Always advancing

www.concrete.org

"A New Mixture Proportioning Method for Performance-Based Concrete," *ACI Materials Journal*, DOI: 10.14359/51734301 (pending publication in 2022).

16. Glosser, D.; Azad, V.J.; Suraneni, P.; Isgor, O.B.; and Weiss, W.J., "Extension of Powers-Brownyard Model to Pastes Containing Supplementary Cementitious Materials," *ACI Materials Journal*, V. 116, No. 5, Sept. 2019, pp. 205-216.

17. Glosser, D.; Choudhary, A.; Ideker, J.H.; Trejo, D.; Weiss, W.J.; and Isgor, O.B., "Thermodynamic Investigation of Cementitious Mixtures Incorporating Off-Spec Fly Ashes," 2019, 18 pp., <https://www.semanticscholar.org/paper/Thermodynamic-Investigation-of-Cementitious-Fly-Glosser-Choudhary/73e43fda894e77b340c9d48b8faf7465eef9f56f>.

18. Glosser, D.; Choudhary, A.; Isgor, O.B.; and Weiss, W.J., "Investigation of Reactivity of Fly Ash and Its Effect on Mixture Properties," *ACI Materials Journal*, V. 116, No. 4, July 2019, pp. 193-200.

19. Glosser, D.; Suraneni, P.; Isgor, O.B.; and Weiss, W.J., "Estimating Reaction Kinetics of Cementitious Pastes Containing Fly Ash," *Cement and Concrete Composites*, V. 112, Sept. 2020, Article 103655.

20. Glosser, D.B., "Equilibrium and Non-equilibrium Thermodynamic Modeling of Cement Pastes Containing Supplementary Cementitious Materials," PhD Dissertation, Oregon State University, Corvallis, OR, 2020, 206 pp.

21. Suraneni, P.; Hajibabae, A.; Ramanathan, S.; Wang, Y.; and Weiss, W.J., "New Insights from Reactivity Testing of Supplementary Cementitious Materials," *Cement and Concrete Composites*, V. 103, Oct. 2019, pp. 331-338.

22. Azad, V.J.; Suraneni, P.; Trejo, D.; Weiss, W.J.; and Isgor, O.B., "Thermodynamic Investigation of Allowable Admixed Chloride Limits in Concrete," *ACI Materials Journal*, V. 115, No. 5, Sept. 2018, pp. 727-738.

23. Kim, T., and Olek, J., "Effects of Sample Preparation and Interpretation of Thermogravimetric Curves on Calcium Hydroxide in Hydrated Pastes and Mortars," *Transportation Research Record*, V. 2290, No. 1, Jan. 2012, pp. 10-18.

24. ASTM C1679-17, "Standard Practice for Measuring Hydration Kinetics of Hydraulic Cementitious Mixtures Using Isothermal Calorimetry," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, 15 pp.

25. Avet, F.; Snellings, R.; Diaz, A.A.; Ben Haha, M.; and Scrivener, K., "Development of a New Rapid, Relevant and Reliable (R³) Test Method to Evaluate the Pozzolanic Reactivity of Calcined Kaolinitic Clays," *Cement and Concrete Research*, V. 85, July 2016, pp. 1-11.

26. Isgor, O.B.; Ideker, J.H.; Trejo, D.; Weiss, W.J.; Bharadwaj, K.; Choudhary, A.; Chopperla, S.K.T.; Glosser, D.; and Vasudevan, G., "Performance-Based Mixture Proportioning of Concrete Incorporating Off-Spec Fly Ash: Mixture Proportioning Method Development and Validation," Technical Report 3002018795, Energy Power Research Institute (EPRI); Palo Alto, CA, Oct. 2020, 78 pp., <https://www.epri.com/research/programs/113123/results/3002018795>.

27. Ramanathan, S.; Croly, M.; and Suraneni, P., "Comparison of the Effects that Supplementary Cementitious Materials Replacement Levels Have on Cementitious Paste Properties," *Cement and Concrete Composites*, V. 112, Sept. 2020, Article 103678.

28. Ramanathan, S.; Kasaniya, M.; Tuen, M.; Thomas, M.D.A.;

and Suraneni, P., "Linking Reactivity Test Outputs to Properties of Cementitious Pastes Made with Supplementary Cementitious Materials," *Cement and Concrete Composites*, V. 114, Nov. 2020, Article 103742.

29. Moradillo, M.K.; Chung, C.-W.; Keys, M.H.; Choudhary, A.; Reese, S.R.; and Weiss, W.J., "Use of Borosilicate Glass Powder in Cementitious Materials: Pozzolanic Reactivity and Neutron Shielding Properties," *Cement and Concrete Composites*, V. 112, Sept. 2020, Article 103640.

30. Ramanathan, S.; Moon, H.; Croly, M.; Chung, C.-W.; and Suraneni, P., "Predicting the Degree of Reaction of Supplementary Cementitious Materials in Cementitious Pastes Using a Pozzolanic Test," *Construction and Building Materials*, V. 204, Apr. 2019, pp. 621-630.

31. Burroughs, J.F., "Influence of Chemical and Physical Properties of Poorly Ordered Silica on Reactivity and Rheology of Cementitious Materials," PhD Dissertation, Purdue University, West Lafayette, IN, 2019, 161 pp.

32. Isgor, O.B., and Weiss, W.J., "A Nearly Self-Sufficient Framework for Modelling Reactive-Transport Processes in Concrete," *Materials and Structures*, V. 52, No. 3, Feb. 2019, 17 pp.

Received and reviewed under Institute publication policies.



ACI member **Keshav Bharadwaj** is a PhD Student at Oregon State University, Corvallis, OR, USA. His research interests include thermodynamic modeling, reactivity, and transport in cementitious systems. He is an associate member of ACI Committee 236, Material Science of Concrete.



O. Burkan Isgor, FACI, is a Professor in the School of Civil and Construction Engineering at Oregon State University. His research interests include corrosion of steel in concrete, service life modeling of concrete, and thermodynamic modeling of cementitious systems. He is Chair of ACI Committee 222, Corrosion of Metals in Concrete, and a member of ACI Committees 236, Material Science of Concrete, and 365, Service Life Prediction.



W. Jason Weiss, FACI, is the Edwards Distinguished Professor of Engineering in the School of Civil and Construction Engineering at Oregon State University. He is Chair of ACI Committee 81, Materials Journal Editorial Board, and Editor-in-Chief of the *ACI Materials Journal*. He is also a member of the ACI Board of Direction, ACI Board Committee Chairs, ACI Technical Activities Committee, and numerous ACI technical committees, including ACI Committee 231, Properties of Concrete at Early Ages.

Un enfoque simplificado para determinar la reactividad puzolánica de materiales cementantes suplementarios comerciales

¿Qué es la reactividad de los MCS y por qué cuantificarla?

por Keshav Bharadwaj, O. Burkan Isgor y W. Jason Weiss

Una gran parte del concreto producido en los Estados Unidos contiene cierta cantidad de materiales cementantes suplementarios (MCS).¹ Los MCS pueden reducir la huella de carbono del concreto al sustituir una parte del cemento. Además, los MCS pueden mejorar la durabilidad al reducir la permeabilidad.^{2,3} o mitigar reacciones deletéreas como las reacciones álcali-sílice. Los MCS tienen una amplia gama de composiciones químicas y fases reactivas (la fracción de los MCS que puede reaccionar químicamente), que afectan el desempeño del concreto. La reactividad de los MCS influye en la porosidad, resistencia y propiedades de transporte del concreto fabricado con MCS⁴⁻⁶ y diferencia los MCS de los rellenos inertes típicos (no reactivos) utilizados en el concreto. Mientras que la composición química de los MCS convencionales que se pueden utilizar en concreto está relativamente bien definida en las especificaciones estándar,⁷⁻¹¹ falta un enfoque sólido para cuantificar la fracción de MCS que puede reaccionar.

Prueba de reactividad puzolánica y ASTM C1897

Recientemente se han desarrollado métodos de prueba para evaluar el desempeño de los MCS. Dos de las pruebas más comunes que han surgido con el uso creciente incluyen: ASTM C1897¹² (Prueba R3) y la prueba de reactividad puzolánica (PRP)¹³. Aunque son similares en concepto, ASTM C1897 evalúa la reactividad puzolánica del MCS, así como reacciones de adiciones de caliza y de sulfato, en tanto que la PRP se centra sólo en las

reacciones puzolánicas (las reacciones de sulfato y caliza no son consideradas). Además, a diferencia de la prueba R3, la PRP proporciona un valor numérico para la reactividad puzolánica. Estudios anteriores han descrito las similitudes y diferencias en los productos de reacción que pueden formarse entre estas pruebas. Este artículo describe cómo se puede simplificar la PRP para habilitar el grado máximo de reactividad (GDR*) a determinar utilizando sólo calorimetría isotérmica (CI). Este enfoque ahorrará tiempo a los productores y permitirá un uso más generalizado. La PRP mide el GDR* que se puede esperar para un MCS.^{4,5,13-22} La PRP consiste en mezclar un MCS con hidróxido de calcio (HC) (relación HC a MCS de 3: 1 en masa) en una solución alcalina (0.5N KOH; líquido: HC + MCS = 0.90 en masa). La prueba se realiza a una temperatura de 50 °C durante 10 días para lograr un grado relativamente alto de reacción en un período corto. La PRP requiere que se mida tanto el calor liberado (Q) como el HC consumido. El Q se mide utilizando un calorímetro isotérmico en una muestra de 7 g. El HC consumido es medido usando análisis termogravimétrico (ATG) usando una muestra que es de aproximadamente 20 mg (tomado de la ampolla de CI que contiene la pasta de MCS + HC reaccionada después de medir Q). Más información sobre la medición del contenido de HC en pastas utilizando ATG se proporciona en la Referencia 23.

Estas pruebas requieren pequeños volúmenes de material. El procedimiento PRP utiliza 40 g de MCS que se mezcla con 120 g de HC y 144 g de solución de KOH 0,5M.¹⁸ Aproximadamente 7 g de la pasta se sellan en una ampolla de vidrio y se carga en el calorímetro isotérmico luego de mezclar. Después de 10 días de reacción, aproximadamente 20 mg de pasta que ha reaccionado se cargan en el crisol de platino de la máquina ATG y se calcula la fracción de masa de HC que queda en la pasta.

El enfoque propuesto en este artículo elimina la necesidad de Prueba ATG y permite determinar el GDR* utilizando solo el valor de Q. Esto reduce drásticamente el trabajo y aumenta el potencial para que este método se utilice en una gama más amplia de laboratorios comerciales de pruebas y producción dado que el análisis ATG ya no es necesario.

Calorimetría isotérmica

Los materiales cementicios experimentan una reacción exotérmica, lo que significa que liberan calor cuando reaccionan hidráulica o puzolánicamente. CI es una técnica para medir esta liberación de calor en función del tiempo. Al medir el flujo de calor, las etapas y el alcance de la reacción se puede rastrear. Por ejemplo, la Fig. A ilustra la tasa de liberación de calor dQ/dt indicando las etapas comunes de hidratación del cemento (nota, esta figura representa una pasta hecha con agua y cemento). La figura B ilustra resultados típicos del calor acumulado (integral de la tasa del calor en función del tiempo). En el método PRP, se determina la liberación total de calor o la velocidad total de reacción. Si bien esto puede considerarse como el calor un tiempo muy tardío (10 días a 50°C), generalmente se utilizan procedimientos para extrapolar este tiempo infinito como se muestra en la Fig. B. Los calorímetros isotérmicos se están volviendo cada vez más comunes en los laboratorios de los Estados Unidos. Las universidades y laboratorios de investigación, así como grandes productores de cemento y concreto^{12,21,22,24,25} están utilizando IC para cuantificar varios aspectos de la hidratación del cemento, reacciones de MCS e impactos de la dosificación de la mezcla. Este método también está siendo utilizado para el control de calidad.

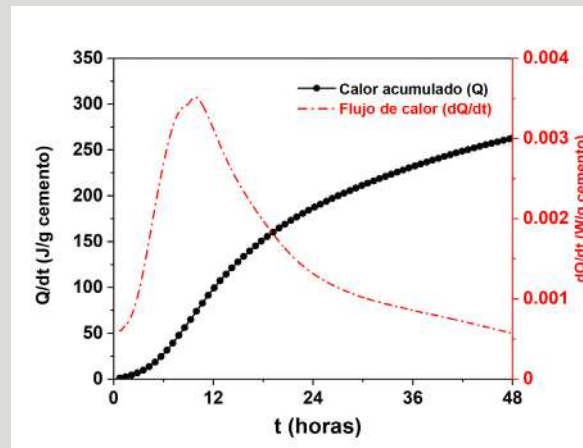


Figura A: Gráfico del calor acumulado liberado en función del tiempo para la hidratación del cemento Portland ordinario (CPO)

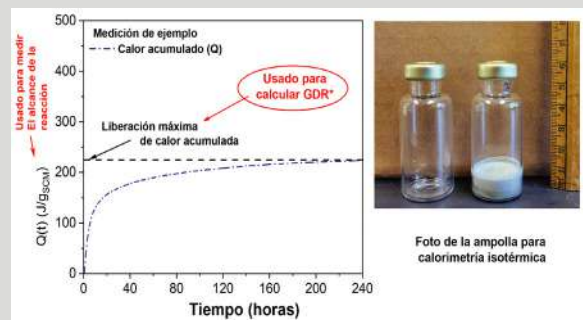
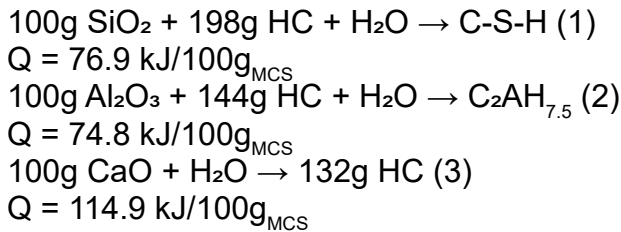


Figura B: Calor acumulado liberado (Q) en función del tiempo para la PRP con una reacción de un MCS y una imagen de las ampollas de CI con y sin muestras.

En tanto que la CI ha ido ganando adopción a través de normas como ASTM C1897 y ASTM C1679,²⁴ algunos lectores pueden no estar familiarizados con este método de prueba, por lo tanto, el uso de esta técnica en el PRP es explicado en el cuadro de texto. (inserto al final)

Los principales componentes reactivos de los MCS (SiO_2 , Al_2O_3 y CaO) participan en las reacciones químicas que se muestran en las ecuaciones (1) hasta (3). Los componentes menores de los MCS (Fe_2O_3 , MgO , Na_2O , K_2O y otros) no se tratan en este artículo, pero se discuten en la referencia 13. La ecuación (1) describe la reacción de sílice, la (2) describe la reacción de la alúmina, y la ecuación (3) describe la reacción del calcio. En el PRP el SiO_2 y el Al_2O_3 reaccionan puzolánicamente para formar Silicato de Calcio-Hidratado (C-S-H por sus siglas en inglés) y aluminato-hidrato de calcio ($\text{C}_2\text{AH}_{7,5}$), respectivamente. La reacción de CaO es más compleja a medida que reacciona hidráulicamente para producir HC y/o proporciona calcio para reaccionar con el SiO_2 y Al_2O_3 en el MCS.

Las tres reacciones liberan calor (Q) y consumen, o, en el caso de la ecuación (3), produce HC.



Las reacciones de 100% SiO₂ y 100% Al₂O₃ (Ec. (1) y (2)) proporcionan los valores teóricos de Q y HC consumidos en diferentes valores de GDR* para cada uno de los compuestos puros. Por ejemplo, 100% GDR* para la reacción teórica de Al₂O₃ corresponde a 144 g de consumo de HC y 74,8 kJ de calor generado por cada 100 g de Al₂O₃ consumidos en la reacción puzolánica. Del mismo modo, 100% GDR* para la reacción de SiO₂ teórica corresponde a 198 g de consumo de HC y 76,9 kJ de calor generado por cada 100 g de SiO₂ consumidos en la reacción puzolánica. Los valores teóricos para los otros GDR* (80, 60, 40 y 20%) se calculan como porcentaje correspondiente del HC consumido y calor generado al 100% de reactividad. Las dos líneas de la Fig. 1 sirven como valores de referencia de Q y HC consumidos para la reacción puzolánica de SiO₂ y Al₂O₃. El GDR* del MCS se puede medir interpolando entre las dos líneas de referencia, como se muestra en la Fig. 2.

Simplificando el PRP para MCS comerciales

La figura 2 muestra las composiciones químicas de los MCS comerciales que se utilizan normalmente en la producción de concreto en los Estados Unidos^{12,21,22,24-30} Tres amplias clasificaciones de MCS basadas en su composición química están marcadas en este gráfico como regiones delimitadas por líneas: materiales silíceos (SiO₂ / (SiO₂ + Al₂O₃) > 70% y CaO < 50%; por ejemplo, humo de sílice y cenizas volantes), materiales calcáreos (CaO > 50%; por ejemplo, cemento de escoria), y materiales de silico-aluminosos (SiO₂ / (SiO₂ + Al₂O₃) < 70% y CaO < 50%; por ejemplo, arcilla calcinada y metacaolín).

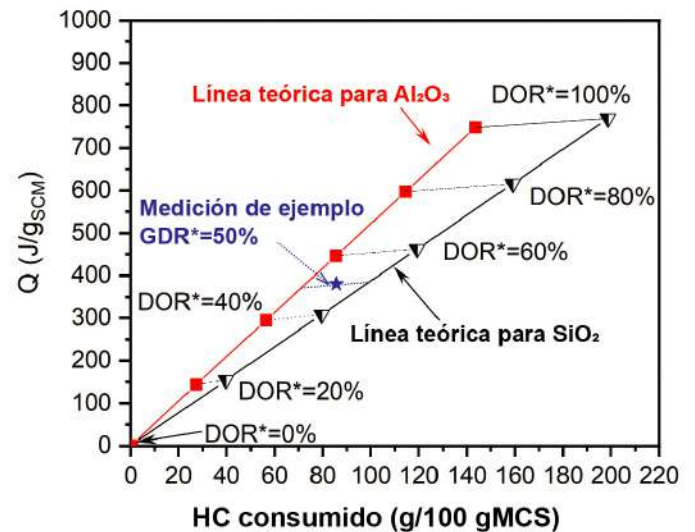


Figura 1: Determinación del GDR* de un MCS utilizando el PRP. La medición de ejemplo (estrella azul) demuestra la cuantificación de GDR* de mediciones experimentales. Para obtener más información sobre cómo se obtienen los valores teóricos de SiO₂ y Al₂O₃, consultar la referencia 13.

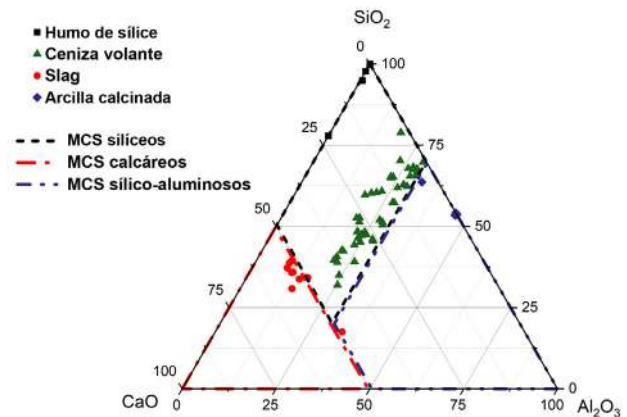


Figura 2: Gráfico de la composición química medida de varios MCS comerciales

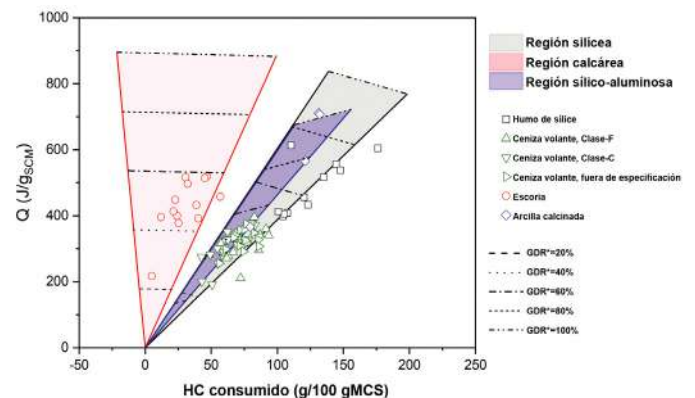


Figura 3: Calor liberado versus CH consumido para SCM comerciales típicos

Existe una relación Q-HC bien definida para un tipo dado de MCS. La Figura 3 ilustra las relaciones Q-HC obtenidas a través del modelado termodinámico (áreas sombreadas) y análisis experimental (símbolos) para el humo de sílice comercial típico, cenizas volantes, cemento de escoria y arcilla calcinada que cumplen con las especificaciones estándar correspondientes.⁷⁻¹¹ Todas las posibles composiciones de SiO₂, Al₂O₃ y CaO para cada tipo de MCS son consideradas en los cálculos. Como tal, cualquier combinación de SiO₂ + Al₂O₃ + CaO que pertenece a un tipo MCS caería dentro de la región sombreada que proporciona límites (dos líneas sólidas) para el Q y HC consumidos. Las regiones también contienen líneas cruzadas que indican el GDR* del MCS desde 0 hasta 100% a intervalos del 20% (similar a lo que se puede ver en la Fig. 1).

El GDR* del MCS se puede leer con mayor precisión desde el gráfico (con interpolación), cuando el Q medido experimentalmente y el HC consumido se añaden al mismo. Puede observarse que cada uno de los MCS ocupa relativamente regiones estrechas en el espacio Q-HC dependiendo de su composición química:

- Los MCS silíceos (humo de sílice y cenizas volantes) ocupan la región sombreada en gris en el espacio Q-HC;
- Los MCS calcáreos (cemento de escoria) ocupan la zona sombreada en rojo que está más cerca del eje y en el espacio Q-HC. Esto se debe a la formación de HC a partir de reacciones hidráulicas en sistemas calcáreos (ecuación (3));
- y
- Los MCS silico-aluminosos (arcilla calcinada) ocupan la región sombreada de azul dentro de la región silícea sombreada de gris, pero su rango es más estrecho, y el Q y HC consumido para un GDR* dado, son menores que para MCS silíceos.

La Figura 3 se puede utilizar para calcular el GDR* de un MCS en la práctica ya que se conoce la composición química del MCS y se puede considerar en los cálculos.



El rango de valores de Q y HC consumidos para diferentes tipos de MCS se compara con los resultados de la Figura 3 para valores de GDR* de 25, 50, 75 y 100%. El rango de valores de liberación de calor para un tipo dado de MCS es bastante estrecho; el Q promedio está dentro del 4% del valor más alto/más bajo.

Estimación de la reactividad de los MCS comerciales

Basado en la observación de que diferentes clases de MCS ocupan una región estrecha en el espacio Q-HC, se puede hacer una simplificación práctica al PRP. Se puede suponer que cada una de las áreas sombreadas se puede representar con una sola línea en el centro de dicha área sombreada (el Q promedio de la Tabla 1).

Tabla 1:
Q y HC consumido por un MCS comercial típico en la PRP*

Propiedades Medidas	GDR*, %	Tipo de MCS		
		Silíceos	Calcáreos	Silico-aluminosos
Q, J/gMCS (promedio ± ½ del rango)	25	201 ± 9	223 ± 2	175 ± 6
	50	402 ± 17	445 ± 3	350 ± 12
	75	603 ± 26	667 ± 5	525 ± 18
	100	804 ± 35	889 ± 6	669 ± 23
HC, consumido, g/100gMCS (promedio ± ½ del rango)	25	43 ± 8	10 ± 15	34 ± 6
	50	85 ± 15	20 ± 31	68 ± 11
	75	127 ± 23	29 ± 45	121 ± 36
	100	169 ± 30	39 ± 60	135 ± 22

* Los valores mostrados son la media de Q y HC consumidos y el rango de Q / HC consumido de la media para el tipo MCS

La relación de Q a HC consumido es constante (la pendiente de esta línea). Por tanto, una vez que se conoce el calor, se puede determinar el GDR* de cualquier MCS dentro de esa clase. Hablando desde una perspectiva práctica, el PRP ahora solo requiere la medición de Q para determinar el GDR*, si se conoce la clase de MCS (Ya no se necesita ATG).



El GDR* se puede calcular usando la Ec. (4) o usando un enfoque gráfico que se muestra en la Fig.4, donde el Q promedio para un MCS es una función del GDR*. El Q del PRP puede ser medido y se puede dibujar una línea horizontal que se cruza la línea específica de MCS para obtener el GDR* (ver la Fig. 4).

$$\text{GDR}^* = Q / Q_{100} \quad (4)$$

donde Q_{100} es el calor promedio liberado por un MCS del tipo dado al 100% GDR* (el valor medio enumerado en la Tabla 1). Hay algunas consideraciones prácticas que deben tenerse en cuenta al medir el GDR* usando el PRP. Primero, la liberación de calor para el mismo nivel de reacción (GDR*) difiere para las varias clases de MCS. Esto es de esperarse ya que cada tipo de MCS tiene una composición química diferente (diferentes proporciones de SiO_2 , Al_2O_3 y CaO), y la reacción de cada componente (SiO_2 , Al_2O_3 y CaO) da lugar a diferentes reacciones productos y diferentes valores de Q (consulte las ecuaciones (1) a (3)).

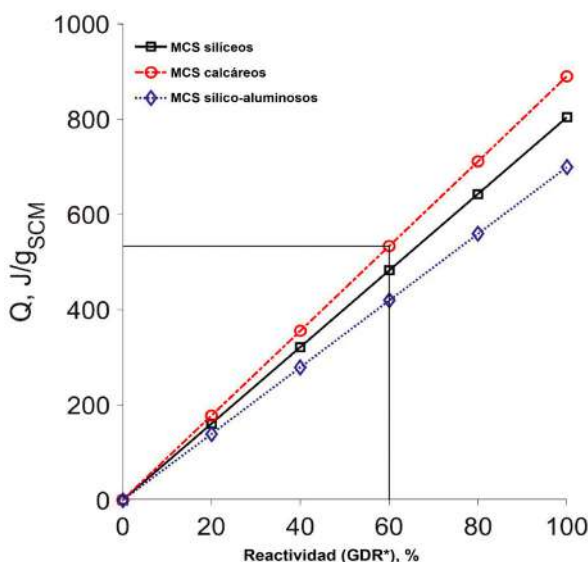


Figura 4: Calor liberado versus GDR* para MCS comerciales típicos.

Los diferentes tipos de MCS que producen el mismo Q tienen diferentes valores GDR*. Por ejemplo, un Q de $300 \text{ J/g}_{\text{MCS}}$ para cemento de escoria (calcáreo) corresponde a un GDR* del 34%, pero un calor liberación de $300 \text{ J/g}_{\text{MCS}}$ para arcilla calcinada (silico-aluminoso) corresponde a un GDR* del 43%. El Q medido no es directamente el indicador de rendimiento, más bien el GDR* es el indicador de cuánto de MCS ha reaccionado.

Basado en los datos experimentales de la literatura, se puede obtener información sobre los valores típicos de GDR* determinado a partir de las pruebas. La figura 5 proporciona un gráfico de frecuencia acumulada del GDR* medido de humo de sílice, cenizas volantes, y cemento de escoria utilizando resultados experimentales de investigación.^{13,18,21,22,26-28} El GDR* podría usarse para comparar los MCS dentro de un determinado tipo de materiales. Por ejemplo, una ceniza volante con un GDR* del 65% es una ceniza volante altamente reactiva, mientras que un humo de sílice con un GDR* del 65% sería humo de sílice con menor reactividad. Los resultados graficados en la Fig.5 pueden ser útiles para desarrollar especificaciones para los MCS que se requieren para cumplir con un criterio de rendimiento específico cuando se utiliza en concreto.¹⁵ Cuando más datos experimentales estén disponibles, se espera que la curva se vuelva más refinada.

Los humos de sílice y arcillas calcinadas disponibles comercialmente en general se considera que tiene el GDR* más alto, seguidos por los cementos de escoria típicos disponibles comercialmente, seguidos por las cenizas volantes disponibles comercialmente que fueron probadas. Es importante recordar que, si bien el GDR* es un buen indicador de rendimiento, también podría utilizarse junto con otras herramientas de predicción de rendimiento para desarrollar proporciones para las mezclas.^{4,5,14,15,26,31}

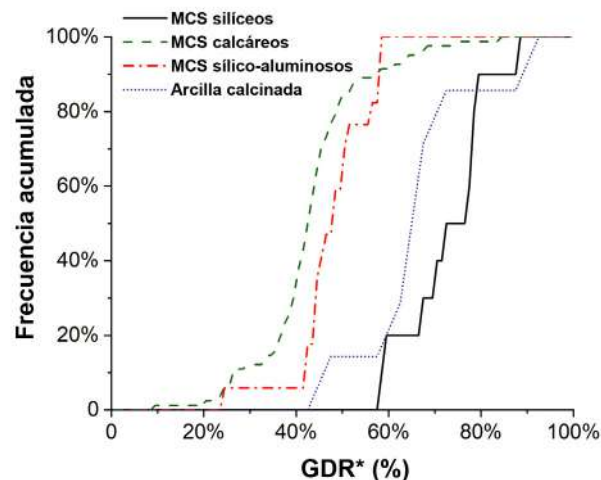


Figura 5: Gráfico de frecuencia acumulada de reactividades para MCS comerciales.

Resumen

El PRP se puede utilizar para calcular el GDR* de un MCS utilizando mediciones del Q y HC acumulados consumidos cuando un MCS se combina con HC en un ambiente alcalino. Si se desconoce la composición química del MCS, tanto el Q y el HC consumido por el MCS en el PRP son necesarios para determinar el GDR*. Esta investigación señala que para MCS comerciales la composición química del material obtenido de especificaciones estándar tienen un Q / HC relativamente constante (la diferencia en el valor de Q para cualquier composición de MCS en una clase dada está dentro del 4%). Esta observación permite GDR* para fines comerciales. Los MCS se determinarán utilizando solo calorimetría (AGT no es necesaria la medición de HC consumido) haciendo esto más fácil de realizar en laboratorios de control de calidad y producción. El GDR* calculado es una medida de desempeño que se utiliza para comparar dos MCS diferentes de la misma clase. Los MCS de diferentes composiciones tienen diferentes Q medidos en el PRP para el mismo GDR*. El PRP puede servir como una alternativa a factores como el índice de actividad resistente porque proporciona un valor numérico de GDR*. Esto puede ser utilizado para cuantificar el rendimiento de un MCS, así como una entrada para modelos termodinámicos para predecir el rendimiento de concreto.^{4,5,14-16,24,26,32.}

Referencias

1. Juenger, M.C.G.; Snellings, R.; and Bernal, S.A., "Supplementary Cementitious Materials: New Sources, HCCharacterization, and Performance Insights," *Cement and Concrete ResearHC*, V. 122, Aug. 2019, pp. 257-273.
2. Thomas, M., *Supplementary Cementing Materials in Concrete*, CRC Press, Boca Raton, FL, 2013, 210 pp.
3. LothenbaHC, B.; Scrivener, K.; and Hooton, R.D., "Supplementary Cementitious Materials," *Cement and Concrete ResearHC*, V.41, No. 12, Dec. 2011, pp. 1244-1256.
4. Bharadwaj, K.; Ghantous, R.M.; Sahan,F.; Isgor, O.B.; and Weiss, W.J., "Predicting Pore Volume, Compressive Strength, Pore Connectivity, and Formation Factor in Cementitious Pastes Containing Fly Ash," *Cement and Concrete Composites*, V. 122, Sept. 2021, Article 104113.
5. Bharadwaj, K.; Isgor, O.B.; and Weiss,W.J., "Supplementary Cementitious Materials and Portland Limestone

Cements," *ACI Materials Journal*, DOI: 10.14359/51734356 (pending publication in 2022).

6. Bharadwaj, K.; HCopperla, K.S.T.; HCoudhary, A.; Glosser, D.; Ghantous, R.M.; Vasedevan, G.; Ideker, J.H.; Isgor, O.B.; Trejo, D.; and Weiss, W.J., "CALTRANS: Impact of the Use of Portland-Limestone Cement on Concrete Performance as Plain or Reinforced Material," *Oregon State University, Corvallis, OR*, 2021, 296 pp.

7. AASHTO M 307, "Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures," *American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC*, 2013, 13 pp.

8. AASHTO M 295, "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete," *American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC*, 2019, 6 pp.

9. ASTM C989/C989M-18a, "Standard Specification for Slag Cement for Use in Concrete and Mortars," *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 2018, 7 pp.

10. ASTM C618-19, "Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete," *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 2019, 5 pp.}

11. ASTM C1240-20, "Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures," *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 2020, 7 pp.

12. ASTM C1897-20, "Standard Test Methods for Measuring the Reactivity of Supplementary Cementitious Materials by Isothermal Calorimetry and Bound Water Measurements," *ASTM International, West Conshohocken, PA*, 2020, 5 pp.

13. HCoudhary, A.; Bharadwaj, K.; Ghantous, R.M.; Isgor, O.B.; and Weiss, W.J., "Pozzolanic Reactivity Test for Supplementary Cementitious Materials," *ACI Materials Journal*, DOI: 10.14359/51734349 (pending publication in 2022).

14. Bharadwaj, K.; Glosser, D.; Moradllo, M.K.; Isgor, O.B.; and Weiss, W.J., "Toward the Prediction of Pore Volumes and Freeze-Thaw Performance of Concrete Using Thermodynamic Modelling," *Cement and Concrete ResearHC*, V. 124, Oct. 2019, Article 105820.

15. Bharadwaj, K.; Isgor, O.B.; Weiss, W.J.; HCopperla, K.S.T.; HCoudhary, A.; Vasudevan, G.D.; Glosser, D.; Ideker, J.H.; and Trejo, D., "A New Mixture Proportioning Method for Performance-Based Concrete," *ACI Materials Journal*, DOI: 10.14359/51734301 (pending publication in 2022).

16. Glosser, D.; Azad, V.J.; Suraneni, P.; Isgor, O.B.; and Weiss, W.J., "Extension of Powers-Brownyard Model to Pastes Containing Supplementary Cementitious Materials," *ACI Materials Journal*, V. 116, No. 5, Sept. 2019, pp. 205-216.

17. Glosser, D.; HCoudhary, A.; Ideker, J.H.; Trejo, D.; Weiss, W.J.; and Isgor, O.B., "Thermodynamic Investigation of Cementitious Mixtures Incorporating Off-Spec Fly Ashes," 2019, 18 pp., [https:// www.semanticsHColar.org/paper/Thermodynamic-](https://www.semanticsHColar.org/paper/Thermodynamic-)

Investigation-of-Cementitious-Fly-GlosserHCoudhary/73e43fda894e77b340c9d48b8faf7465eef9f56f.

18. Glosser, D.; HCoudhary, A.; Isgor, O.B.; and Weiss, W.J., "Investigation of Reactivity of Fly Ash and Its Effect on Mixture Properties," ACI Materials Journal, V. 116, No. 4, July 2019, pp. 193-200.

19. Glosser, D.; Suraneni, P.; Isgor, O.B.; and Weiss, W.J., "Estimating Reaction Kinetics of Cementitious Pastes Containing Fly Ash," Cement and Concrete Composites, V. 112, Sept. 2020, Article 103655.

20. Glosser, D.B., "Equilibrium and Non-equilibrium Thermodynamic Modeling of Cement Pastes Containing Supplementary Cementitious Materials," PhD Dissertation, Oregon State University, Corvallis, OR, 2020, 206 pp.

21. Suraneni, P.; Hajibabae, A.; Ramanathan, S.; Wang, Y.; and Weiss, W.J., "New Insights from Reactivity Testing of Supplementary Cementitious Materials," Cement and Concrete Composites, V. 103, Oct. 2019, pp. 331-338.

22. Azad, V.J.; Suraneni, P.; Trejo, D.; Weiss, W.J.; and Isgor, O.B., "Thermodynamic Investigation of Allowable Admixed HCloride Limits in Concrete," ACI Materials Journal, V. 115, No. 5, Sept. 2018, pp. 727-738.

23. Kim, T., and Olek, J., "Effects of Sample Preparation and Interpretation of Thermogravimetric Curves on Calcium Hydroxide in Hydrated Pastes and Mortars," Transportation Research Record, V. 2290, No. 1, Jan. 2012, pp. 10-18.

24. ASTM C1679-17, "Standard Practice for Measuring Hydration Kinetics of Hydraulic Cementitious Mixtures Using Isothermal Calorimetry," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, 15 pp.

25. Avet, F.; Snellings, R.; Diaz, A.A.; Ben Haha, M.; and Scrivener, K., "Development of a New Rapid, Relevant and Reliable (R3) Test Method to Evaluate the Pozzolanic Reactivity of Calcined Kaolinitic Clays," Cement and Concrete Research, V. 85, July 2016, pp. 1-11.

26. Isgor, O.B.; Ideker, J.H.; Trejo, D.; Weiss, W.J.; Bharadwaj, K.; HCoudhary, A.; HCopperla, S.K.T.; Glosser, D.; and Vasudevan, G., "Performance-Based Mixture Proportioning of Concrete Incorporating Off-Spec Fly Ash: Mixture Proportioning Method Development and Validation," Technical Report 3002018795, Energy Power Research Institute (EPRI); Palo Alto, CA, Oct. 2020, 78 pp., <https://www.epri.com/research/programs/113123/results/3002018795>.

27. Ramanathan, S.; Croly, M.; and Suraneni, P., "Comparison of the Effects that Supplementary Cementitious Materials Replacement Levels Have on Cementitious Paste Properties," Cement and Concrete Composites, V. 112, Sept. 2020, Article 103678.

28. Ramanathan, S.; Kasaniya, M.; Tuen, M.; Thomas, M.D.A.; and Suraneni, P., "Linking Reactivity Test Outputs to Properties of Cementitious Pastes Made with Supplementary

Cementitious Materials," Cement and Concrete Composites, V. 114, Nov. 2020, Article 103742.29. Moradillo, M.K.; HCung, C.-W.; Keys, M.H.; HCoudhary, A.;

29. Reese, S.R.; and Weiss, W.J., "Use of Borosilicate Glass Powder in Cementitious Materials: Pozzolanic Reactivity and Neutron Shielding Properties," Cement and Concrete Composites, V. 112, Sept. 2020, Article 103640.

30. Ramanathan, S.; Moon, H.; Croly, M.; HCung, C.-W.; and Suraneni, P., "Predicting the Degree of Reaction of Supplementary Cementitious Materials in Cementitious Pastes Using a Pozzolanic Test," Construction and Building Materials, V. 204, Apr. 2019, pp. 621-630.

31. Burroughs, J.F., "Influence of HChemical and Physical Properties of Poorly Ordered Silica on Reactivity and Rheology of Cementitious Materials," PhD Dissertation, Purdue University, West Lafayette, IN, 2019, 161 pp.

32. Isgor, O.B., and Weiss, W.J., "A Nearly Self-Sufficient Framework for Modelling Reactive-Transport Processes in Concrete," Materials and Structures, V. 52, No. 3, Feb. 2019, 17 pp.



O. Burkan Isgor, F.A.C.I., es profesor en la Escuela de Ingeniería Civil y de Construcción en la Universidad Estatal de Oregon. Sus intereses de investigación incluyen la corrosión del acero en el concreto, el modelado de la vida útil del concreto y el modelado termodinámico de sistemas cementicios. Él es presidente del Comité 222 de ACI, Corrosión de Metales en el Concreto, y miembro de los Comités ACI 236, Ciencia de los materiales de concreto y 365, predicción de la vida útil.



Keshav Bharadwaj, es un Estudiante de doctorado en la Universidad Estatal de Oregon en Corvallis, Oregon, Estados Unidos. Sus intereses en incluyen el modelado termodinámico, reactividad y transporte en sistemas cementicios. Es un miembro asociado del Comité ACI 236, Ciencia de Materiales del Concreto



W. Jason Weiss, FCI, es Profesor Distinguido Edwards de Ingeniería en la Escuela de Ingeniería Civil y de Construcción en la Universidad Estatal de Oregón. Es presidente del Comité 81 de ACI, Junta Editorial de la Revista de Materiales y editor en jefe de ACI Materials Journal. También es miembro de la Junta Directiva del ACI, ACI Board Committee Chairs, el Comité de Actividades Técnicas de ACI y otros numerosos comités técnicos de ACI, incluyendo el Comité ACI 231, Propiedades del concreto a edades tempranas.

La traducción de este artículo correspondió al Capítulo de Costa Rica

Título: Un enfoque simplificado para determinar la reactividad puzolánica de materiales cementantes suplementarios comerciales



*Traductor y Revisor Técnico:
Dagoberto González*

¡LOS CAPÍTULO DEL ACI y TU hacen una PAREJA PERFECTA!

Al acercarte y formar parte de tu Capítulo local de ACI, obtendrás entre otros beneficios el acceso a mayor y mejor conocimiento técnico, formarás parte de una red técnica y de una gran comunidad relacionada con la industria del concreto, no solo en tu localidad, sino también con alcance internacional. El Instituto Americano del Concreto, (ACI por sus siglas en inglés) tiene más de 300 Capítulos de profesionales, así como de estudiantes, relacionados con el concreto y esparcidos en todo el mundo.



Para conocer la lista completa de los Capítulos del ACI a nivel mundial consulta: www.concrete.org/Chapters