

## Evaluación de los agregados utilizados en la región metropolitana de Salvador en cuanto a la ocurrencia de Reacción Alkali-Agregado (RAA)

D. V. Ribeiro<sup>1\*</sup> , R. O. Rey<sup>1</sup> 

\*Autor de Contacto: [verasribeiro@hotmail.com](mailto:verasribeiro@hotmail.com)

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.326>

Recepción: 19/06/2018 | Aceptación: 19/02/2019 | Publicación: 30/04/2019

### RESUMEN

En el presente trabajo se evaluó la RAA de los agregados utilizados en la región metropolitana de Salvador y el uso de adiciones minerales, a fin de mitigar esa reacción. Se utilizó el método acelerado de barras de mortero, preconizado por la NBR 15577-4: 2008. Los resultados indican que las arenas de la región metropolitana de Salvador presentan baja reactividad, sin embargo, las gravas presentaron alta reactividad y que adiciones minerales con características pozolánicas pueden mitigar la RAA. Este estudio, a pesar de limitarse a las condiciones utilizadas, es inédito en el Estado de Bahía y presenta un elevado índice de originalidad por utilizar contenidos de adiciones superiores a las convencionales. Se concluyó en este estudio que la microsíllica, si se utiliza en niveles muy elevados, puede, incluso, acelerar la reacción.

**Palabras clave:** RAA; agregados; adiciones minerales; mitigación.

**Citar como:** Ribeiro, D. V., Rey, R. O. (2019), "Evaluación de los agregados utilizados en la región metropolitana de Salvador en cuanto a la ocurrencia de RAA", Revista ALCONPAT, 9 (2), pp. 185 – 199, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v9i2.326>

<sup>1</sup> Universidade Federal da Bahia, Brasil.

### Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, [alconpat.int@gmail.com](mailto:alconpat.int@gmail.com), Página Web: [www.alconpat.org](http://www.alconpat.org)

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2020 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2019.

## **Evaluation of the aggregates used in the metropolitan region of Salvador regarding the occurrence of alkali-aggregate reactions (AAR)**

### **ABSTRACT**

In the present work the AAR of the aggregates used in the metropolitan region of Salvador and the use of mineral additions in order to mitigate this reaction was evaluated. The accelerated test method using mortar bars, recommended by NBR 15577-4: 2008, was used. The results indicate that the sands of the metropolitan area of Salvador have low reactivity, however, the gravels presented high reactivity and that mineral additions with pozzolanic characteristics can mitigate the AAR. This study, although limited to the conditions used, is unprecedented in the State of Bahia and presents a high index of originality, since it uses higher contents of mineral additions than conventional use. It was concluded that microsilica, if used at very high contents, can even accelerate the AAR.

**Keywords:** AAR; aggregates; mineral additions; mitigation

## **Avaliação dos agregados utilizados na região metropolitana de Salvador quanto à ocorrência de Reatividade Alcalis-Agregado (RAA)**

### **RESUMO**

O presente artigo avaliou a RAA dos agregados utilizados na região metropolitana de Salvador e o uso de adições minerais, a fim de mitigar essa reação. Empregou-se o método acelerado de barras de argamassa, preconizado pela NBR 15577-4: 2008. Os resultados indicam que os agregados miúdos da região metropolitana de Salvador apresentam baixa reatividade, entretanto, os agregados graúdos apresentaram elevada reatividade e que adições minerais com características pozolânicas podem mitigar a RAA. Este estudo, apesar de se limitar às condições utilizadas, é inédito no Estado da Bahia e apresenta elevado índice de originalidade por utilizar teores de adições superiores às convencionais. Concluiu-se neste estudo que a microsilica, se utilizada em teores muito elevados, pode, inclusive, acelerar a reação.

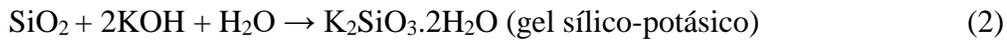
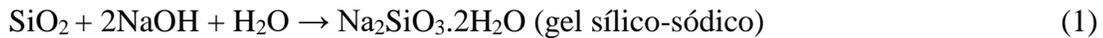
**Palavras-chave:** RAA; agregados; adições minerais; mitigação.

## **1. INTRODUCCIÓN**

Las reacciones álcalis-agregado son reacciones químicas que ocurren entre ciertos componentes mineralógicos reactivos de los agregados y de los iones alcalinos e hidroxilos presentes en la solución intersticial de la pasta de cemento. Esta reacción tiene, como producto, un gel de carácter expansivo que, en presencia de agua, se expande, incrementando las fuerzas internas de la estructura, generando deformaciones y fisuras en la superficie del concreto, pudiendo tener un efecto altamente perjudicial, comprometiendo hasta la vida útil de la edificación (Thomas, 2011). Actualmente es considerada la existencia de tres tipos deletéreos de la reacción, en función de la composición mineralógica de los agregados y de los mecanismos involucrados. Siendo ellos: reacción álcalis-sílice, reacción álcalis-silicato y reacción álcalis-carbonato. En el presente trabajo a reacción álcalis-carbonato no fue tratada con mayor detalle por no ser el motivo de la pesquisa. El término reacción álcalis-agregado (RAA) cuando es mencionado en el texto, será referente a las reacciones álcalis-sílice o álcalis-silicato.

La primera fase de la reacción álcalis-sílice (RAS) es la reacción entre los iones hidroxilo (OH<sup>-</sup>) presente en la solución de los poros, y la sílice reactiva del agregado. Inicialmente los álcalis contribuyen en el aumento de la concentración de iones hidroxilo en la solución y seguidamente,

en la formación del gel expansivo (Thomas, 2011; Beyene et al., 2013). La RAS puede ser representada de forma simplificada por las ecuaciones (1) y (2) (West, 1996 *apud* Campos, 2015).



Para que ocurra la reacción álcalis-agregado son necesarias tres condiciones: i) presencia de fases reactivas en el agregado; ii) humedad suficiente y; iii) concentración de hidróxidos alcalinos en la solución de los poros del concreto suficiente para reaccionar con las fases reactivas de los agregados (Giordano, 2007).

Las materias primas utilizadas en la manufactura del cemento Portland son, generalmente, las responsables por la presencia de álcalis en el cemento, que varía en el rango de 0,2% a 1,5% de  $\text{Na}_2\text{O}$  equivalente ( $\text{Na}_2\text{O} + 0,658\text{K}_2\text{O}$ ). Como consecuencia de la hidratación del cemento, se tiene una solución intersticial en el concreto que contiene esencialmente hidróxido de sodio, calcio y potasio. Normalmente, dependiendo de la cantidad de álcalis, el pH de la solución en los poros varía de 12,5 a 13,5. Este pH representa un líquido altamente alcalino en el cual algunas rocas ácidas (agregados compuestos de sílice y minerales silíceos) no permanecen estables (Giordano, 2007). Es decir, la presencia de álcalis influye en la reactividad del agregado y en la extensión de la reacción, una vez que cuantos más álcalis disponibles, mayor la concentración de  $\text{OH}^-$  en la solución de los poros y, en consecuencia, más sílice será disuelta (Beyene et al., 2013).

Es preciso estar atento para la ocurrencia de la reacción álcalis-agregado, ya que, una vez formado el gel expansivo, no habrá manera de revertir el proceso, apenas minimizar sus daños. Estudios recientes (Thomas, 2011; Beyene et al., 2013) demuestran que la expansión es reducida cuando un cemento puzolánico o adiciones minerales puzolánicas son utilizados y por ello es indicada la utilización de adiciones minerales puzolánicas, tales como la sílice activa y metacaolín, en la mezcla del concreto. Estos estudios evalúan los efectos de adiciones minerales sobre la reacción álcalis-agregado y observan que la utilización de una cantidad suficiente de adición mineral adecuada es una de las medidas más eficientes para la prevención de la RAA, controlando la expansión cuando un agregado perjudicialmente reactivo es usado en concreto (Thomas, 2011).

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Materiales

En este trabajo fue utilizado el cemento patrón previsto por la Asociación Brasileira de Cemento Portland (ABCP), conteniendo elevadas concentraciones de álcalis he indicado para ensayos acelerados de evaluación de la RAA y del cemento Portland CP V ARI-RS (equivalente al cemento tipo V, high sulfate resistance, de acuerdo con la ASTM C150), constituido esencialmente por clínquer y sulfato de calcio, comprobadamente no mitigador de la reacción álcalis-agregado, debido a la ausencia de puzolanas, permitiendo evaluar adecuadamente el efecto de la presencia de las adiciones utilizadas (metacaolín y sílice activa).

La arena usada para el vaciado de las probetas para el análisis de la reactividad y análisis de desempeños de los morteros, oriundos de la ciudad de Camaçari, fue adquirida en centros comerciales de Salvador. El agregado grueso reactivo utilizado para los ensayos de expansión con el metacaolín y la sílice activa fue provisto por una arenera de Salvador.

Se usó agua desionizada para el vaciado de las probetas de los ensayos de expansión de la RAA y agua proveniente de la red pública de abastecimiento, para el vaciado de las probetas para el análisis de desempeño de los morteros. Fue utilizado, también, aditivo químico superplastificante a base de agua.

## 2.2. Métodos

### 2.2.1 Caracterización de los materiales

Los materiales fueron caracterizados en cuanto a peso específico, utilizando la NBR 9776 (“Agregados – Determinación del peso específico de agregados finos por medio del frasco Chapman”) para la arena y la técnica de picnometría a gas helio (AccuPyc II 1340 Micromeritics) para metacaolín, la sílice activa y el cemento CPV ARI-RS (equivalente al cemento tipo V, de acuerdo con la ASTM C150).

El área superficial del metacaolín y de la sílice fue determinada por el método BET la Contenidoia de Adsorción Multimolecular, y la del cemento fue determinada por el método de Blaine de acuerdo con la norma ABNT NBR NM 76 (ABNT, 1998).

### 2.2.2 Vaciado de los morteros

Para la confección de las probetas fueron utilizados en la caracterización de los morteros, se usó la proporción 1: 3 (cemento: arena) con relación agua/aglomerante de 0,6, en peso, con la presencia de adiciones minerales y aditivo superplastificante en diversas concentraciones, según la Tabla 1.

Tabla 1. Consumo de material necesario para la producción de 1m<sup>3</sup> de mortero con sílice activa o metacaolín.

Contenido	Cemento (kg)	Arena (kg)	Agua (kg)	Aditivo (kg)	Sílice Activa o Metacaolín (kg)	Relación agua/aglomerante	Relación agua/cemento
REF	485,45	1456,35	291,27	1,37	0,00	0,60	0,60
10%	436,90	1456,35	291,27	3,55	48,55	0,60	0,67
15%	412,63	1456,35	291,27	7,10	72,82	0,60	0,71
20%	388,36	1456,35	291,27	14,20	97,09	0,60	0,75

A fin de relacionar las propiedades físicas de los morteros con su comportamiento en relación con la reacción álcalis-agregado y analizar la influencia de las adiciones activas en la preparación de las mismas, fueron realizados ensayos de análisis de desempeño de los morteros utilizados. El estudio experimental involucró ensayos de resistencia (ABNT, 2005), capilaridad y densidad aparente por medio del Principio de Arquímedes, para análisis de desempeño de los morteros cuando es utilizada la adición activa. Para ello fueron vaciados 4 probetas (por edad) para cada determinación.

Para estudios de RAA, fueron hechos ensayos acelerados de expansión de barras de mortero, prescritos por la norma NBR 15577/2008 Partes 4 y 5 (ABNT 2004a; ABNT 2004b), para la verificación de la reactividad de los agregados en cuanto a la reacción álcali-agregado y a la capacidad de mitigación de las adiciones minerales para ese tipo de reacción.

### 2.2.3 Análisis de desempeño de los morteros

#### a) Resistencia Mecánica

Para el análisis de desempeño en cuanto a la resistencia mecánica, fueron hechos ensayos de resistencia a la compresión axial y tracción por flexión, con probetas de edades de 3, 7 y 28 días, según NBR 13279 (ABNT, 2005).

El límite de la resistencia a la compresión axial ( $R_c$ ) está dado por la razón entre la carga máxima (P) soportada por la probeta y el área da su sección original (A), según la ecuación (3).

$$R_c = \frac{P}{A} \quad (3)$$

La resistencia a tracción por flexión ( $R_{TF}$ ) es determinada por medio de la ecuación (4).

$$R_{TF} = \frac{PL}{B.D^2} \quad (4)$$

Donde P = carga máxima aplicada, en N; L= distancia entre bases de soporte, en mm; B = ancho de la probeta en la sección de ruptura, en mm; D = altura de la probeta, en la sección de ruptura, en mm.

*b) Porosidad y Densidad aparente*

Sobre la base de los principios de Arquímedes, es posible hacer la verificación de la porosidad y densidades aparentes de las composiciones utilizadas. La técnica consiste en comparar los pesos de las probetas antes y después de la inmersión en agua. Las muestras fueron pesadas aún secas ( $M_s$ ) y enseguida, inmersas en agua, donde son dejadas durante 24 horas para que haya saturación de estas. Luego de ese período, se determina el peso inmerso ( $M_i$ ) y el peso húmedo ( $M_u$ ), entonces, calculamos la porosidad aparente ( $P_a$ ) y la densidad aparente ( $D_a$ ), utilizando las ecuaciones (5) e (6).

$$\% P_a = 100 \cdot \frac{M_u - M_s}{M_u - M_i} \quad (5)$$

$$D_a = \rho \cdot \frac{M_s}{M_u - M_i} \quad (6)$$

Donde  $\rho$  es la densidad del líquido (para el agua,  $\rho$  es igual a 1,0 g/cm<sup>3</sup>)

*c) Absorción de agua por Capilaridad*

La absorción excesiva de agua es un indicador de una mayor difusión de elementos y soluciones dentro de la mezcla, aumentando las oportunidades de ocurrencia de corrosión y también, de la reacción álcalis-agregado, siendo, así, fundamental para el presente estudio.

El ensayo de absorción de agua por capilaridad es realizado con tres probetas de dimensiones 40 mm x 40 mm x 160 mm para cada composición, a la edad de 28 días. Inicialmente esas probetas son secadas en la estufa por 24 horas y enseguida, enfriados a temperatura ambiente. Se determina el peso de las probetas secas y entonces, se coloca sobre una lámina de agua a nivel constante e igual a 7±1 mm de la base de la probeta. Durante el ensayo, se determina el peso de las probetas con intervalos de tiempo normalizados por la NBR 9779 (ABNT, 2012). Así, se calcula el coeficiente angular de la recta de absorción capilar (peso de agua absorbida por metro cuadrado de mortero) en función de la raíz cuadrada del tiempo, que representa el coeficiente de absorción capilar.

**2.2.4 Determinación de la Reactividad álcalis-agregado (RAA)**

El método utilizado para evaluar la reactividad de los agregados de la región metropolitana de Salvador en cuanto a la reacción álcali-agregado fue el definido por la norma NBR 15577-4 (ABNT, 2008a). Ese método consiste en evaluar la expansión dimensional de barras de mortero sometidas a una solución alcalina de hidróxido de sodio, a 80°C.

Para la preparación del mortero el agregado grueso debe ser obtenido con un mínimo de piedra, de forma de producir un producto clasificado según la norma. Fueron vaciadas barras de dimensión 25 mm x 25 mm x 285 mm con proporciones en peso de cemento: agregado de 1: 2,25 con relación a/c fijada por la norma e igual a 0,47 y utilizando un cemento-patrón provisto por la ABCP, propio para la realización de ese tipo de ensayo y que atienda a los requisitos de la ABNT NBR 5732 (ABNT, 1991).

### 2.2.5 Evaluación de la eficiencia de las adiciones activas en mitigar la ocurrencia de la RAA

El método definido por la norma NBR 15577-5 (ABNT, 2008b), con el mismo principio del método de la ABNT NBR 15577- 4 (ABNT, 2008a) es indicado para evaluar la eficiencia de materiales puzolánicos en mitigar la expansión debido a la de la reacción álcalis-agregado.

En este método son realizadas mezclas sin adiciones y con adiciones. Fueron confeccionadas tres barras de mortero con dimensiones 25 mm x 25 mm x 285 mm. Se usó cemento Portland CPV ARI-RS (equivalente al cemento tipo V, de acuerdo con la ASTM C150), comprobadamente no mitigador de la RAA y el agregado reactivo disponible de la región.

Las medidas de expansión son hechas de manera semejante a la NBR 15577-4 (ABNT, 2008a), y al final de los 30 días se hace el análisis comparativo de la expansión en las barras de mortero de referencia (sin adiciones) y de las barras de mortero con adición de metacaolín y sílice activa, en las concentraciones de 10%, 15% y 20%. De esa manera es posible concluir si el material contribuyó o no en la reducción de la expansión provocada por la RAA.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 3.1. Caracterización de los Materiales

La composición química del cemento y las características físicas de los materiales utilizados en el estudio se encuentran en las Tablas 2 y 3.

Tabla 2. Composición química del cemento, determinado por FRX.

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Contenido de Álcalis		
					Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub> *
19,10	4,84	3,19	61,12	2,73	0,24	0,70	0,70

$$* \text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}} = \text{Na}_2\text{O} + 0,658\text{K}_2\text{O}$$

Tabla 3. Características Físicas de los materiales

Propiedades	CPV ARI RS	Metacaolín	Sílice	Arena
Peso específico (g/cm <sup>3</sup> )	3,08	2,68	2,35	2,66
Área superficial específica BET (m <sup>2</sup> /g)	0,33	16,85	9,78	-
Finura cedazo 75 μm (%)	2,39	-	-	-

### 3.2 Análisis de desempeño de los morteros

Las Figuras 1 y 2 presentan los resultados de resistencia a compresión y a tracción en la flexión, a las edades de 3, 7 y 28 días de curado de los morteros con sustitución parcial del cemento por la sílice activa y el metacaolín, respectivamente. La proporción usada fue 1:3, con relación agua/aglomerante (cemento + adición) igual a 0,6, conforme Tabla 1. Utilizo u-se, también, aditivo superplastificante a fin de garantizar trabajabilidad a la mezcla.

Se observa que en la medida en que se aumenta el contenido de sílice activo, hay un aumento en la resistencia mecánica del mortero, alcanzando valores de compresión axial de 35,2 MPa con 20% de sílice activa, mientras que el mortero de referencia presentó resistencia de 27,8 MPa (aumento

de 27%). Comportamiento semejante es el observado para los resultados de tracción en la flexión, por tanto, para concentraciones de sustitución inferiores a 20%, a los 28 días, las probetas presentaron resistencia cercana a las probetas con mortero de referencia.

El aumento de la resistencia también es observado con 15% de metacaolín (Figura 2), donde la compresión axial alcanza el valor de 32,5 MPa, mientras que el mortero de referencia presentó resistencia de 27,8 MPa (aumento de 17%). Aun cuando los morteros de 10% hayan mostrado resistencia inferior a las de referencia, los resultados se encuentran en rangos de error muy cercanas, concluyéndose por tanto que no hubo variación de resistencia considerable con la adición de 10% del material.

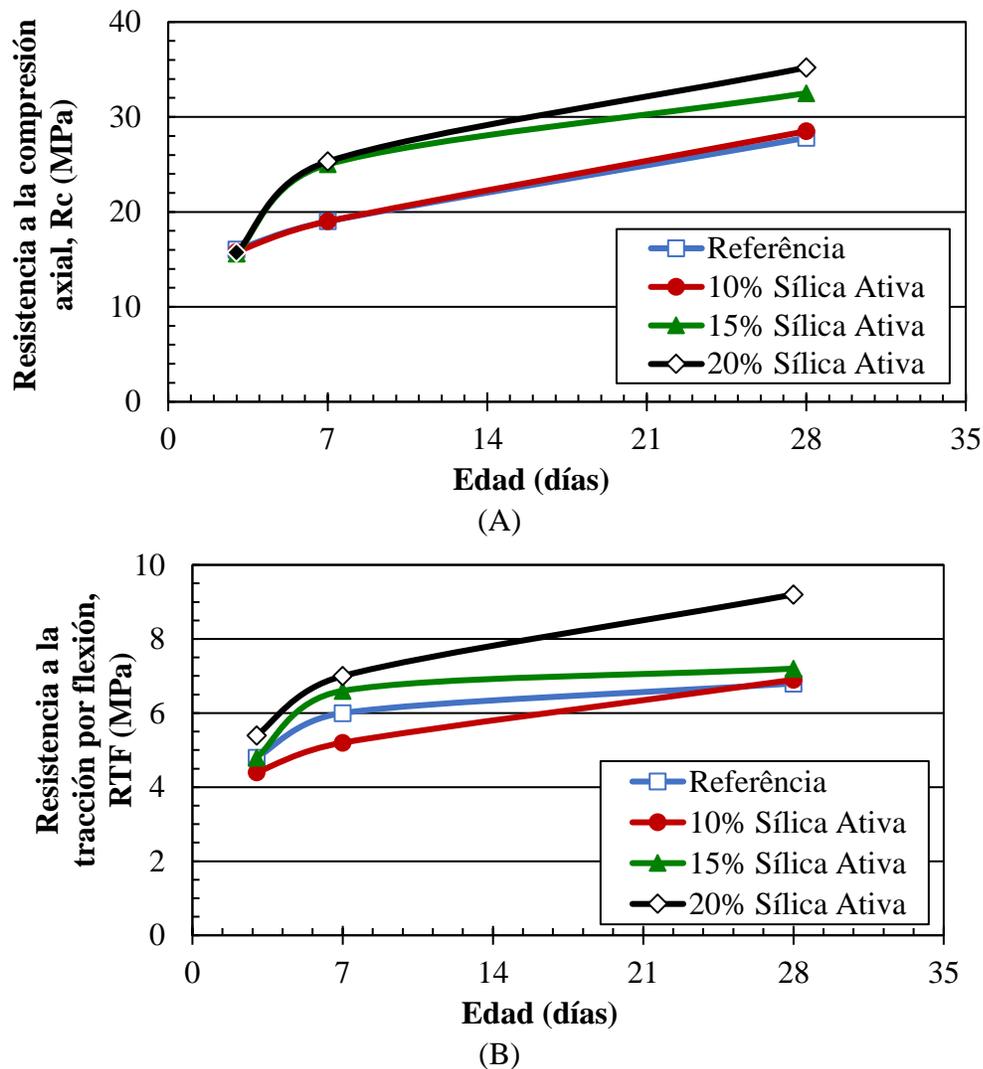


Figura 1. (A) Resistencia a la compresión axial y (B) a tracción por flexión de los morteros conteniendo sílice activa, en sustitución parcial al cemento Portland, en función de la edad.

En los resultados de tracción por flexión, también no se observó aumento significativo de la resistencia de los morteros con la adición. Este comportamiento fue observado por Beltrão (2010) al ensayar probetas de concreto con adición de metacaolín a concentraciones de 6%, 10% y 14%. Según Hassan et al. (2012) los resultados de resistencia a compresión a los 28 días muestran que la adición de cualquier contenido de metacaolín aumenta la resistencia a la compresión del concreto. Por tanto, no hay “linealidad” en la relación entre el contenido utilizado y el aumento de la resistencia, una vez que el concreto con 8% de metacaolín presentó resultados mejores que los

de 11%. Munhoz (2007) también observó un decrecimiento en la resistencia a la compresión cuando son comparados los resultados de las probetas con 5% y 10% de la adición activa, siendo el resultado de 10% el menor presentado, cuando es comparado con las concentraciones de 5% hasta 20%.

Además de eso se observó, una mejora de apenas 7% de la resistencia a la compresión, a partir de la adición de 8% de metacaolín, cuando es utilizado en concentraciones de hasta 25% (Munhoz, 2007). Es posible que haya ocurrido una “saturación del mortero”, esto es la cantidad de adición disponible, permaneció mucho mayor que la cantidad de hidróxido de calcio (producto de la hidratación del cemento). Con esa relación “desproporcional” la reacción puzolánica ocurrirá de manera más lenta, retardando la formación del CSH y resultando, así en un menor aumento de la resistencia con altas concentraciones de adición (Beltrão, 2010).

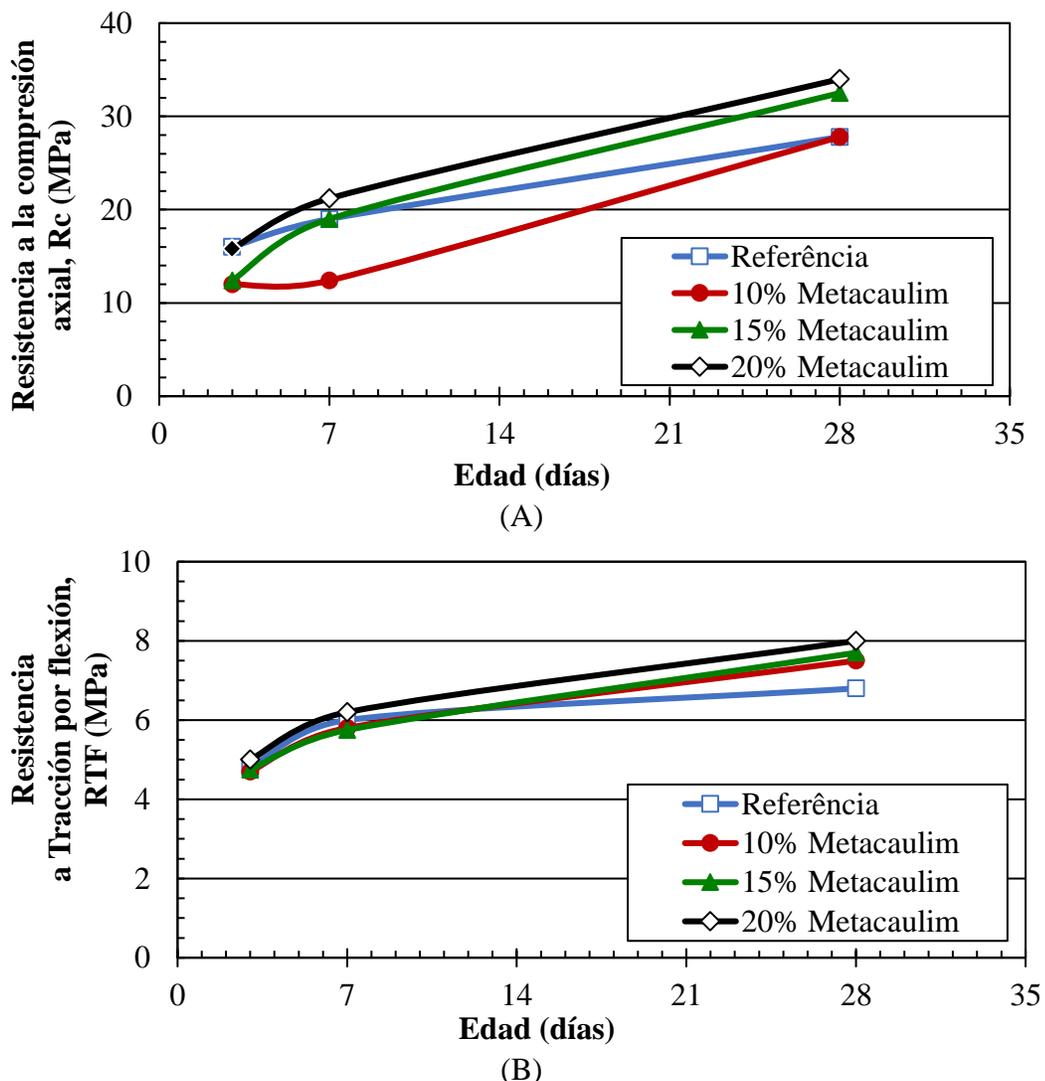


Figura 2. (A) Resistencia a la compresión axial y (B) a Tracción por flexión de los morteros conteniendo metacaolín, en sustitución parcial al cemento Portland, en función de la edad.

El aumento de la resistencia de los morteros con sílice activa y metacaolín ocurre porque la puzolana, juntamente con el hidróxido de calcio, genera compuestos ligantes, de características similares a los compuestos consecuentes de la hidratación directa de los grados de clínquer. Como consecuencia se tiene una estructura más compacta, química y mecánicamente más resistente que

la del cemento Portland común. Así, la presencia de cementos puzolánicos contribuye para una mayor compacidad y resistencia a la compresión luego de 28 días de curado y mayor impermeabilidad al agua (Giordano, 2007).

El uso de la sílice y del metacaolín permitió la obtención de un mortero menos permeable, conforme lo esperado y también observado en estudios de Gomez-Zamorano et al. (2015). A partir de los resultados de caracterización (tabla 3), se tiene que la sílice y el metacaolín son materiales más finos que el cemento, una vez que presentan mayor área superficial. Las partículas más finas de esas adiciones tienden a disminuir la cantidad relativa de poros capilares, actuando en una reducción de la absorción de agua por capilaridad, como lo observado en la Figura 3.

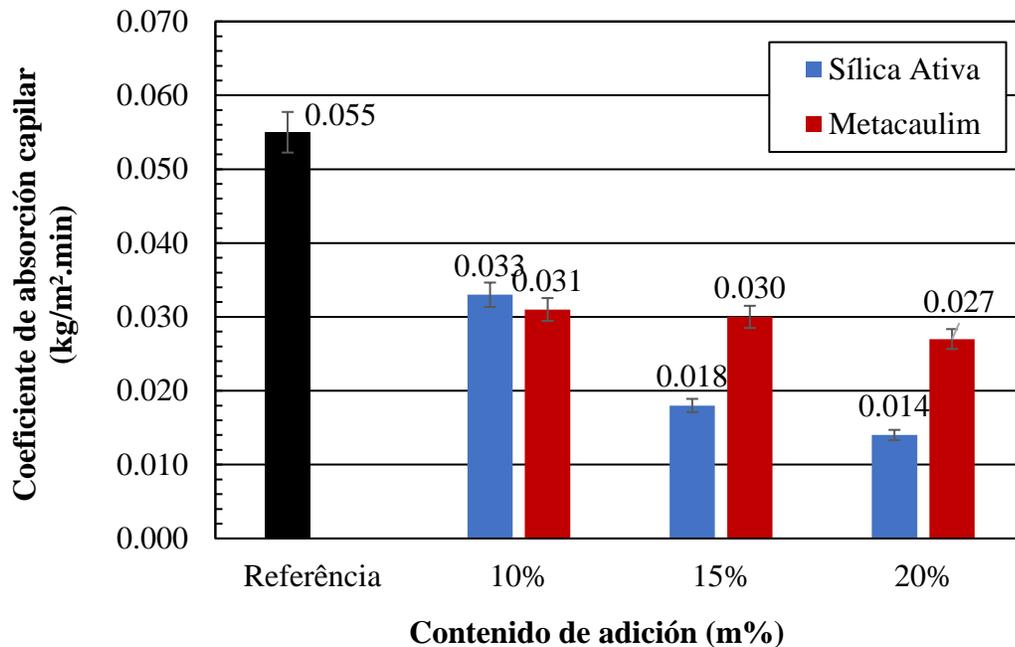


Figura 3. Coeficiente de absorción capilar de los morteros conteniendo sílice activa y metacaolín en sustitución parcial al cemento Portland, luego de 28 días de curado.

La Figura 4 presenta los resultados de densidad y porosidad aparentes para morteros de referencia (sin adición) y conteniendo sílice activa y metacaolín en sustitución parcial al cemento Portland. Se observa que no hay variación significativa en la densidad del mortero al ser sustituido parcialmente el cemento Portland por los materiales puzolánicos, entretanto, se observa un aumento significativo de la porosidad al utilizar sílice y una reducción en la porosidad al utilizar el metacaolín.

Una vez que el metacaolín y la sílice activa son materiales más finos que el cemento, se espera que haya taponado de los poros, además de su refinamiento y consecuentemente, la reducción de la porosidad

Los resultados analizados por Siddique (2011), indican que la utilización de sílice activa reduce la porosidad del concreto, diferente de lo que fue observado en este trabajo. Se cree que el uso del aditivo sin reducción parcial del agua haya influenciado en este comportamiento, ya que a pesar de la relación agua/aglomerante haberse mantenido constante, la relación a/c varió, conforme lo presentado en la tabla 1. Para mayores concentraciones de sílice, se tiene mayor relación a/c y consecuentemente, mayor cantidad de agua en la mezcla. El agua adicional, que no es consumida en la hidratación del cemento, permanece libre en el sistema y al evaporarse, da origen al aumento de la porosidad del mortero.

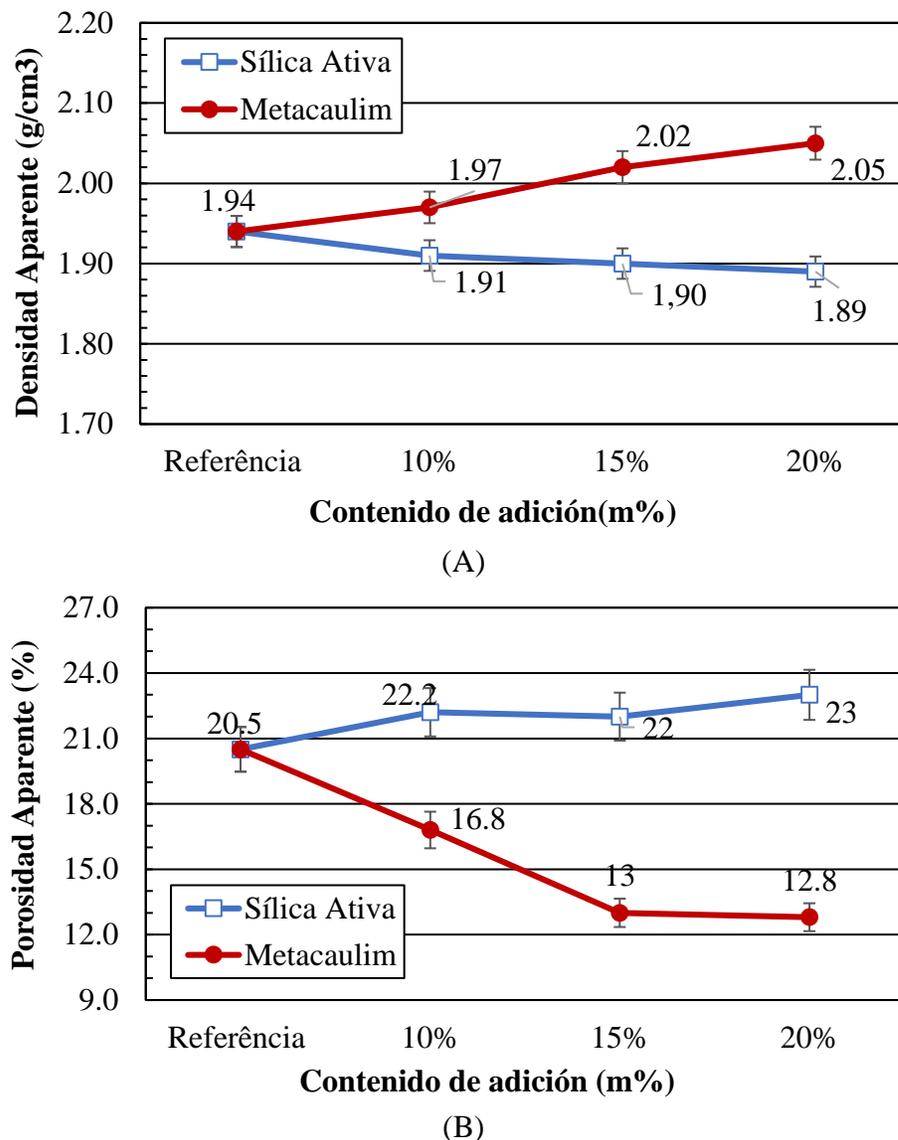


Figura 4. (A) Densidad y (B) porosidad aparente de los morteros conteniendo sílice activa y metacaolín, en sustitución parcial al cemento Portland, luego 28 días de curado.

### 3.3 Determinación de la reactividad de los agregados de la región metropolitana de Salvador

Fueron analizadas algunas arenas y piedras provenientes de depósitos localizados en la región metropolitana de Salvador (RMS) y en Feira de Santana. La Figura 5 presenta los resultados de expansión de las barras de mortero, sometidas al ensayo de RAA, en función del tiempo de ensayo, para diversos agregados gruesos. De acuerdo con la norma NBR 15577:2008, para ensayos de RAA para evaluación de agregados gruesos, estos deben ser triturados, con la finalidad de obtenerse una granulometría deseada y semejante a un agregado fino.

La Figura 6 presenta los resultados de expansión de las barras de mortero, sometidas al ensayo de RAA, en función del tiempo de ensayo, para agregados finos comercializados en la región metropolitana de Salvador (RMS) y en Feira de Santana.

Así, analizando los resultados obtenidos con los agregados utilizados, se observa que, de manera general, los agregados gruesos son reactivos cuanto la reactividad álcalis-agregado, en cuanto que los agregados finos son potencialmente inocuos. Siendo así, hay restricciones en cuanto a la utilización de las piedras en la RMS. Dependerá de las condiciones de humedad y del cemento seleccionado, será necesario utilizar adiciones activas en el concreto para mitigar la RAA.

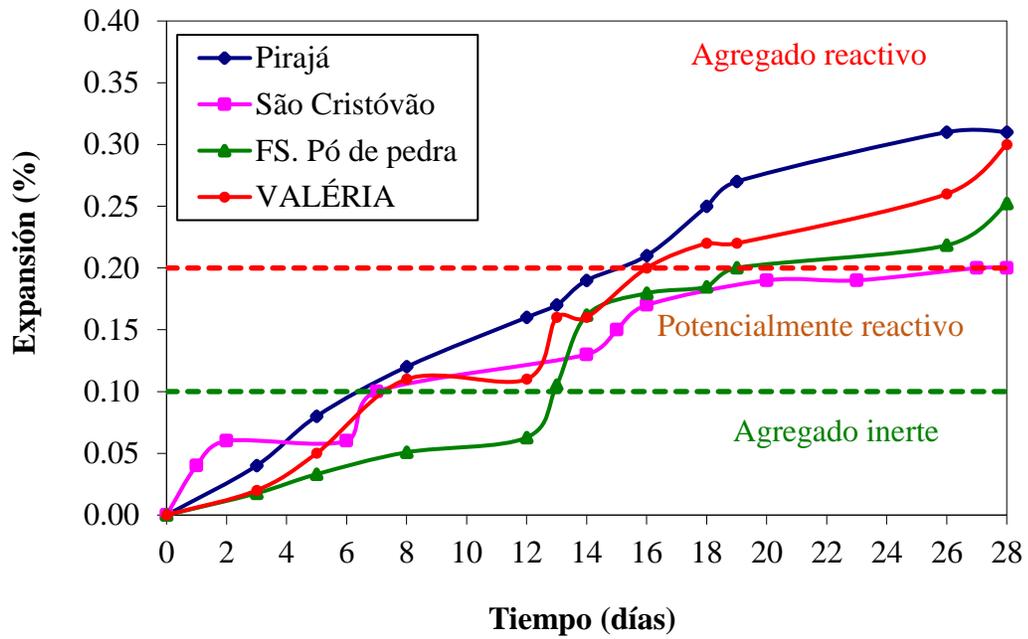


Figura 5. Expansión de las barras, debido a la reacción álcalis-agregado (RAA), en morteros conteniendo agregados gruesos comercializados en Salvador.

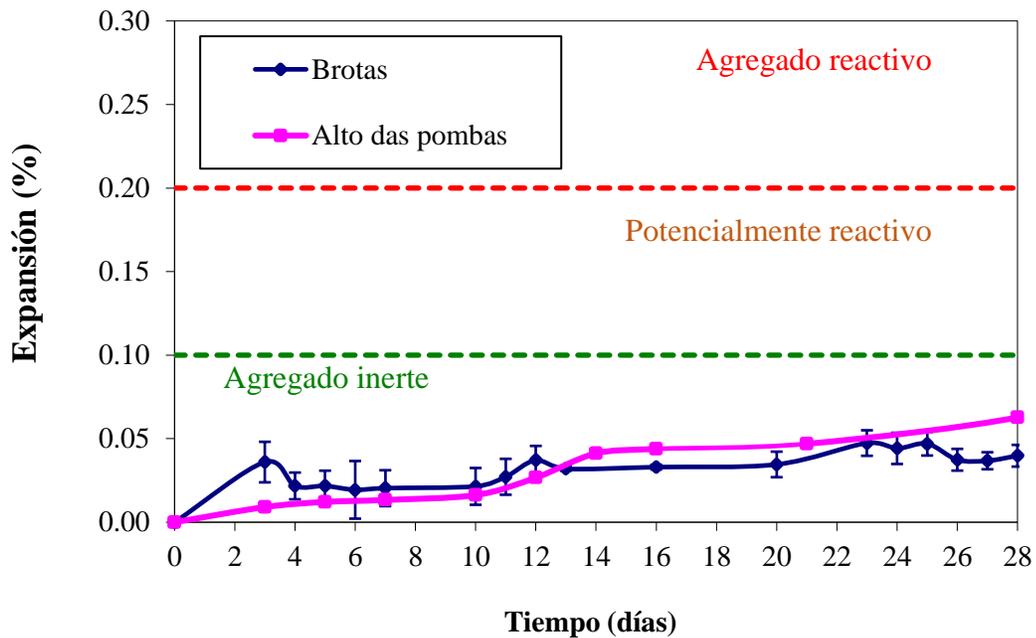


Figura 6. Expansión de las barras, debido a la reacción álcalis-agregado (RAA), en morteros conteniendo agregados finos comercializados en Salvador.

### 3.4 Evaluación de la eficiencia de las adiciones activas en mitigar la RAA

Los resultados de las investigaciones de las expansiones realizadas por el método acelerado, en la presencia de la sílice activo y metacaolín son presentados en las Figuras 7 y 8, respectivamente.

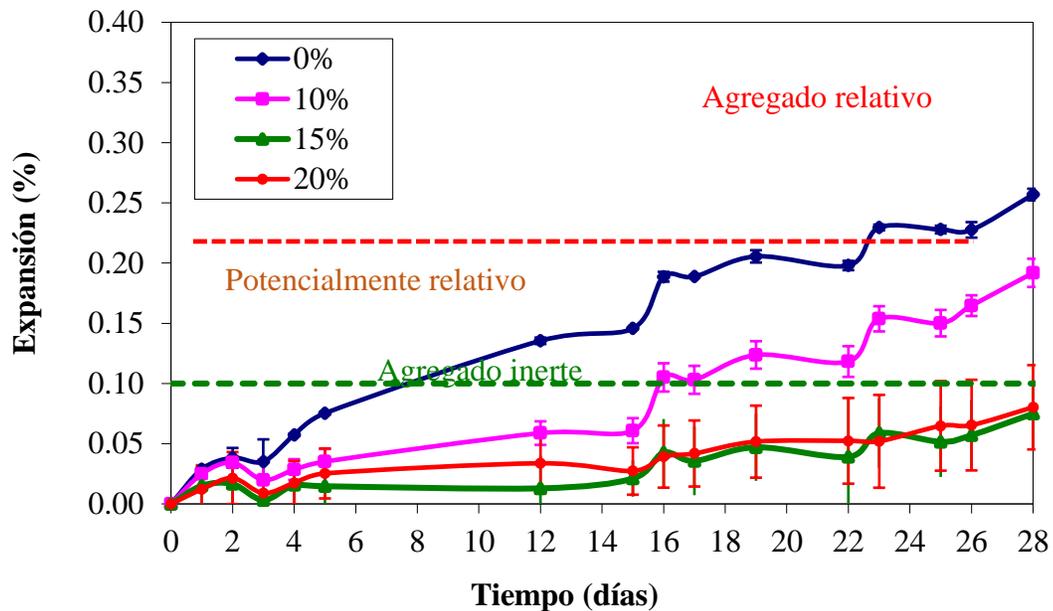


Figura 7. Expansión de las barras, debido a la reacción álcalis-agregado (RAA), en morteros conteniendo adición de 10%, 15% e 20% de sílice activa.

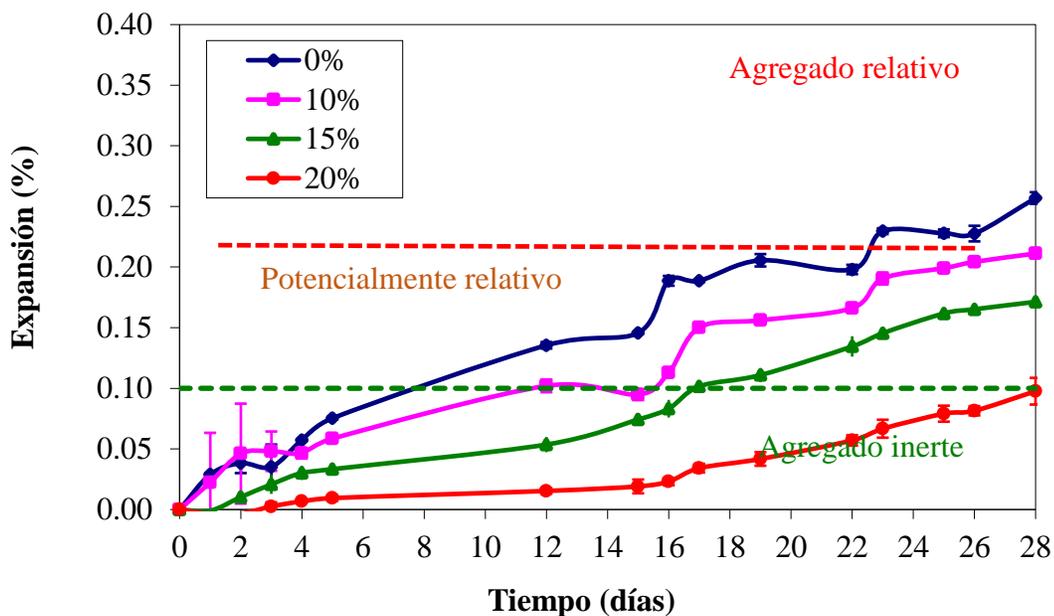


Figura 8. Expansión de las barras, debido a la reacción álcalis-agregado (RAA), en morteros conteniendo adición de 10%, 15%, 20% de Metacaolín.

El comportamiento de las probetas con adición de sílice activa (Figura 7) fue semejante a lo observado por diversos autores (Thomaz, 2011; Hasparyk e Farias, 2013; Lindgard et al., 2012), que verifican que el aumento del contenido de esta adición contribuye para la mitigación de la reacción, debido a las propiedades puzolánicas del material.

Los trabajos citados utilizaron concentraciones máximas de sílice activa entre 12% y 15%, por tanto, en la presente pesquisa, se optó por utilizar concentraciones más elevadas con la intención de verificar si el uso indiscriminado de ese material interfiere en la RAA. Se observó que al alcanzar el contenido de 15%, hubo un estancamiento en la capacidad mitigadora de esta adición. Así al

utilizar concentraciones superiores a este, se espera que no haya una mejoría en el comportamiento del material, pudiendo, inclusive, resultar en un comportamiento invertido, es decir en el aumento de la RAA, ya que una vez que la sílice activa, es una sílice amorfa, y por lo tanto reactiva, se cree que, si es utilizada en exceso, puede ocurrir una “saturación” de ese material en la solución intersticial de los poros de la matriz cementícea. Parte de la sílice activa reaccionará con el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  como un material puzolánico, y la parte en exceso quedará disponible para reaccionar con los álcalis que no fueron incorporados en la estructura del C-S-H.

El comportamiento de las probetas con adición de metacaolín (Figura 8) fue semejante a lo observado por otros autores (Munhoz, 2007; Hasparyk y Farias, 2013). El aumento del contenido de metacaolín contribuyó para la mitigación de la reacción, debido a las propiedades puzolánicas del material. Se observó una creciente reducción en la reactividad a medida en que se adicionó el metacaolín. La norma determina que la comprobación de la mitigación de la reacción será obtenida cuando el resultado del ensayo acelerado en barras de mortero for menor que 0,10 % a los 16 días (França et. al, 2016). Leugo a partir de los resultados obtenidos, es posible prever que utilizando concentraciones de metacaolín superiores a 15%, habrá mayor reducción de la expansión y será posible mitigar la RAA presentada en este agregado, sin embargo, estos resultados solo se mostraron efectivos al adicionar 20% de este material.

Al comparar el desempeño de las adiciones minerales, se observa que la sílice activa se presentó más efectiva en la mitigación de la ocurrencia de las reacciones álcalis-agregado.

#### 4. CONCLUSIONES

A partir de los resultados del presente trabajo, se concluye que:

- Todos los agregados gruesos comercializados en la región metropolitana de Salvador, estudiados en la presente pesquisa, son clasificados como agregados reactivos en cuanto a la ocurrencia de RAA;
- Los agregados finos comercializados en la región metropolitana de Salvador, originados de los depósitos de la región de Camaçari, son clasificados como agregados potencialmente inocuos en cuanto a la ocurrencia de RAA;
- El análisis de desempeño de los morteros ratificó que la utilización de sílice activa y metacaolín mejoran las propiedades de las matrices cementíceas, resultando que los morteros más resistentes a compresión y a tracción por flexión tenían menor permeabilidad;
- La sílice activa mostró capacidad en mitigar las expansiones ocasionadas por la reacción álcalis-agregado, alcanzando el punto de saturación en 15% de adición;
- Cuando es utilizada en exceso puede ocurrir una “saturación” de la sílice activa en la solución intersticial de los poros de la matriz cementícea, así, la cantidad que no reaccionará con el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , en exceso, quedará disponible para reaccionar con los álcalis que no fueron incorporados en la estructura del C-S-H;
- El metacaolín mostró creciente capacidad en mitigar las expansiones ocasionadas por la reacción álcalis-agregado cuando es aplicada en las concentraciones de 10%, 15% y 20%;
- La sílice activa se mostró más efectivo en cuanto a la mitigación de la RAA en comparación al metacaolín.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo de las empresas LC Lacrose, Metacaolín do Brasil, Companhia de Ferro Ligas da Bahia (Ferbasa), Vedacit e Mizu Cementos, que donaron los materiales utilizados en la pesquisa. Agradecemos, también, al Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico y

Tecnológico (CNPq) y la Fundación de Apoyo a Pesquisa del Estado da Bahia (FAPESB) por el soporte financiero.

## 6. REFERENCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1991). *NBR 5732: Cimento Portland comum*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1998). *NBR NM 76: Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar - Método de Blaine*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005). *NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão*. Rio de Janeiro
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2005). *NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão*. Rio de Janeiro
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008a). *NBR 15577: Agregados – Reatividade álcali-agregado. Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado*. Rio de Janeiro
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008b). *NBR 15577: Agregados – Reatividade álcali-agregado. Parte 5: Determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado*. Rio de Janeiro
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012). *NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade*. Rio de Janeiro
- Beltrão, F. C. M. (2010), “*A influência do metacaulim nas propriedades do concreto*”, Trabalho de conclusão de curso. Universidade da Amazônia, Belém, p.44.
- Beyene, M., Snyder, A., Lee, R. J., Blaskiewicz, M. (2013), *Alkali Silica Reaction (ASR) as a root cause of distress in a concrete made from Alkali Carbonate Reaction (ACR) potentially susceptible aggregates*. *Cement and Concrete Research*. 51(9). 85-95. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.04.014>
- Campos, R. N. (2015) “*Durabilidade em concretos contendo cinza de biomassa contendo elevado teor de álcalis*”, Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, p. 89.
- França, D. F. S., Rey, R. O., Ferreira, L. R. C., Ribeiro, D. V. (2016) *Avaliação da reologia, da RAA e das propriedades de argamassas no estado fresco utilizando cinza de eucalipto como substituição parcial ao cimento Portland*. *Ambiente Construído*, 16 (3), 153-166, DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212016000300098>
- Gamino, A. L. (2003), “*Reações álcali-agregado: análise da potencialidade de ocorrência em agregados utilizados no laboratório de engenharia civil da FEI/UNESP*”. In: V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, pp. 42-54.
- Giordano, B. L. (2007), “*Estudo da reação álcali-agregado dos agregados da região metropolitana de Belém*”. Trabalho de conclusão de curso. Universidade da Amazônia, Belém, p. 47.
- [Gomez-Zamorano, L. Y.](#), [Iniguez-Sanchez, C. A. E.](#), [Lothenbach, B.](#) (2015), *Microestructura y propiedades mecánicas de cementos compuestos: Efecto de la reactividad de adiciones puzolánicas e hidráulicas*. *Revista ALCONPAT*, 5 (1), 18-30. DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v5i1.74>
- Hasparyk, N. P., Farias, L. A. (2013), “*Comportamento de adições e aditivos na expansão da reação álcali-agregado – Um estudo envolvendo reologia*”. In: 55º Congresso Brasileiro de Concreto, pp. 1-12.

- Hassan, A. A. A., Lachemi, M., Hossain, K. M. A. (2012), *Effect of metakaolin and silica fume on the durability of self-consolidating concrete*. Cement and Concrete Composites, 34(6), 801– 807. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.02.013>
- Lindgard, J., Andiç-Çakir, O., Fernandes, I., Ronning, T. F., Thomas, M. D. A. (2012). *Alkali-silica reactions (ASR): Literature review on parameters influencing laboratory performance testing*. Cement and Concrete Research, 42(2), 223-243. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.10.004>
- Munhoz, F. A. C. (2007), “*Efeito de adições ativas na mitigação das reações álcali-sílica e álcali-silicato*”. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 108 p.
- Siddique, R. (2011), *Utilization of silica fume in concrete: Review of hardened properties*, Resources, Conservation and Recycling, 55 (11) 923–932. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.06.012>
- Thomas, M. (2011), *The effect of supplementary cementing materials on alkali-silica reaction: A review*. Cement and Concrete Research, 41(12), 1224–1231. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.11.003>