

Estudo da Carbonatação Acelerada em Argamassas do CAA com Elevados Teores de Adições Minerais

Aretuza Karla A. Rocha¹, Hugo Alessandro A. Diniz², Marcos Alyssandro S. Anjos³, Normando P. Barbosa⁴, Anne Raquel C. Araújo⁵

¹Departamento de Arquitetura/ Universidade Federal de Roraima (UFRR)

²Departamento de Construção Civil / Instituto Federal De Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

³Departamento de Engenharia Civil/ Instituto Federal De Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB)

⁴Pósgraduação em Engenharia Civil e Ambiental/ Universidade Federal da Paraíba (UFPB)

⁵Aluna do Departamento de Engenharia Civil/ Universidade Federal do Rio grande do Norte

aretuza.karla@ufrr.br, hugo.almeida@ifce.edu.br,
nperazzob@yahoo.com.br, marcos.alyssandro@gmail.com,
anneraquel@ufrn.edu.br

Abstract. *This article evaluates carbonation, pozzolanic activity index and compressive strength in self-compacting concrete mortars (CAA) when replacing cement with mineral additions (Metakaolin, Rice Husk Ash and Sugar Cane Biomass Ash) and adding hydrated lime (calcium hydroxide) for alkaline replacement. The objective was to evaluate the influence of additions on carbonation using DRX, TG and carbonation depth (in an accelerated chamber). A small pozzolanicity of mineral additions was observed due to the reduction of portlandite peaks and higher carbonation front. The hydrated lime did not show good interaction with sugarcane ash, increasing the carbonation depth. However, the mixes with additions had depths smaller than the reference. In terms of compressive strength, the results were lower, however, with small losses, making the use of the mixtures viable.*

Resumo. *Este artigo avalia a carbonatação, o índice de atividade pozolânica e a resistência à compressão em argamassas de concretos autoadensáveis (CAA), na substituição do cimento por adições minerais (Metacaulim, Cinza da casca de arroz e Cinza da biomassa da cana de açúcar), acrescentando a cal (hidróxido de cálcio) para reposição alcalina. O objetivo foi avaliar a influência das adições na carbonatação por meio DRX, TG e profundidade de carbonatação (em câmara acelerada). Observou-se uma pequena pozolanicidade das adições minerais pela redução dos picos de portlandita e maior frente de carbonatação. A cal não apresentou boa interação com a cinza da cana de açúcar elevando a profundidade de carbonatação. Contudo, os traços com as adições apresentaram profundidades menores a referência. Já na resistência à compressão os resultados foram inferiores, porém, com pequenas perdas, tornando viável a utilização das misturas.*

1. Introdução

A indústria da construção civil é uma grande consumidora de recursos naturais, desde a extração de agregados (areia e brita) até a produção do cimento Portland, o qual contribui negativamente nas emissões de gases responsáveis pelo efeito estufa (PERLOT *et al.*, 2013 e MIKULČÍČ *et al.*, 2016), em percentuais acima de 60% da produção mundial (SCRIVENER, *et al.*, 2018).

Uma maneira de reduzir esses impactos é utilizar adições minerais como substituição parcial do cimento. O uso dessas adições minerais, quando dosado corretamente, proporciona melhora da trabalhabilidade, além de benefícios econômicos e redução da poluição ambiental (UYSAL e YUMAS, 2011).

Podem ser utilizadas adições minerais inertes ou pozolânicas, mas cada tipo de adição tem efeitos diferentes nas propriedades da argamassa no estado fresco, endurecido e na sua durabilidade, com suas vantagens e desvantagens. Suas vantagens podem ser exploradas através da combinação de várias adições minerais, incrementando assim o nível de substituição do cimento (LE e LUDWIG, 2016).

Materiais pozolânicos contribuem para a melhoria das propriedades ligantes, dada a sua capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio, gerado pela hidratação do cimento, para produzir hidratos semelhantes aos do cimento hidratado responsável pelo desenvolvimento das resistências mecânicas também contribuem para a qualidade do produto cimentício pelo adensamento da matriz aglutinante, selando os poros e reduzindo o ataque de agentes externos (MEDINA, 2011).

A carbonatação é um fenômeno que se verifica no concreto, devido a reações internas por conta da penetração do gás carbônico no interior da massa dos materiais. Ocorre com a redução da durabilidade do concreto armado, por meio da penetração do dióxido de Carbono (CO_2), presente na atmosfera sob forma gasosa nos poros do concreto (OLLIVIER e VICHOT, 2014).

A reação de carbonatação não é prejudicial para as propriedades mecânicas de materiais comuns à base de cimento Portland, porém, a carbonatação causa uma redução na alcalinidade da solução de poros para a cobertura de concreto, que é considerada uma degradação química em relação à estrutura das barras de aço do concreto armado (QIU, 2020). Com a presença de água, o dióxido de carbono reage com os compostos alcalinos resultantes da hidratação do cimento, reduzindo o pH interno da matriz cimentícia.

No ambiente alcalino, sobre o aço forma-se película protetora que não o deixa oxidar. Diz-se que a armadura do concreto armado fica no estado passivo. Quando o gás carbônico (CO_2) penetra no interior dos poros, o contato com a água produz ácido carbônico (H_2CO_3). Esse ácido carbônico, ao reagir com o hidróxido de cálcio, produz carbonato de cálcio (CaCO_3).

O objetivo desse trabalho é avaliar o efeito da substituição de cimento Portland por resíduos agroindustriais como as cinzas do bagaço da cana-de-açúcar (SCBA), as cinzas da casca de arroz (RHA) e o metacaulim (MK), sem e com adição da cal (hidróxido de cálcio), na argamassa do concreto autoadensável, com ênfase na carbonatação.

2. Referencial Teórico

Diversas opções são comumente utilizadas como substituintes do cimento como a cinza volante, fíler calcário, escórias e cinzas de bagaços finos (DOSSCHE *et al.*, 2016). Dentre as cinzas, apresentam-se como potenciais adições, a cinza da biomassa da cana de açúcar (SBCA), otimizando a viscosidade e a estabilidade no estado fresco (SUA-IAM e MAKUL, 2017) e a cinza da casca do arroz (RHA).

Quando a RHA é aplicada em argamassa, a resistência à compressão da aumenta significativamente devido às ações de enchimento e pozolânica. No entanto, a reação pozolânica do RHA aumenta pouco a resistência a compressão aos 7 e 14 dias. A reação pozolânica do RHA depende do tamanho das partículas, idade e porcentagens de substituição do cimento. A reação pozolânica da argamassa misturada com RHA ocorre quase que em dobro após 90 dias de cura, (JAMIL *et al.*, 2016).

Estas cinzas apresentam em sua composição alto teor de sílica (SiO_2), o que torna uma fonte suplementar para uso como aditivo mineral ou pozolana para a produção de materiais cimentícios (ANJOS, 2009).

O metacaulim também pode utilizado com adição, sendo constituído por sílica e alumina (Al_2O_3) amorfas, sendo capaz de reagir com o hidróxido de cálcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, para produzir novos compostos hidratados como o C-S-H.

Anjos *et al.*, (2020) produziram concretos autoadensáveis com consumo de cimento de apenas 120 kg/m^3 e 200 kg/m^3 , com adições minerais de metacaulim e cinzas volantes. A difração de raios X mostrou que os principais produtos hidratados formados foram a gismondina e o C-S-H, e a Portlandita foi totalmente consumida em algumas misturas, exceto nas mistura com cinzas volante e cal hidratada.

As adições minerais podem elevar a resistência e resistividade elétrica, entretanto, por sua pozolanicidade, consomem hidróxido de cálcio, reduzindo o pH do concreto e tornando o aço mais suscetível a corrosão. A carbonatação é um processo de deterioração do concreto. Sua profundidade de penetração normalmente é usada para estimar a vida útil do concreto. Entre os fatores mais importantes que podem afetar significativamente a resistência à carbonatação do concreto estão a umidade relativa (UR) e a relação cimento água (ELSALAMAWY, *et al.*, 2019).

A resistência a compressão dos concretos para todas as proporções de mistura aumentou com a idade de cura e diminuíram com o aumento da substituição do SCBA. A redução na resistência à compressão em 10%, 20% e 30% de substituição de cimento por SCBA, em comparação com o concreto referência, foi de 16,8%, 25% e 35,5%, respectivamente, (JOSHAGHANI e MOEINI, 2017).

Safiuddin, *et al.* (2010) utilizaram substituições de cimento por cinza da casca do arroz em até 30%. O resultado do seu estudo mostrou que o aumento do teor de cinza da casca do arroz na mistura elevou consideravelmente (mais de 10%) a resistência à compressão, e de maneira mais branda a velocidade do pulso ultrassônico

Para Kannan (2018), a resistência à compressão aos 28 e 90 dias em CAA's com 5% a 30% de metacaulim e obtiveram o melhor resultado com 15% de substituição. Ele estudou também a interação com o RHA e verificou que a mistura ternária com até 40% de substituição apresentou bons resultados.

3. Metodologia

3.1. Caracterização dos Materiais

A curva granulométrica do agregado miúdo, foi obtida através do ensaio de peneiramento e está apresentada na Figura 1. A massa específica foi retida conforme a ABNT NBR NM 52 (2009).



Figura 1. Caracterização da Areia

Na Tabela 1 estão caracterizados o diâmetro máximo, o módulo de finura e a massa específica da areia.

Tabela 1. Caracterização da Areia

Caracterização	Valor	Unidade	Norma
Diâmetro máximo	2,40	mm	NBR NM 248 (2003)
Módulo de Finura	2,20	-	NBR NM 248 (2003)
Massa Específica	2,65	Kg/dm ³	NBR NM 52 (2009)

3.2. Área Superficial dos Finos (BET)

A área superficial do cimento Portland e das adições minerais foram obtidas pelo ensaio do método Brunauer, Emmett e Teller (BET). Para a realização deste ensaio retirou-se uma grama de cada material, seco em estufa, e enviado ao Laboratório feito em equipamento da JAPAN modelo BELSORP-mini II.

Tabela 2. Área Superficial dos Materiais Finos

Material	Superfície Específica (m ² /g)
Cimento	1,70
SCBA	54,26
RHA	16,04
MK	16,11
Cal	10,64

3.3. Composição Química

A mineralogia dos materiais finos foi avaliada através do ensaio de Difratomia de Raios X (DRX) e está apresentada na Figura 2.

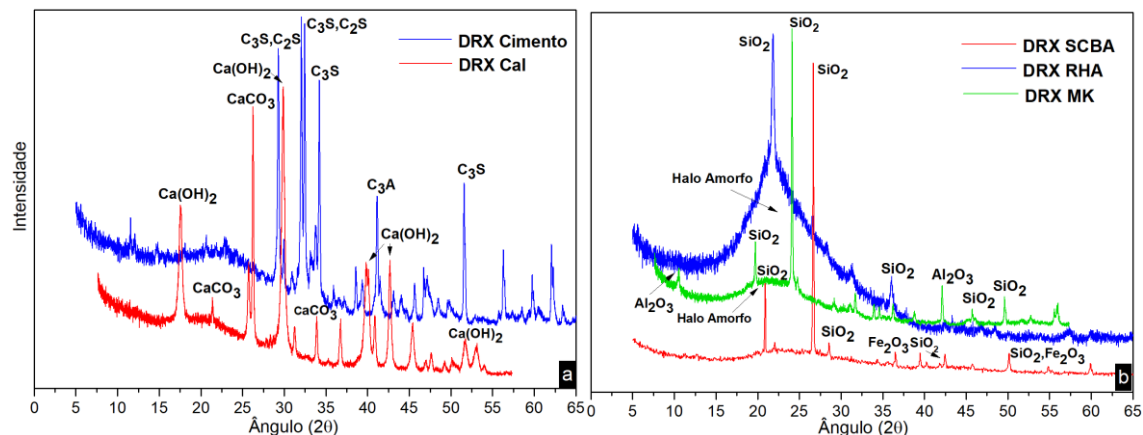


Figura 2. DRX Finos: a) cimento e cal; b) SCBA, RHA e metacaulim

Os ensaios foram realizados utilizando equipamento Eco D8 ADVANCE da marca Bruker, com fonte de radiação anodo de Cobre (Cu-), tensão aplicada de 40 kv, potência de 1000W e corrente de 25 mA. A velocidade de coleta dos dados no goniômetro realizou-se à $0,025^{\circ}2\theta$, com tempo de passo de 0,5 segundos. A faixa varrida coletou dados entre 5 à $60^{\circ}2\theta$ com filtro de Nitrogênio. A composição química dos materiais foi feita através do ensaio de Fluorescência de Raios X (FRX), conforme Tabela 3.

Tabela 3. FRX dos Materiais Finos (%)

Óxido	CIM	SBCA	RHA	MK	CAL
CaO	61,39	2,47	0,94	0,45	97,20
SiO ₂	19,13	60,04	92,42	53,92	1,32
Fe ₂ O ₃	3,65	25,78	0,09	9,90	0,47
SO ₃	3,26	0,34	0,13	0,22	0,13
Al ₂ O ₃	3,99	3,08	2,01	30,34	0,40
MgO	3,15	1,02	0,00	0,00	0,00
K ₂ O	0,52	3,39	0,00	2,25	0,40
Outros	4,91	3,88	4,40	2,92	0,08

3.4. Traços das Argamassas dos concretos autoadensáveis

Os traços foram definidos no intuito de produzir as argamassas dos concretos autoadensáveis, com baixos teores de cimento Portland. A mistura de referência foi definida a partir de um concreto autoadensável previamente testado no laboratório (Diniz, 2018), retirando apenas o seu agregado graúdo. A Tabela 4 indica as misturas unitárias em massa das argamassas testadas na pesquisa incluindo a mistura referência. A quantidade do aditivo superplastificante Glenium SCC 160 (Baf) foi definida por meio de teste de espalhamento mini *Slump Test*, no intuito de padronizar a abertura do espalhamento de $300\text{mm} \pm 50\text{mm}$, devido as adições agirem como modificadores de viscosidade.

Tabela 4. Proporção das Misturas

ID	COMPONENTES (Kg/m ³)						
	CIM	SCBA	RHA	MK	CAL	AREIA	ÁGUA
REF	719,90	0,00	0,00	0,00	0,00	1180,64	316,76
S40	411,82	274,55	0,00	0,00	0,00	1125,65	302,00
S40C10	373,47	248,98	0,00	0,00	62,25	1122,91	301,27
R40	415,52	0,00	277,01	0,00	0,00	1135,75	304,71
R40C10	376,51	0,00	251,01	0,00	62,75	1132,04	303,72
M40	424,09	0,00	0,00	282,73	0,00	1159,18	311,00
M40C10	383,53	0,00	0,00	255,69	63,92	1153,16	309,38

3.5. Moldagem das Argamassas do CAA

Para cada traço foram confeccionados corpos de prova em moldes cilíndricos de PVC com 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura, e corpos de prova em moldes cúbicos de acrílico de 5 cm de aresta. A Tabela 5 apresenta a sequência de inserção dos materiais em uma argamassadeira de 5 litros com velocidades padronizadas pela ABNT NBR 13281 (2005). Nas primeiras vinte e quatro horas, após moldagem, os corpos de prova foram mantidos dentro das fôrmas para não perderem umidade. Após esse período, foram desmoldados, identificados e colocados em imersão em água saturada com cal por 28 dias para evitar a decomposição do CH de dentro do concreto e, por último, secaram ao ar livre por 14 dias.

Tabela 5. Sequência de Inserção dos Materiais

Ordem	Materiais	Tempo (seg)
1	50% da areia + 50% da água	30
2	Cimento + Metacaulim + 50% da areia + 30% da água	60
3	50% do aditivo	90
4	SCBA ou RHA + CH + 20% da água + 50% do aditivo	120

3.6. Ensaios no Estado Endurecido

3.6.1. Índice de Atividade Pozolânica (IAP)

A atividade pozolânica foi realizada pelo método com a cal conforme a norma ABNT NBR 12653 (2014), onde foi obtida a consistência padrão e realizado o ensaio de compressão aos 7 dias.

3.6.2. Resistência à Compressão

Para este ensaio, foram confeccionados 3 corpos de prova cilíndricos para cada idade, sendo rompidos à compressão axial em 3, 7, 28 e 70 dias a partir da data de moldagem. O resultado final da resistência a compressão, em MPa, é a média aritmética das 3 amostras para cada data.

3.6.3. Difractometria de Raios X (DRX)

Para o ensaio de DRX as amostras foram coletadas rompendo-se um corpo de prova e destorroando-o em um almofariz de porcelana com a mão de Gauss. Após, as amostras

foram peneiradas (*mash* 200) aproveitando-se as partículas passantes. As especificações do equipamento são as mesmas da caracterização dos finos.

3.6.4. Termogravimetria (TG)

As análises de Termogravimetria foram realizadas em uma termo balança TGA-60, fabricada pela empresa Shimadzu. As amostras foram submetidas a uma atmosfera de gás Nitrogênio com vazão de 50 ml por minuto. As amostras ensaiadas possuíam aproximadamente 10 miligramas e os cadinhos utilizados para suporte são de Alumina. Aplicou-se uma taxa de aquecimento de 10°C /minuto, com temperatura inicial de 20°C e final de 800°C, em função do material do cadinho.

3.6.5. Profundidade de Penetração de CO₂

O ensaio de carbonatação acelerada testou as argamassas dos CAAs em um ambiente agressivo de exposição ao CO₂ buscando entender sua influência com o uso das adições. As amostras após desmoldadas foram submetidas a um processo de cura por imersão em tanque de cura até os 28 dias de idade. Após, as amostras foram secas ao ar livre por mais 14 dias, totalizando 42 dias. Nesta mesma idade elas foram colocadas dentro da câmara de carbonatação. A avaliação da carbonatação foi feita em 5 idades diferentes, contadas a partir do dia que entraram na câmara: 0 dias (ao entrar na câmara) e 3, 7, 14 e 28 dias (após entrar na câmara). A concentração foi de CO₂, 10% ± 0,5%, temperatura de 20±2°C e umidade relativa de 55±5%. Para cada idade foram confeccionados 3 corpos de prova cúbicos de 5 cm de aresta. A profundidade foi mensurada através do indicador Fenolftaleína.

4. Resultados

4.1. Índice de atividade pozolânica (IAP)

O IAP (Figura 3) foi realizado para contribuir com as considerações acerca do comportamento dos traços com adições. Apenas o metacaulim apresentou resistência acima de 6 MPa, valor normativo de referência para atribuir pozolanicidade a adição mineral.

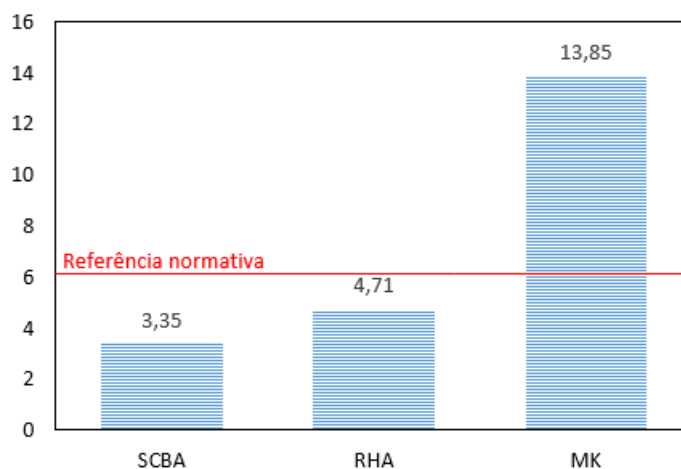


Figura 3. Resistência à compressão para IAP (MPa)

Apesar do RHA não ter obtido o valor de 6 MPa, nos resultados do DRX que serão apresentados na próxima seção, ele apresentou um comportamento reativo. Esta reatividade é coerente com Fapohunda, *et al.* (2017), os quais apresentam trabalhos onde o RHA também possui pozolanicidade.

4.2. Difratometria de Raios X (DRX) e Termogravimetria (TG)

Foram realizados ensaios das amostras de todos os traços, nas condições antes e depois de entrar na câmara de CO₂. Esses ensaios permitiram inferir sobre a influência da carbonatação na formação dos produtos hidratados.

No DRX da mistura REF (Figura 4) os picos de portlandita diminuíram após serem submetidos à carbonatação na câmara e próximos aos ângulos onde, aos 0 dias, apontou-se hidróxido de cálcio (CH), surgiram os picos de calcita, indicando a ocorrência da carbonatação.

Os picos de CSH se mantiveram, assinalando para uma possível reação preferencial do CO₂ com o hidróxido de cálcio. Essa reação, segundo Sáez del Bosque *et al.* (2020), ocorre porque termodinamicamente ela é prioritária em relação a decomposição do CSH. Na Termogravimetria há um comportamento semelhante de redução da portlandita e acréscimo da calcita, corroborando com o resultado do DRX.

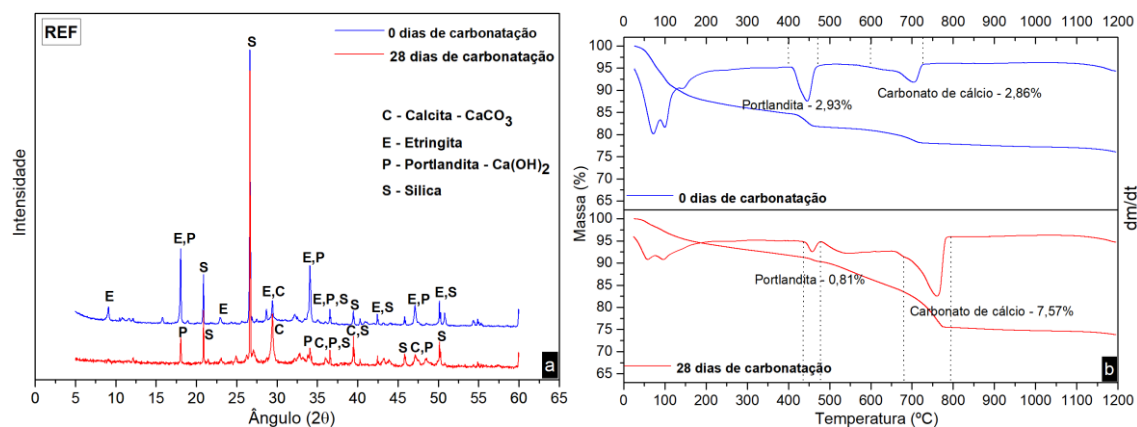


Figura 4. Análise do REF: a) Difratometria e b) Termogravimetria

Os picos de portlandita, no DRX, também reduziram no traço S40 (Figura 5), atrelados ao surgimento de calcita. Houve a indicação de carbonatação também nos aluminatos hidratados, em função destes compostos estarem presentes em maiores quantidades por causa da adição do SCBA. Percebe-se também que com a adição há diferentes compostos formados, como o silicoaluminato de cálcio hidratado.

A TG apresentou resultado condizente com o DRX, manifestando uma redução da perda de massa na zona dos aluminatos e da portlandita e incremento no pico da derivada na região do carbonato de cálcio.

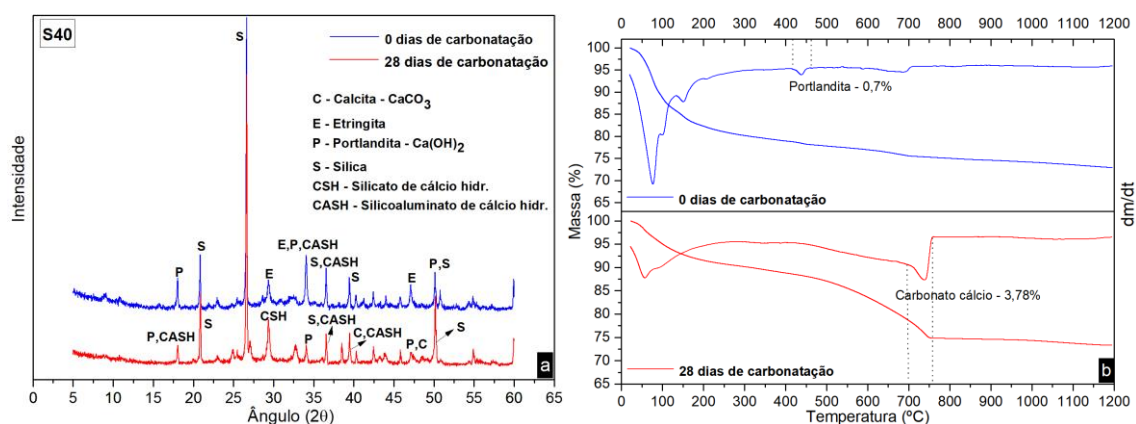


Figura 5. Análise do S40: a) Difratometria e b) Termogravimetria

A mistura S40C10, Figura 6, apresentou comportamento semelhante ao S40, onde houve a redução dos picos da portlandita e dos aluminatos e, após a carbonatação, formação da calcita. O DRX apresentou um pico de vaterita, cristal instável formado no início do surgimento da calcita, indicando que a reação de carbonatação está ocorrendo. Entretanto, a presença da cal elevou a intensidade dos picos de CH, em relação ao S40, indicando uma maior formação desse cristal.

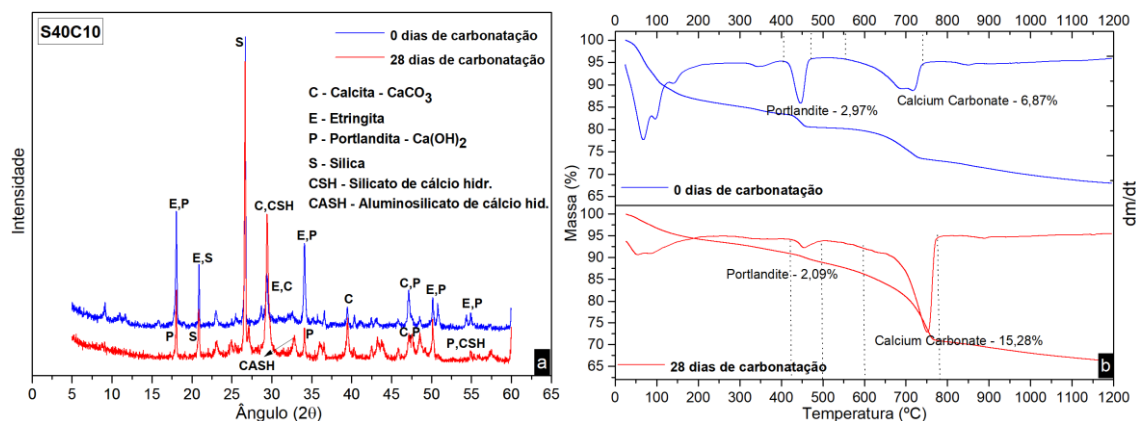


Figura 6. Análise do S40C10: a) Difratometria e b) Termogravimetria

Essa maior quantidade de portlandita ocasionou em uma maior produção de carbonatos de cálcio na TG, a qual apresentou uma perda de massa muito maior, comparando com S40. Esse comportamento da cal, atrelado ao resultado do IAP, pode explicar o porquê da profundidade de carbonatação do S40C10 ter sido maior que do S40. O SCBA não sendo pozolânico, não consumiu a cal nos primeiros 42 dias.

Assim, esta ficou disponível em toda a matriz cimentícia e por reagir facilmente com o CO_2 permitiu o avanço da carbonatação. É importante ressaltar que isto pode ter sido facilitado pela maior porosidade das misturas com SCBA, uma vez que as resistências foram bem mais baixas em relação as demais.

Na amostra R40 (Figura 7), mesmo aos 0 dias, há pouca intensidade dos picos de Portlandita, um maior aparecimento e elevação dos picos do CSH, em relação aos traços anteriores, e também há formação do silicoaluminato de cálcio hidratado. Estes três fatos atribuem uma reatividade pozolânica ao RHA, divergindo com o resultado do IAP, porém consonante à outras pesquisas, como supracitado.

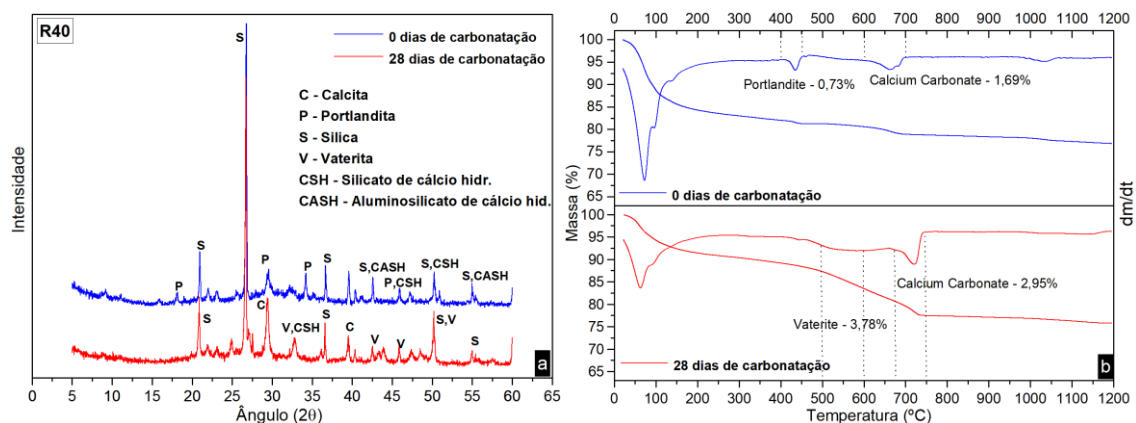


Figura 7. Análise do R40: a) Difratometria e b) Termogravimetria

Os picos de calcita também são pequenos, indicando que o consumo da portlandita na reação pozolânica reduz o processo de carbonatação. A TG valida essa afirmativa, onde há redução da portlandita, acréscimo da calcita e surgimento da vaterita. No entanto, os picos de CSH sumiram após a carbonatação, indicando que foram consumidos no processo.

Isto é um ponto negativo, visto que o CSH é o principal produto hidratado do cimento, tornando a carbonatação mais agressiva a este concreto. Todavia, os testes de resistência mostraram que os concretos com RHA são bem resistentes, por possuir uma menor porosidade.

A mistura R40C10, apresentada na Figura 8, tem comportamento semelhante ao R40, contudo há picos bem maiores de calcita. Isso comprova que a presença da cal favorece a formação tanto da calcita quanto da Vaterita, assim como ocorreu no traço S40C10. A presença da cal faz com que a carbonatação aconteça por um período maior, pois aparecem pequenos picos de vaterita.

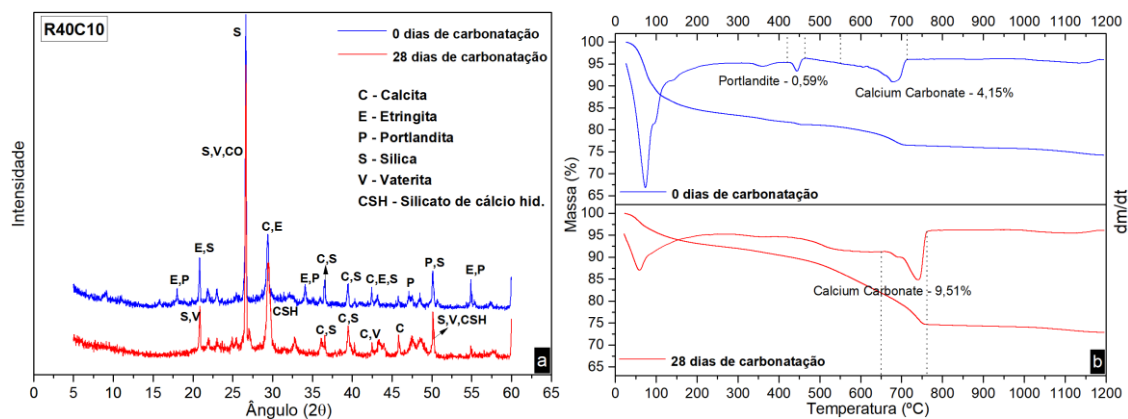


Figura 8. Análise do R40C10: a) Difratometria e b) Termogravimetria

A Termogravimetria apresenta a elevação do carbonato de cálcio, comprovando a ocorrência da carbonatação. A profundidade de penetração do CO₂ corrobora para o efeito negativo da cal, contudo como a resistência foi alta, atribui-se uma menor porosidade e a diferença de profundidade é pequena.

O traço M40 (Figura 9) apresentou poucos picos de portlandita, indicando que o metacaulim, assim como no RHA, a pozolanicidade desta adição. Nesta mistura os picos

daquele cristal são menos intensos, o que aduz a uma quantidade ainda menor. Este resultado é coerente com o IAP, onde o metacaulim apresentou 13 MPa, atribuindo uma alta pozolanicidade ao mesmo. Há formação também de novos aluminatos, em decorrência da composição do metacaulim. Com pouca portlandita o CSH é consumido, e isso pode ser observado aos 37°, quando o CSH é todo convertido em calcita.

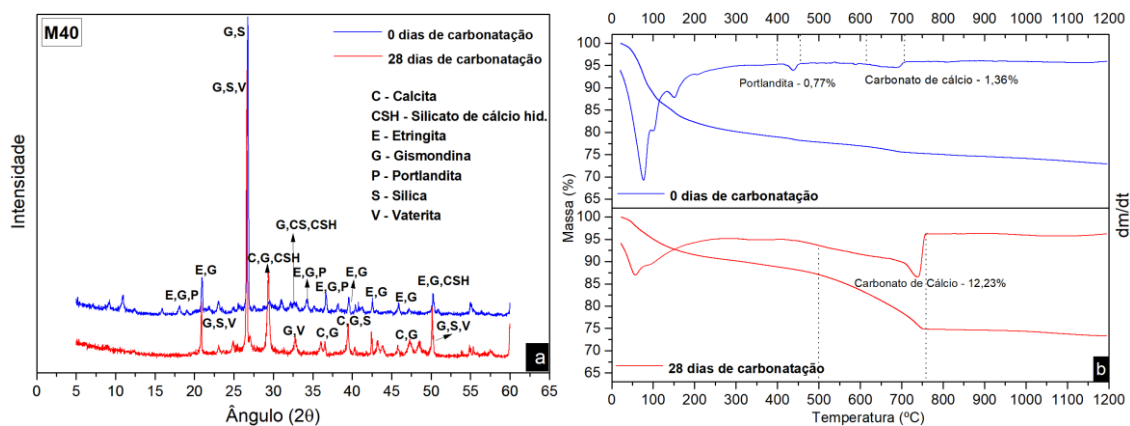


Figura 9. Análise do M40: a) Difratometria e b) Termogravimetria

O M40C10, Figura 10, tem um comportamento semelhante ao R40C10. Os picos de calcita são bem mais elevados em função da presença da cal. Há presença também da vaterita, indicando novamente que a cal mantém a reação de carbonatação. No entanto, nos traços com metacaulim há maior carbonatação dos aluminatos hidratados pela composição da adição. Percebe-se isso pois picos onde tinha o SAC, por exemplo aos 48°, se converteu em calcita. Na TG isto pôde ser observado também, o pico na faixa dos aluminatos não aparece na amostra carbonatada.

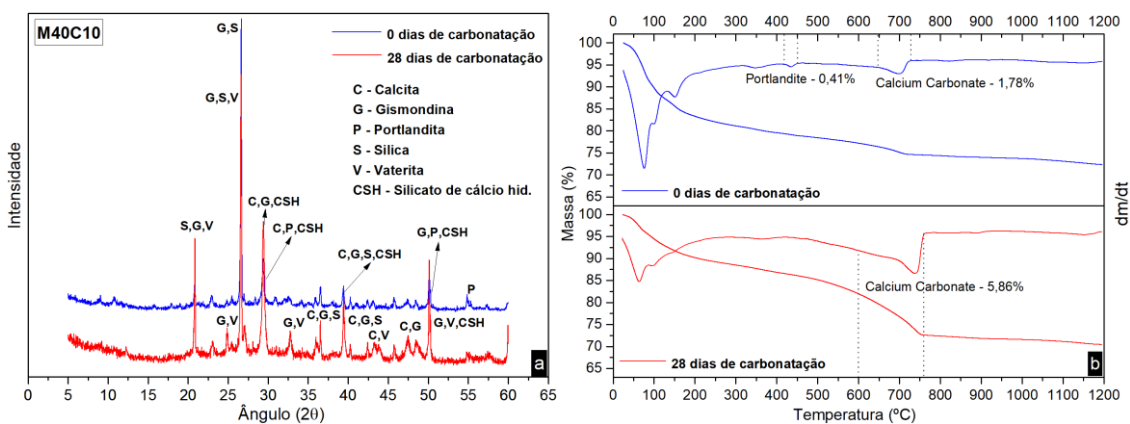


Figura 10. Análise do M40C10: a) Difratometria e b) Termogravimetria

Estes resultados de DRX, inferem que a cal favorece a carbonatação. Entretanto, no gráfico na profundidade de penetração os traços com RHA e metacaulim tem valores equivalentes nos traços com e sem cal, demonstrando que essa interferência negativa da cal é maior quando a adição possui baixa pozolanicidade, como o SCBA.

4.3. Profundidade de Penetração do CO₂

As amostras foram inseridas no interior de uma câmara de carbonatação e em determinadas idades foram retiradas para aferição da profundidade de carbonatação através da aspersão de Fenolftaleína, estando exemplificada na Figura 11.

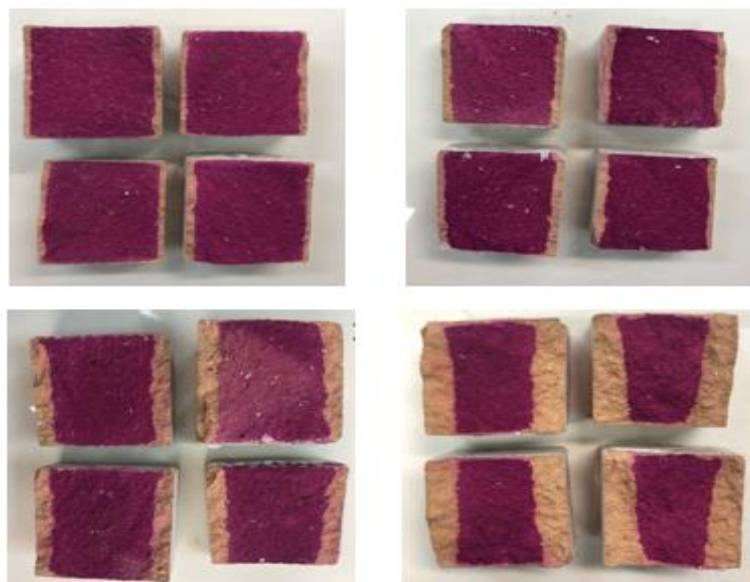


Figura 11. Exemplos dos resultados de aspersão da Fenolftaleína nas amostras

Os resultados da profundidade de carbonatação foram determinadas com paquímetro, em milímetros, e estão apresentados na Figura 12.

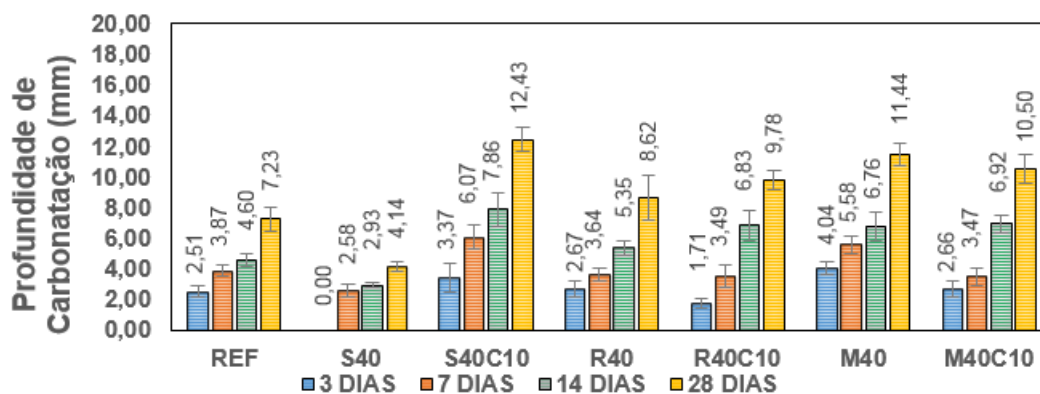


Figura 12. Profundidade de Penetração do CO₂

As misturas com adições, com exceção da S40, apresentaram resultados superiores as encontradas em todas as idades do traço referência. Isso ocorre porque as adições minerais reduzem o teor de portlandita, comparando com o traço referência, com isso o pH é rebaixado e a penetração de CO₂ é maior. O comportamento do traço S40 não segue esta mesma tendência, mostrando que pode ter ocorrido alguma queda da concentração de CO₂ dentro da câmara, na sua vez, prejudicando a sua aferição e por isto deve ser desconsiderada.

As misturas com RHA apresentaram as menores profundidades nos traços com adições. Este resultado também foi apresentado da resistência à compressão, indicando que para uma substituição em massa de 40% o RHA apresenta melhor coesão da matriz.

Entretanto os resultados das misturas com metacaulim obtiveram resultados próximos, indicando que também podem ser utilizados nessa proporção de substituição ao cimento.

O uso da cal foi possivelmente negativo, elevando a profundidade nos traços com RHA e SCBA e apresentando valores equivalentes nas misturas com metacaulim. Isso indica que ele não elevou as reservas alcalinas e, consoante ao DRX, elevou a taxa de carbonatação.

Todavia, todas as misturas apresentaram profundidade de penetração abaixo de 25 mm. Este é valor é o mínimo de cobrimento para concretos estruturais no Brasil. Logo, esta barreira física do cobrimento (espaço entre a face externa do elemento estrutural até o aço) já é eficiente e valida a utilização destas misturas, por evitar a corrosão.

4.4. Resistência à Compressão

Os resultados de resistência à compressão, Figura 13, apresentaram-se condizentes com os demais ensaios realizados. A amostra referência apresentou os melhores resultados, em decorrência do alto teor de cimento. Entretanto as adições RHA e metacaulim apresentaram resultados próximo ao REF o que aduz a sua utilização.

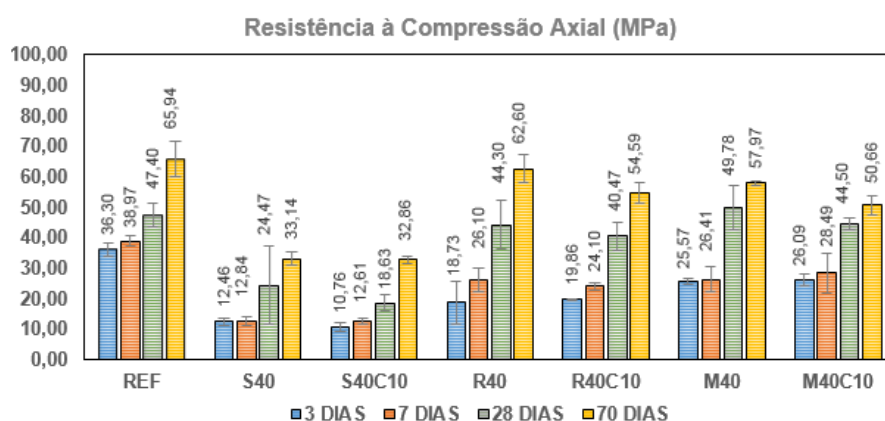


Figura 13. Resistência à Compressão

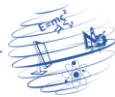
Isto é possível pela reatividade pozolânica destas adições que promoveram a formação de CSH secundário e conseguiram manter o patamar de resistência esperado. Porém, os traços com SCBA não apresentaram bons resultados, indicando que a baixa reatividade apresentada no resultado de IAP se refletiu em redução elevada da resistência.

5. Conclusões

Ao término do presente estudo pode-se inferir sobre o comportamento das adições minerais e da cal nas argamassas dos concretos autoadensáveis, estando as conclusões listadas abaixo:

- No IAP apenas o Metacaulim obteve classificação de adição com reatividade pozolânica, porém nos resultados de DRX, TG e resistência o RHA apresentou um comportamento com tendências pozolânicas, pela redução dos picos de CH.

- Em ambos os resultados de DRX quanto na TG houve o consumo da Portlandita e elevação do carbonato de cálcio, após os 28 dias de carbonatação. Esse comportamento foi uniforme em todas as misturas.



- A mistura referência foi a única em que o hidróxido de cálcio permaneceu mesmo após o período completo na câmara de carbonatação acelerada, revelando que o cimento possui grande resistência à degradação promovida pelo CO₂.

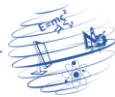
- Os picos de CSH do traço referência se mantiveram indicando que a carbonatação de concentrou mais no hidróxido de cálcio. Comportamento oposto aos traços com adições, onde os picos de CSH decaíram após os 28 dias de carbonatação.

- A profundidade de carbonatação, em todas as misturas, não atingiu o valor mínimo normativo de cobrimento, de 25mm. Isto, na prática impede que a frente de carbonatação atinja o aço, nos elementos estruturais que venham a ser construídos com CAA derivados destas argamassas.

- Todas as misturas apresentaram boas resistências, com valores acima de 30 MPa aos 28 dias. Contudo, apenas as adições RHA e metacaulim apresentaram resistências próximas ao traço referência.

Referências

- Anjos, M. A. S, Camões, A., Campos, P, Azeredo, G. A. e Ferreira, R. L. S. (2020). Effect of high volume fly ash and metakaolin with and without hydrated lime on the properties of self-compacting concrete. *Journal of Building Engineering*, (s.l.), v. 27, p.100985-100992, janeiro, Elsevier BV.
- Anjos, M. A. (2009). Adição do resíduo de biomassa da cana-de-açúcar em pastas para cimentação de poços petrolíferos produtores de óleos pesados. PPGCEM/UFRN, Natal.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248 (2003). Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52 (2009). Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12653 (2014). Materiais Pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13281 (2005). Argamassa para Assentamento e Revestimento de Paredes e Tetos. Rio de Janeiro.
- Diniz, H. A. A. (2018). Estudo das propriedades mecânicas e dos parâmetros de durabilidade de concretos autoadensáveis com elevados teores de adições minerais submetidos à carbonatação. Dissertação (Mestrado), Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, Natal.160 f.
- Dossche, C., Boel, V., De Corte, W., Van den Heede, P. e De Belie, N. (2016). A plant based LCA of high-strength prestressed concrete elements and the assessment of a practical ecological variant. *Cement and Concrete Composites*, (s.l.), v. 73, p.192-202, outubro, Elsevier BV.
- Elsalamawy, M., Mohamed, A. R. e Kamal, E. M. (2019). The role of relative humidity and cement type on carbonation resistance of concrete. *Alexandria Engineering Journal*, (s.l.), v. 58, n. 4, p.1257-1264, dezembro, Elsevier BV.



- Fapohunda, C., Akinbile, B. e Shittu, A. (2017). Structure and properties of mortar and concrete with rice husk ash as partial replacement of ordinary Portland cement – A review. *International Journal of Sustainable Built Environment*, (s.l.), v. 6, n. 2, p.675-692, dezembro, Elsevier BV.
- Jamil, M., Khan, M. N. N., Karim, M. R., Kaish, A. B. M. A. e Zain, M. F. M. (2016). Physical and chemical contributions of Rice Husk Ash on the properties of mortar. *Construction and Building Materials*, (s.l.), v. 128, p.185-198, dezembro, Elsevier BV.
- Joshaghani, A. e Moeini, M. A. (2017). Evaluating the effects of sugar cane bagasse ash (SCBA) and nanosilica on the mechanical and durability properties of mortar. *Construction and Building Materials*, (s.l.), v. 152, p.818-831, outubro, Elsevier BV.
- Kannan, V. (2018). Strength and durability performance of self compacting concrete containing self-combusted rice husk ash and metakaolin. *Construction and Building Materials*, (s.l.), v. 160, p.169-179, janeiro, Elsevier BV.
- Le, H. T. e Ludwig, H. M. (2016). Effect of rice husk ash and other mineral admixtures on properties of self-compacting high performance concrete. *Materials and Design*, v. 89, p. 156-166.
- Medina, E. A. (2011). Pozolanicidade do metacaulim em sistemas binários com cimento portland e hidróxido de cálcio. 151 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-12032012120653/publico/Dissertacao_Engler_Apaza_Medina.pdf.
- Mikulčić, H., Klemeš, J. J., Vujanović, M., Urbaniec, K. e Duić, N. (2016). Reducing greenhouse gasses emissions by fostering the deployment of alternative raw materials and energy sources in the cleaner cement manufacturing process. *Journal of Cleaner Production*, (s.l.), v. 136, p.119-132, novembro, Elsevier BV.
- Qiu, Q. (2020). A state-of-the-art review on the carbonation process in cementitious materials: Fundamentals and characterization techniques. *Construction and Building Materials*, (s.l.), v. 247, p.118503-118524, junho, Elsevier BV.
- Ollivier, J. P. e Vichot, A. (2014). Durabilidade do concreto: Bases cimentícias para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente. Ibracon, São Paulo.
- Perlot, C., Rougeau, P. e Dehaut, S. (2013). Slurry of metakaolin combined with limestone addition for self-compacted concrete. Application for precast industry. *Cement and Concrete Composites*, (s.l.), v. 44, p.50-57, novembro, Elsevier BV.
- Sáez del Bosque, I. F. S., Van den Heede, P., De Belie, N., Sánchez de Rojas, M. I. e Medina, C. (2020). Carbonation of concrete with construction and demolition waste based recycled aggregates and cement with recycled content. *Construction and Building Materials*, (s.l.), v. 234, p.117336-117353, fevereiro, Elsevier BV.
- Safiuddin, M. D., West, J. S. e Soudki, K. A. (2010). Hardened properties of self-consolidating high performance concrete including rice husk ash. *Cement and Concrete Composites*, (s.l.), v. 32, n. 9, p.708-717, outubro, Elsevier BV.



- Scrivener, K. L., John, V. M. e Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry, *Cem. Concr. Res.*, v. 114, p.2–26.
- Sua-iam, G. e Makul, N. (2017). Effect of incinerated sugarcane filter cake on the properties of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, (s.l.), v. 130, p.32-40, janeiro, Elsevier BV.
- Uysal, M. e Yilmaz, K. (2011). Effect of mineral admixtures on properties of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Composites*, (s.l.), v. 33, n. 7, p.771-776, agosto, Elsevier BV.