

Efeitos da incorporação da ecosílica no desempenho de argamassas produzidas por activação alcalina de metacaulinos

PAPPALARDO JR., Alfonso^{1,a} JALALI, Said^{2,b} CAMÕES, Aires^{2,c}

¹Universidade Presbiteriana Mackenzie – 01302-907 São Paulo, Brasil

² Universidade do Minho, Campus de Azurém – 4800-058 Guimarães, Portugal

^aalfonso@mackenzie.br, ^bsaid@civil.uminho.pt, ^caires@civil.uminho.pt

Palavras-chave: argamassa geopolímera, vidro verde, ensaio de Chappelle, durabilidade, sustentabilidade das construções.

Resumo. Este trabalho aborda os efeitos da incorporação de resíduos de pó de vidro contendo sílica amorfa para a produção de argamassas obtidas por activação alcalina de metacaulinos. São utilizadas na preparação das soluções activadoras à base de silicato de sódio – ou de potássio – duas fontes de sílica que serão objeto de comparação: uma proveniente do processo de reciclagem do vidro originário do lixo municipal e outra, da produção de ligas metálicas de ferro-silício da indústria siderúrgica. Além destas, também são adotadas soluções activadoras produzidas a partir de silicatos de sódio e potássio, obtidos em escala industrial. Este estudo tem por objectivo a avaliação do desempenho em termos de resistência e de durabilidade das argamassas analisadas a partir de razões molares de referência. São apresentados estudos referentes ao índice de actividade dos materiais analisados cujos resultados promovem a competitividade da sílica de vidro verde moído, nomeada ecosílica, em termos técnicos e económicos. Neste estudo sobre a produção de argamassas geopolímeras com adição de pó de vidro são discutidas as condições de preparo, cura, trabalhabilidade, redução do custo de aquisição dos materiais e a eficiência energética frente às alternativas propostas.

Introdução

O vidro é um material que oferece os maiores benefícios ambientais e energéticos no universo da construção civil. Por ser indefinidamente e integralmente reciclável, é cada vez mais crescente a potencialidade das aplicações decorrentes do seu uso. Apesar de, quando em forma de cacos ou grãos, seu uso nobre estar voltado à diversificada produção de artefactos de vidro como: chapas, cerâmicas, pastilhas, faixas reflexivas de sinalização, refratários, blindados, alternativas de uso relacionadas ao pó de vidro ainda são muito incipientes. Com o uso cada vez mais crescente de ligantes obtidos a partir da activação alcalina de aluminossilicatos pode-se tirar vantagem do aproveitamento destes resíduos gerados pela indústria do vidro.

A conscientização quanto ao reaproveitamento do pó retido nos filtros eletrostáticos e nas operações de manutenção de alto-fornos da indústria de refratários seguir para a reciclagem como matéria-prima para indústrias cerâmicas elevando o custo deste resíduo. Apesar da valorização destes resíduos industriais, seu preço ainda é competitivo frente aos materiais de origem siliciosa obtidos em escala industrial. Nesta investigação pretende-se reunir elementos que confirmem a viabilidade técnica e económica do uso do pó de vidro na produção de argamassas geopolímeras de alto desempenho.

Caracterização dos materiais de partida

Metacaulino. A matéria-prima para a produção do metacaulino utilizado neste estudo é originária de depósitos situados no Estado da Paraíba (nordeste brasileiro). A desidroxilação do caulino, que é a libertação dos iões hidroxilos envolventes da estrutura octaédrica do alumínio e

consequente perda d'água de constituição, conduz a transformação em metacaulino. Por ser uma fase que requer o maior consumo de energia, foram realizados ensaios termo-gravimétricos para caracterizar as condições mínimas de tratamento térmico e do tempo de exposição que permitem obter um produto com o maior poder de reação na fase de activação alcalina com o menor dispêndio de energia.

Utilizou-se o equipamento da empresa norte-americana TA Instruments modelo SDT2960, que realiza simultaneamente as análises de Calorimetria Diferencial de Varrimento (DSC) e Termo-Gravimétrica (TGA). Após a aplicação de dois ciclos térmicos atingindo a temperatura de pico de 1100°C, observa-se a perda de massa relativa à perda de água de constituição do caulino (Fig.1). A Figura 2 apresenta a taxa de perda de massa em relação à temperatura, que permite definir o intervalo onde ocorreram as maiores perdas onde se assume que o início e fim da decomposição seja, respectivamente, nas temperaturas de 380°C e 730°C.

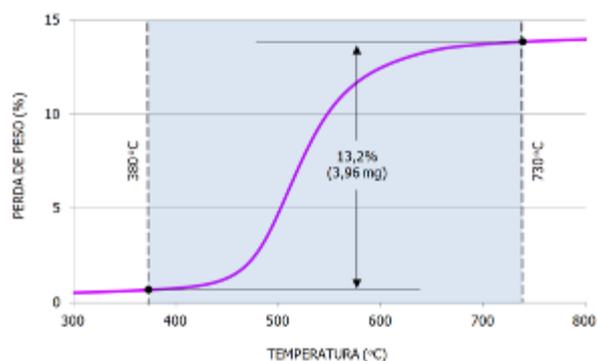


Figura 1: Perda de massa percentual em função da temperatura

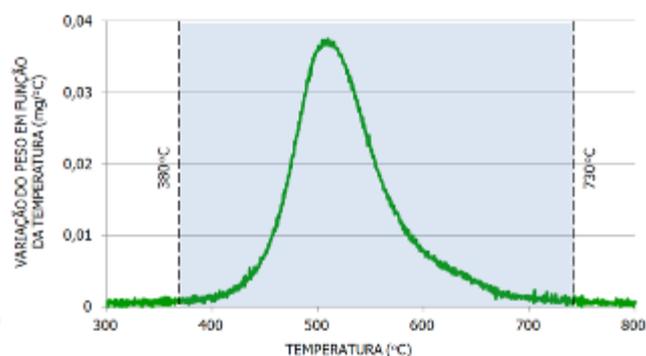


Figura 2: Taxa de perda de massa e intervalo de temperaturas de interesse

Embora muitos autores sejam influenciados pelas investigações realizadas por Davidovits[1], que aponta a temperatura de 750°C para a desidroxilação completa, a partir deste estudo realizado pode-se sugerir a temperatura de 500°C para a produção do metacaulino, refletindo em uma redução significativa no consumo energético dos fornos de calcinação.

Vidro verde moído (ecosilica). O vidro verde utilizado neste estudo é originário de garrafas recolhidas do lixo municipal. As garrafas foram lavadas e reduzidas a cacos de vidro, com dimensão máxima de 20 mm e, em seguida, foram submetidas a micronização em moinho de esferas por meio de 20 operações de 15 minutos com 10 minutos de arrefecimento entre operações.

Sílica cinza (Elkem Microsilica 971D). A microsilica Elken, denominada neste estudo por sílica cinza, apresenta-se em forma de pó com média do tamanho das partículas aproximadamente de 150 µm e superfície específica de 20 m²/g. Sua cor tem estreita correlação com o conteúdo de carbono proveniente da queima do carvão coque no processo do processo de produção das ligas de ferro-silício. Normalmente, no processo siderúrgico o metal é o produto principal e a sílica é o subproduto. Esta afirmação não se aplica para a sílica cinza onde, especificamente para este caso, ela é o produto principal e a liga metálica é o subproduto. A análise química, fornecida pelo fabricante do produto, indica a quantidade máxima de 98,5% de sílica ativa.

Sílica branca (Una-Prosil 170 SM). A sílica precipitada Una-Prosil, identificada neste estudo de sílica branca, é um produto sintético obtido a partir da reação entre o silicato de sódio e o ácido sulfúrico. Os principais setores em que a sílica branca está presente são: indústria de borracha, detergentes em pó, cosméticos, nutrição animal, construção civil e agroquímica. A sílica branca tem propriedade de agente fluidificante que auxilia na formação da solução do silicato alcalino para altas razões molares. A sílica branca é composta por partículas muito finas, sendo que 70% são passantes na peneira de abertura de 150 µm. A densidade aparente e, absoluta são, respectivamente, 240 g/l e 295 g/l, com superfície específica de 200 m²/g. A análise química, apresentada na ficha técnica do produto, indica o conteúdo de 97,2% de sílica ativa.

Silicato de potássio (Woellner Betol K 41T). O silicato de potássio utilizado apresenta o conteúdo de dióxido de silício de 27,5% e de óxido de potássio de 13,2%, resultando no módulo de

sílica aproximado de 3,2. A sua aparência é em forma líquida transparente com viscosidade de 200 mPas e densidade 1,40 g/cm³. Dois processos de produção podem ser utilizados na escala industrial. O primeiro é processo envolve a calcinação do carbonato de potássio e quartzo em alto-fornos para posterior autoclavagem, filtragem e moagem. O segundo processo é o hidrotérmico, onde a fonte de sílica e a solução aquosa de hidróxido de potássio que são levados em autoclave para posterior filtragem e moagem.

Composição das argamassas geopolímeras

Razões molares de referência. As razões molares de referência (Tab.1) levam, preferencialmente, à formação do geopolímero do tipo (Na, K) poli-(sialato-siloxo), segundo a nomenclatura proposta por Davidovits [1]. Neste estudo paramétrico, as razões molares, em termos de óxidos, serão adotadas para as oito argamassas produzidas a partir das soluções ativadoras (Tab.2), tendo como precursor o metacaulino MK-750, com relação entre aglomerantes secos e agregados miúdos igual a 1:2.

Tabela 1: Razões molares de referência (adaptado de [1])

MATERIAIS DE PARTIDA		POTÁSSIO Si:Al=2		SÓDIO Si:Al=2	
		ÓXIDOS	RAZÃO MOLAR	ÓXIDOS	RAZÃO MOLAR
PRECURSOR	METACAUİLINO	SiO ₂ :Al ₂ O ₃	2,0	SiO ₂ :Al ₂ O ₃	2,0
ATIVADOR	SILICATO ALCALINO	SiO ₂ :K ₂ O	3,2	SiO ₂ :Na ₂ O	3,2
		ÁGUA	50%	ÁGUA	54%
	SILICATO + HIDRÓXIDO ALCALINO	SiO ₂ :K ₂ O	2,0	SiO ₂ :Na ₂ O	2,0
		H ₂ O:K ₂ O	12,5	H ₂ O:Na ₂ O	12,5
	ÁGUA	45%	ÁGUA	50%	
ARGAMASSA GEOPOLÍMERA		SiO ₂ :Al ₂ O ₃	4,0	SiO ₂ :Al ₂ O ₃	4,0
		K ₂ O:SiO ₂	0,25	Na ₂ O:SiO ₂	0,25
		K ₂ O:Al ₂ O ₃	1,0	Na ₂ O:Al ₂ O ₃	1,0
		H ₂ O:Al ₂ O ₃	12,0	H ₂ O:Al ₂ O ₃	12,0

Tabela 2: Tipos de soluções ativadoras utilizadas nas argamassas geopolímeras analisadas

PRODUTOR	SÍLICA	HIDRÓXIDO	
		POTÁSSIO	SÓDIO
UNAPROSIL BRASIL UP170SM	BRANCA	BRK	BRNa
ELKEM NORUEGA 971 D	CINZA	CNK	CNNa
RESÍDUOS DE VIDRO	VERDE	VRK	VRNa
PRODUTOR	SILICATO	POTÁSSIO	SÓDIO
WOELLNER AUSTRIA BETOL K41T	INDUSTRIAL	WLK	–
MARCANDE PORTUGAL	INDUSTRIAL	–	MRNa

Preparo das argamassas. O preparo das argamassas geopolímeras inicia-se com a pesagem dos materiais: metacaulino, sílica ativa, hidróxido alcalino do silicato e adicional, água destilada e areias com proporções iguais compreendidas entre quatro faixas granulométricas (125, 250, 500 e 1000 µm). As soluções ativadoras são preparadas 24 horas antes da mistura, à temperatura ambiente, para a liberação completa das hidroxilas e aumentar a reatividade da solução. A ordem da mistura adotada neste estudo compreende a homogeneização do metacaulino e da areia (parte seca) seguida da adição da solução ativadora com o uso de misturador mecânico tipo argamassadeira. O tempo de mistura é de quatro minutos com velocidade baixa e a moldagem é feita em mesa

vibratória. Como a viscosidade da solução activadora à base de sódio é maior daquela à base de potássio e a solubilidade em solução aquosa de hidróxido alcalino da ecosílica é menor que as demais, tais características levam a composições de distintas trabalhabilidades. As argamassas produzidas com ecosílica apresentaram um aspecto muito seco. Nas soluções à base de ecosílica houve a separação em duas fases (solúvel e insolúvel). As demais soluções activadoras, seja à base de potássio ou à base de sódio, apresentaram trabalhabilidades semelhantes devido ao fato que se adotou a mesma razão molar entre a água e os óxidos alcalinos. Como os pesos moleculares dos óxidos alcalinos são distintos, tal fato conduziu às quantidades de água de composição de 45% e 50%, respectivamente, para o potássio e o sódio.

Propriedades mecânicas

Resistência à tração na flexão. Para o ensaio de flexão de três pontos foram utilizados provetes prismáticos de dimensões 40 mm de largura por 40 mm de altura por 160 mm de comprimento (vão de 100 mm). Os provetes foram preparados conforme o procedimento descrito anteriormente e ensaiados aos 28 dias. A Norma ASTM C 348 [2] estabelece que a resistência à flexão de provetes constituídos de argamassas cimentícias, nas dimensões estabelecidas pelo ensaio, vale $f_{ct,fl} = 0,0028P$, sendo P a carga máxima em [N] e $f_{ct,fl}$ a resistência à tração na flexão em [MPa]. As resistências à tração média f_{ctm} são obtidas indiretamente por meio do ensaio de flexão (Fig.3). Deve-se observar que os maiores valores foram obtidos para as argamassas à base de sódio. Os menores valores foram observados para as soluções compostas por ecosílica.

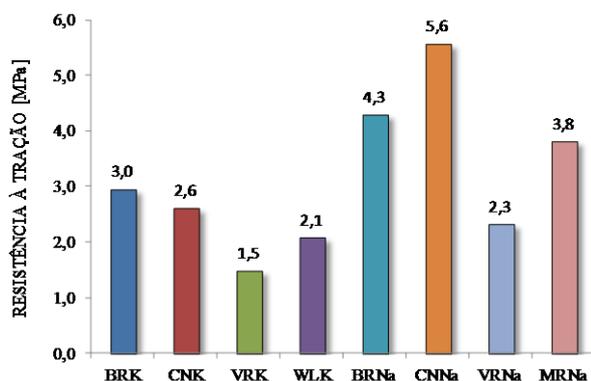


Figura 3: Resistência à tração para as argamassas analisadas

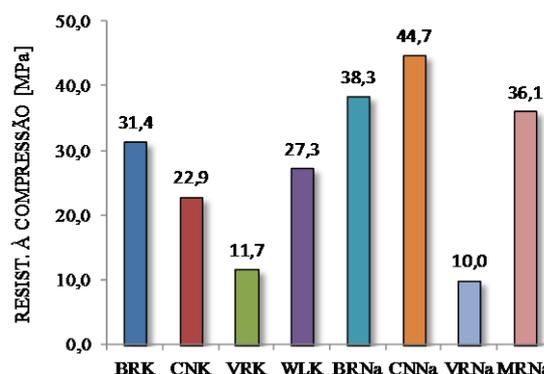


Figura 4: Resistência à compressão para as argamassas analisadas

Resistência à compressão. A resistência à compressão foi obtida a partir de provetes cúbicos de 50 mm que foram preparados conforme o procedimento descrito anteriormente e ensaiados aos 28 dias. A resistência à compressão média f_{cm} , para três provetes por composição, são apresentadas na Figura 4. Valem as mesmas considerações feitas anteriormente para a resistência à tração.

Avaliação da durabilidade

Retração. No sentido de se avaliar a retração de argamassas geopolímeras, produzidas com distintas soluções activadoras, realiza-se uma campanha experimental que consiste na medição da variação do comprimento dos provetes logo após a desmoldagem. A desmoldagem foi realizada 4 horas após a moldagem dos provetes. Não foram apresentadas as retrações das soluções activadoras à base de ecosílica pois a desmoldagem somente pôde ser realizada 24 horas após a moldagem. Complementarmente, determina-se a perda de massa dos provetes submetidos ao ensaio de retração. A avaliação da retração segue a especificação normativa LNEC E398:1993 [3]. Foram confeccionados dois provetes prismáticos, para cada formulação, de secção transversal quadrada de dimensões 25 mm de lado e 250 mm de comprimento. Os provetes são dotados de pontos de referência, em forma de pinos metálicos, instalados nos topos dos mesmos. Durante o ensaio, os

provetes são mantidos em sala com temperatura ambiente de $27,5^{\circ}\text{C} \pm 2,5^{\circ}\text{C}$ e humidade relativa $60 \pm 5\%$ (Fig.X1).

A retração é medida em equipamento composto por haste fixa e deflectômetro analógico. Antes da colocação de cada provete no suporte em aço é realizada a medição de uma barra de aço padrão, para anular o efeito associado à variação de comprimento devida às variações térmicas. Para cada leitura efectuada no aparelho de medição da retração, é registrada a massa de cada provete por meio de uma balança de alta precisão, situada na mesma sala de ensaios.

Os valores da retração apresentados são referentes à retração total composta por retração autógena e por secagem. Não se verificou a retração de provetes selados com filme plástico de PVC transparente, sendo esta significativamente inferior evidenciando que a preponderância dos valores apresentados deve-se à retração por secagem que tem influência direta na durabilidade das argamassas geopolímeras. Os índices de retração registrados são cerca de dez vezes maiores em relação àqueles previstos para argamassas hidráulicas à base de cimento Portland comum, sendo estes últimos contados a partir da desforma que é em torno de cinco dias.

A Figura 5 ilustra a retração total obtida para as argamassas analisadas, evidenciando que aquelas à base de potássio apresentaram os valores menores, devido ao fato da diminuição do conteúdo de água do silicato composto (Tab.1).

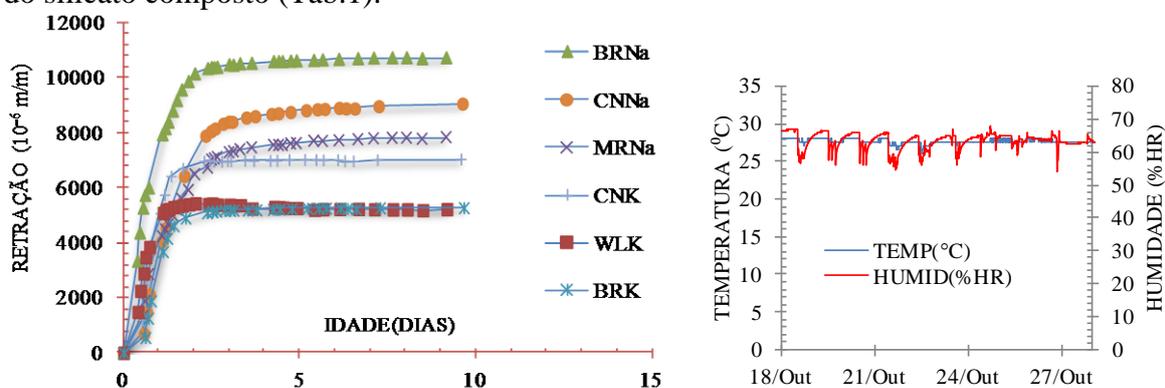


Figura 5: Retração total das argamassas geopolímeras e variação da temperatura e humidade da sala de ensaios para o período das leituras

A Figura 6 apresenta a perda de massa nos provetes que evidenciaram um comportamento semelhante ao longo de todo o tempo de ensaio. Deve-se observar que a perda de massa para os provetes selados poderia ser considerada desprezível. Estes resultados demonstram que o procedimento sugerido de selar os provetes aparenta ser eficaz para a mitigação das perdas de massa e retração por secagem, uma vez que estes fenômenos estão relacionados.

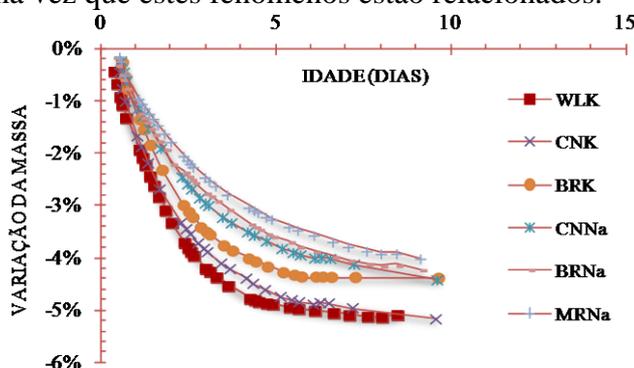


Figura 6: Perda de massa das argamassas geopolímeras

Absorção de água por capilaridade. O ensaio de absorção de água por capilaridade segue as recomendações da norma LNEC E393:1993 [4]. Foram confeccionados dois provetes prismáticos, para cada formulação, de secção transversal quadrada de dimensões 40 mm de lado e 160 mm de comprimento. Os provetes foram rompidos em duas partes na máquina de ensaio à flexão e levados para a secagem em estufa a uma temperatura de $40^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 10 dias até massa constante m_0 .

Prossegue-se com a impermeabilização das faces maiores com material selante à base de silicone e posicionamento do provete sobre suportes dentro de um recipiente que será preenchido com água até que o nível atinja $5 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ acima da face inferior. São feitas as medições das massas para os tempos 3, 6, 8, 24 e 72 horas. O histórico da absorção de água por capilaridade [g/mm^2] nos tempos especificados para as argamassas analisadas é apresentado na Figura 7.

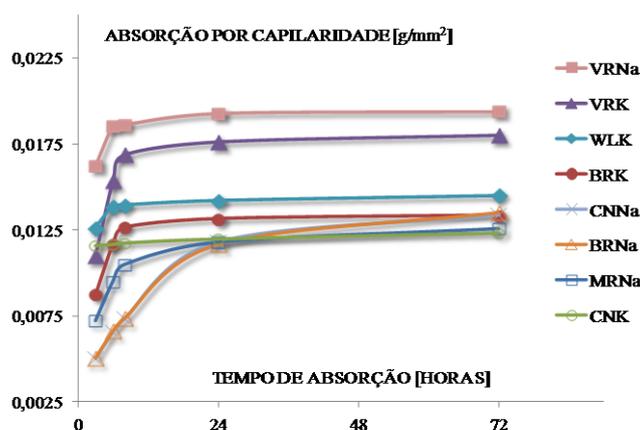


Figura 7: Absorção de água por capilaridade

Absorção de água por imersão. O ensaio de absorção de água por imersão à pressão atmosférica segue as recomendações da norma LNEC E394:1993 [5]. Foram confeccionados dois provetes prismáticos, de cada composição, de secção transversal quadrada de dimensões 40 mm de lado e 160 mm de comprimento. Os provetes foram rompidos em duas partes na máquina de ensaio à flexão e levados para a saturação em água, tendo-se o cuidado de efectuar a operação de imersão em três etapas, elevando-se o nível de água em terços da altura a cada hora. Quando constatou-se que a diferença entre a média das pesagens foi menor que 0,1% considerou-se que a saturação foi atingida. Procedeu-se à pesagem dos provetes sendo registradas as massas dos provetes saturados (m_1) e as massas hidrostáticas dos mesmos (m_2). Os provetes são retirados de dentro de água e levados à secagem em estufa à temperatura de $105^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ até massa constante (m_3). A absorção de água por imersão calculada por meio da expressão

$$A = \frac{m_1 - m_3}{m_2 - m_3} \times 100 \quad (1)$$

é apresentada para as composições em estudo na Figura 8.

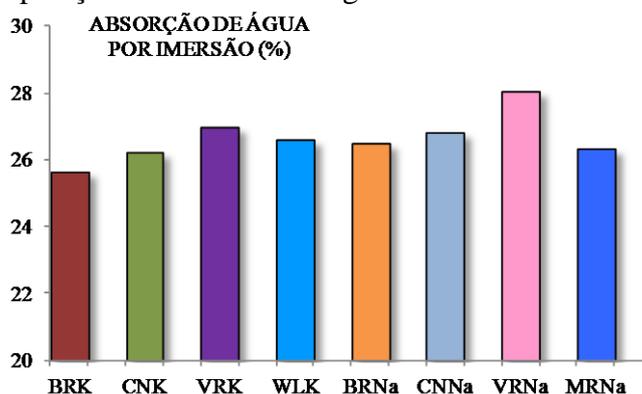


Figura 8: Absorção de água por imersão à pressão atmosférica

A partir da análise da Figura 8, constata-se que os provetes que apresentaram as maiores quantidades de água absorvida por imersão são constituídos por solução activadora formada por ecosílica. Esta verificação também foi comprovada no ensaio de absorção de água por capilaridade, cujos resultados são apresentados na Figura 7.

Resistência ao ataque químico. O ensaio de resistência ao ataque químico segue as prescrições da norma ASTM C267 – 01[6]. Foram confeccionados dois provetes cúbicos de 50 mm, de cada

composição, para os períodos 1, 3, 7 e 14 dias, para as soluções aquosas de ácido sulfúrico com concentrações de 5%, 10% e 20% para a temperatura ambiente. A solução de 20% de ácido sulfúrico foi contemplada por ser considerada uma concentração limite, segundo a norma BS EN 13529:2003 [7] que especifica uma metodologia para a determinação da resistência ao ataque químico severo em revestimentos de proteção de superfícies. No momento da pesagem, os provetes foram enxaguados em água corrente e o excesso removido em papel absorvente por três vezes, sendo que a última operação os provetes foram mantidos sobre a superfície absorvente por meia antes da pesagem. Considerando-se o valor de referência 100% para a massa do provete após o período de cura (7 dias) e antes da exposição ao ataque químico, a variação percentual da massa é dada pela expressão:

$$\text{variação da massa \%} = \frac{W - C}{C} \times 100 \quad (2)$$

onde W é a massa do provete após o período de imersão em solução aquosa de ácido sulfúrico e C é a massa do provete antes da exposição ao ataque químico. A variação percentual da massa pode tanto ser uma grandeza positiva, sendo interpretada como ganho de massa (por absorção ácida), quanto ser uma grandeza negativa, neste caso interpretada como perda de massa.

As argamassas obtidas a partir das soluções ativadoras de silicato de potássio à base de ecosílica (VRK), sílica cinza (CNK) e sílica branca (BRK) apresentaram os piores desempenhos em relação à resistência ao ataque de ácido sulfúrico com 20% de concentração. As argamassas citadas exibiram perda de massa acima de 50% (Fig.9). A argamassa obtida a partir da solução de silicato de sódio à base de ecosílica (VRNa) desfez-se após 3 dias de imersão no meio ácido analisado. A Figura 10 apresenta as argamassas que tiveram o melhor desempenho, com perda de massa inferior a 10%.

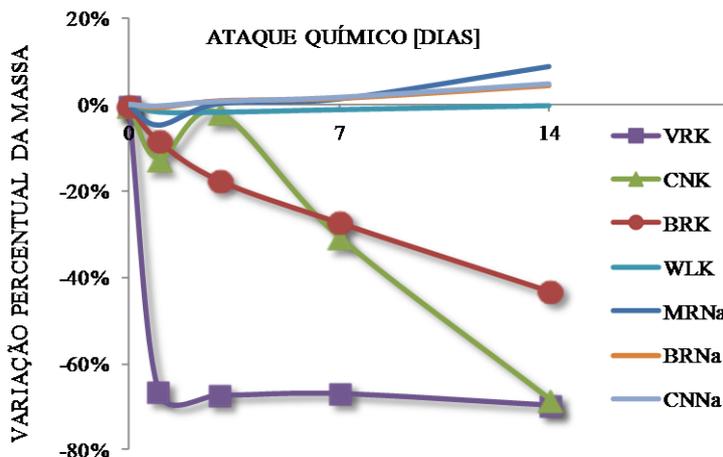


Figura 9: Variação percentual da massa em função período de imersão em solução aquosa com 20% de ácido sulfúrico para as argamassas analisadas

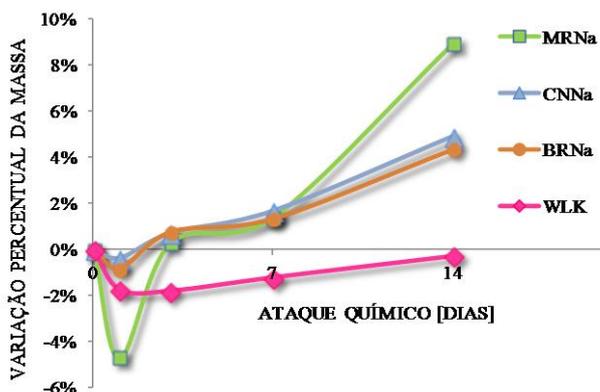


Figura 10: Variação percentual da massa em função período de imersão em solução aquosa com 20% de ácido sulfúrico para as argamassas com melhor desempenho

A variação percentual da resistência à compressão é dada pela expressão:

$$\text{variação da resistência \%} = \frac{S_2 - S_1}{S_1} \times 100 \tag{3}$$

sendo S_1 a resistência média à compressão para os provetos antes da imersão em meio ácido e S_2 a resistência média dos provetos após o período de imersão em meio ácido. As argamassas que apresentaram o melhor desempenho ao ataque químico (Fig.10), exceto para a solução de silicato de sódio comercial (MRNa), também apresentaram o melhor desempenho mecânico. A Figura 11 mostra o desempenho mecânico das argamassas produzidas com as soluções activadoras de silicato de potássio comercial (WLK), silicato de sódio à base de sílica cinza (CNNA) e à base de sílica branca (BRNa) que apresentaram uma queda de resistência em torno de 70% após sete dias de exposição ao meio ácido.

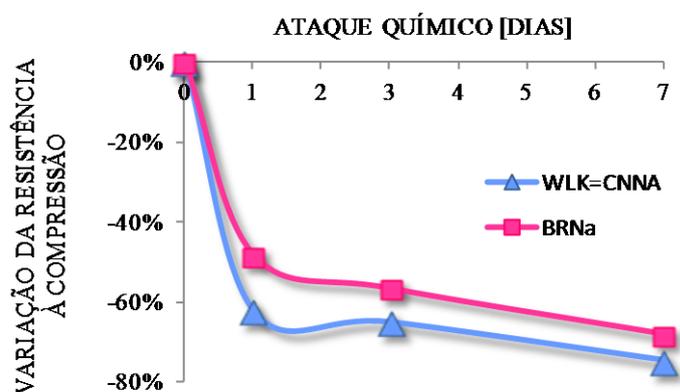


Figura 11: Variação percentual da resistência à compressão em função período de imersão em solução aquosa com 20% de ácido sulfúrico para as argamassas com melhor desempenho

A Figura 12 indica os valores das resistências à compressão apresentados pelas argamassas supracitadas ao longo de sete dias de imersão em ácido sulfúrico com 20% de concentração.

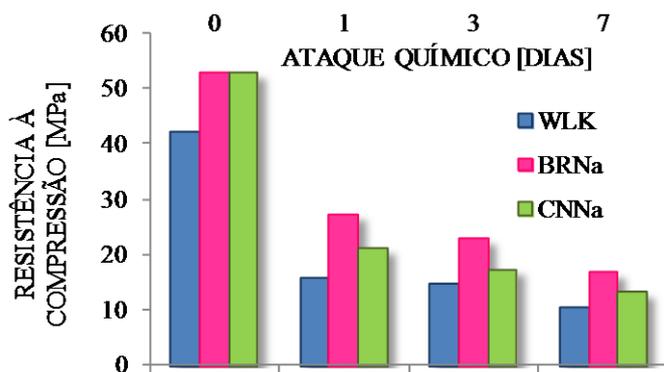


Figura 12: Resistência à compressão [MPa] em função período de imersão em solução aquosa com 20% de ácido sulfúrico para as argamassas com melhor desempenho

Optimização da Composição

A otimização das argamassas obtidas a partir das soluções activadoras à base de ecosílica sob o aspecto da durabilidade permite a valorização dos resíduos originários da indústria da reciclagem do vidro contribuindo para a sustentabilidade da construção. Sob o aspecto econômico o uso da ecosílica demonstra-se atraente em comparação com as sílicas ativas existentes no mercado. Assim, pretende-se analisar o potencial reativo da ecosílica para promover a viabilidade técnico-econômica de utilização deste material. Neste sentido o ensaio de Chapelle Modificado será utilizado para a

determinação do índice de pozzolanicidade da ecosílica em confronto com as demais sílicas analisadas neste estudo.

Ensaio de Chapelle Modificado. O método de ensaio consiste na determinação do teor de hidróxido de cálcio que a fase amorfa da sílica ativa tem capacidade de se combinar. A partir das especificações da norma NBR 15895 [8], coloca-se em um frasco Erlenmeyer 1 g de sílica ativa (m_2) e 2 g de óxido de cálcio (m_3), obtido a partir da calcinação do carbonato de cálcio pró-análise, adicionando-se 250 g de água isenta de dióxido de carbono. O frasco é mantido em banho-maria durante 16 horas à temperatura de 90°C, com agitação magnética. Após este procedimento adiciona-se 250 g de solução de sacarose, para cessar a reação pozzolânica, seguida das etapas de filtração, pipetagem e titulação, com solução de ácido clorídrico de concentração 0,1 M, utilizando-se solução de fenoftaleína. O volume gasto de ácido clorídrico para a titulação (V_2) indica a quantidade de óxido de cálcio que não reagiu com a sílica ativa. Efetuando-se as mesmas operações para o ensaio em branco, sem a adição de sílica ativa, o volume gasto para a titulação (V_3) leva ao valor do índice de atividade pozzolânica por meio da expressão ajustada para o ensaio, dada por [8]:

$$I = \frac{28 \cdot (V_3 - V_2)}{m_2} \cdot 1,32 \quad (4)$$

que corresponde ao teor de hidróxido de cálcio fixado, expresso em miligramas, por grama de sílica ativa. A Figura 13 apresenta os índices de atividade pozzolânica médios obtidos em dois ensaios por material analisado. Para o ensaio em branco, que é referência para todos os resultados, que foram realizados três ensaios. A sílica branca que é extremamente fina apresentou o maior índice de reatividade igual a 1510 mg/g. Curiosamente para as sílicas cinza e verde, que apresentaram desempenhos muito distintos nos ensaios realizados, indicaram índices de atividade pozzolânica muito próximos 930 mg/g e 810 mg/g, respectivamente. Em busca de uma explicação para as diferenças entre os resultados obtidos nos ensaios de durabilidade e mecânicos, recorreu-se a redução do tempo do ensaio para 2, 4 e 8 horas, mantendo-se o valor de referência do ensaio em branco realizado em 16 horas. Percebe-se que o potencial reativo da ecosílica somente evidencia-se a partir de longo tempo de exposição a altas temperaturas.

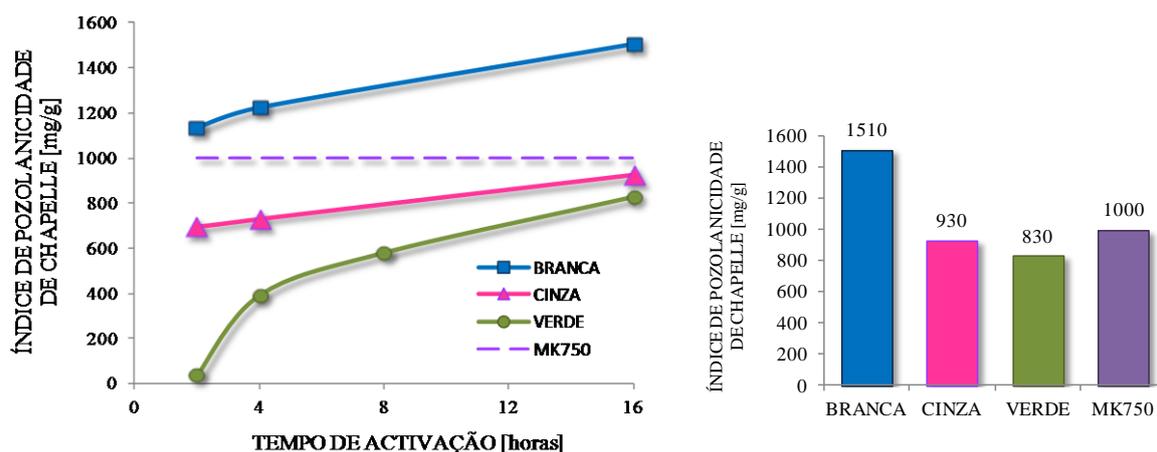


Figura 13: Ensaio de Chapelle modificado para as sílicas ativas branca (UP-170 SM), cinza (971-D) e verde (vidro moído) e metacaulino (MK750)

Fluorescência de Raios X. As quantidades de óxidos presentes nas amostras de pó de vidro verde (ecosílica), obtidas pela técnica de fluorescência de raios X são apresentadas na Tabela 3. As quantidades exibidas nesta tabela estão associadas a fase vítrea do material, sendo levadas em consideração no cálculo das quantidades da composição otimizada.

Tabela 3: Análise de fluorescência de raios X para a ecosílica

ANÁLISE QUÍMICA XRF SÍLICA VERDE (ECOSÍLICA)	
ÓXIDOS	%
SiO ₂	72,2
Al ₂ O ₃	2,84
Fe ₂ O ₃	0,38
CaO	10,4
MgO	0,82
TiO ₂	0,05
Na ₂ O	14,5
K ₂ O	0,7
P ₂ O ₅	0,02

Análise granulométrica. A distribuição granulométrica foi obtida mediante o Método de Sedimentação, utilizando-se o equipamento Micromeritics SediGraph 5100, para amostras de pó de vidro com três tempos de moagem: 1, 2 e 5 horas. A Figura 14 apresenta as curvas granulométricas obtidas e se observa a diminuição do tamanho das partículas em função do aumento do tempo de moagem, embora este aumento repercuta em um aumento do gasto energético.

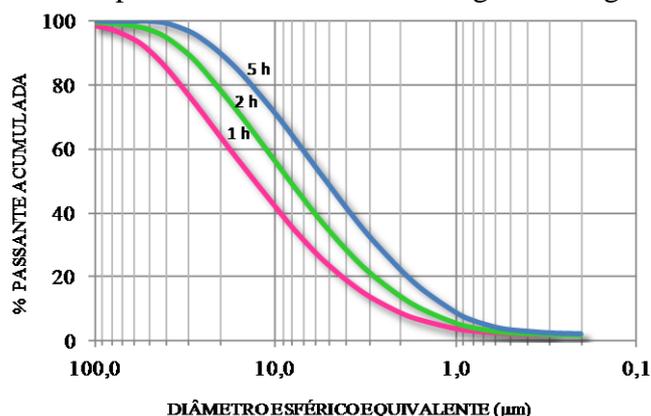


Figura 14: Curvas granulométricas da ecosílica em função do tempo de moagem

Razões molares de referência. A partir de um estudo experimental foram analisadas diversas razões molares entre a sílica e o potássio para a solução ativadora e as maiores resistências à compressão foram obtidas para a formulação baseada nas razões molares indicadas na Tabela 4. Foram preliminarmente analisadas as formulações para o potássio e os valores obtidos para a resistência à compressão são apresentados na Tabela 5.

Tabela 4: Razões molares otimizadas para soluções ativadoras à base de ecosílica

MATERIAIS DE PARTIDA		ÓXIDOS	RAZÃO MOLAR
PRECURSOR	METACAUPLINO	SiO ₂ :Al ₂ O ₃	2,0
SOLUÇÃO ACTIVADORA	SILICATO DE POTÁSSIO À BASE DE SÍLICA VERDE	SiO ₂ :K ₂ O	3,29
		H ₂ O:K ₂ O	19,30
		ÁGUA	45%
ARGAMASSA GEOPOLÍMERA		SiO ₂ :Al ₂ O ₃	3,36
		K ₂ O:SiO ₂	0,13
		K ₂ O:Al ₂ O ₃	0,42
		H ₂ O:Al ₂ O ₃	7,79

Tabela 5: Resistência compressão aos 7 dias

TIPO DE SÍLICA	FORNECEDOR/PRODUTO	RESISTÊNCIA CÚBICA 7 DIAS
SÍLICA BRANCA	UNA-PROSIL UP170 SM	88,2 MPa
SÍLICA CINZA	ELKEM 971D	86,3 MPa
ECOSÍLICA	RESÍDUO DE VIDRO	57,3 MPa

Conclusões

Em condições optimizadas obtiveram-se resistências à compressão para a ecosílica superiores a 50 MPa, o que perspectiva a utilização destas soluções activadoras em funções estruturais. Uma grande dificuldade foi encontrada em relação à trabalhabilidade das composições à base de ecosílica que impossibilita a utilização desta formulação para fins práticos. Estudos futuros deverão estar voltados para a superação destas dificuldades.

Quanto ao ensaio de retração, iniciado 4 horas após o desmoldagem, as argamassas à base de potássio apresentaram os valores menores em relação às argamassas à base de sódio, sendo porém ainda altos em relação às argamassas compostas por cimento Portland comum. Como medida de mitigação para a retração de argamassas geopolímeras sugere-se envolver as peças com filme plástico de PVC transparente nos primeiros três dias após a desforma das mesmas.

O tratamento de redução da granulometria e, conseqüentemente, da superfície específica e o aumento do poder de combinação com hidróxidos alcalinos por meio de tratamento térmico adequado são procedimentos recomendados para promover a competitividade da ecosílica. A utilização da ecosílica em substituição às sílicas, obtidas como produtos principais ou subprodutos de processos industriais, traz vantagens quanto a redução do custo de aquisição, valorização de resíduos e contribuição para a sustentabilidade dos materiais construção.

Novos estudos devem ser realizados para a confirmação experimental do desempenho quanto aos critérios de durabilidade de argamassas compostas por soluções activadoras à base de ecosílica.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de Pós-doutorado no Exterior (PDE) ao primeiro autor para execução deste trabalho.

À Wincret Designer Concrete Products Ltda. pelo fornecimento das matérias-primas e pelo atendimento da equipe de suporte técnico.

À Woellner Austria pelo fornecimento do silicato de potássio utilizado neste estudo.

Ao Laboratório de Química Investigação do Departamento de Engenharia Têxtil da Universidade do Minho.

Ao professor Renato Henriques responsável pelo Laboratório de Moagem e Pulverização do Departamento de Ciências da Terra da Universidade do Minho pela análise granulométrica do pó de vidro por meio da técnica de sedimentação *sedigraph*.

Aos técnicos do Laboratório de Materiais de Construção de Engenharia Civil da Universidade do Minho, nomeadamente Fernando Pokee e, em especial, Mestre Carlos Jesus pela orientação na preparação e na realização dos ensaios e pela disponibilidade das planilhas eletrônicas que facilitaram sobremaneira a interpretação dos resultados.

Referências

- [1] DAVIDOVITS, J. *Geopolymer: Chemistry and Applications*. 3rd ed. Geopolymer Institute. Saint Quentin, 2009.
- [2] ASTM C 348:02. *Standard test method for flexural strength of hydraulic-cement mortars*. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, August, 2002.
- [3] E398-1993. *Betões – Determinação da retração e da expansão*. Documentação Normativa. Especificação LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Maio, 2p.

- [4] E393-1993. *Betões – Determinação da absorção de água por capilaridade*. Documentação Normativa. Especificação LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Maio, 2p.
- [5] E394-1993. *Betões – Determinação da absorção de água por imersão*. Documentação Normativa. Especificação LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Maio, 2p.
- [6] ASTM C267-01. *Standard test methods for chemical resistance of mortars, grouts and monolithic surfacing and polymer concretes*. Annual Book of ASTM Standards, American Society of Testing Materials, Volume 04.05, October, 2001, 6p.
- [7] BS EN 13529-03. *Products and systems for the protection and repair of concrete structures – Test methods – Determination of resistance to severe chemical attack*. British Standards Institution. London, December, 2003, 11p.
- [8] NBR 15895:2010 – *Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2010. 6p