

Aditivo para tratamento posterior interno de concreto e argamassa

Utilização de polímeros superabsorventes em materiais de construção à base de cimento com cimentos de mistura

O presente artigo é parte de um estudo mais abrangente sobre a utilização de polímeros superabsorventes (SAP) em construção em concreto. Esta parte centra-se na avaliação da eficácia dos SAP como aditivos para tratamento posterior interno em materiais de construção à base de cimento com cimentos de mistura. São apresentados os resultados do estudo experimental de argamassas modificadas com polímeros com escória granulada e cinza volante. De acordo com os resultados, os SAP têm uma influência positiva sobre a argamassa com cimentos de mistura, uma vez que podem fornecer água ao longo de um período mais longo. A adição de SAP conduz assim a uma redução significativa da contração autógena. As argamassas modificadas por SAP têm, em comparação com os corpos de prova de referência, valores de referência final comparáveis, embora inicialmente sejam alcançados valores menores devido ao colapso do polímero. A utilização de SAP em cimentos de mistura corresponde aos requisitos da indústria de construção relativos à produção de materiais compósitos com desempenho melhorado.

■ Agnieszka J. Klemm e Fernando C. R. Almeida, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Caledoniana de Glasgow, GB
 Karol S. Sikora, departamento de Engenharia Civil, Universidade Xi'an Jiaotong-Liverpool, Suzhou, China ■

O presente artigo é a parte 2 de uma série sobre polímeros superabsorventes (SAP) como novo aditivo para concreto e argamassa. A parte 1 apresentou uma visão geral sobre o uso de SAP em materiais compósitos com cimentos normais [1], enquanto que no presente artigo são tematizados os impactos dos SAP em materiais de construção à base de cimento com cimentos de mistura, especialmente com escória granulada (EG) e cinza volante (CV).

O cimento de mistura, designado por cimento Portland (CP) com aditivos de cimento de reação hidráulica e/ou pozolânica (Supplementary Cementitious Materials, SCM). Devido à poupança de energia, o uso de SCM provoca uma redução do impacto ambiental em [2]-[3]. A produção de cimento é realizada a temperaturas

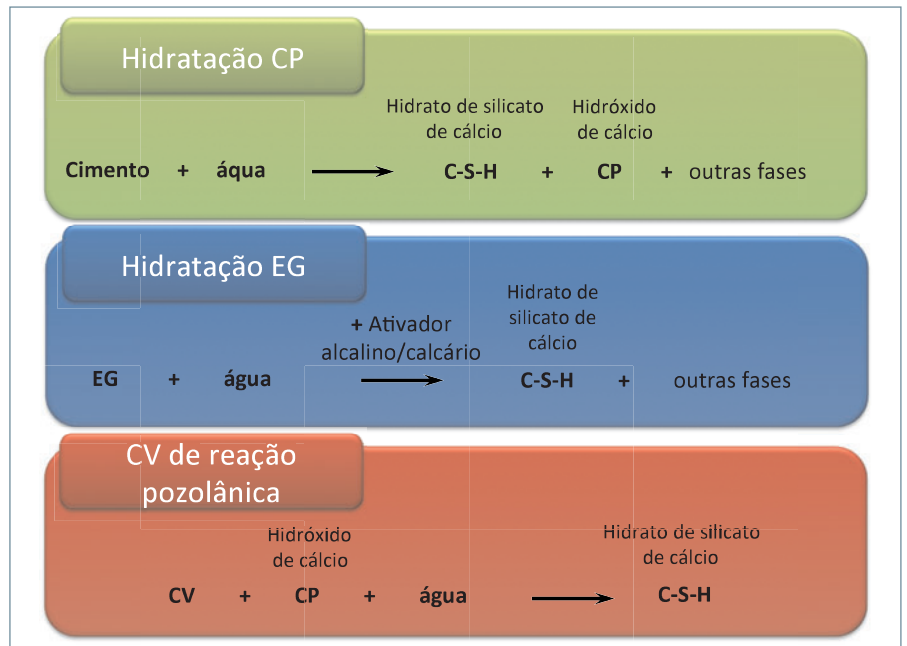


Fig. 2: Reações CP, EG e CV

muito elevadas (normalmente acima de 1400°C) e está associada a uma expulsão considerável de dióxido de carbono para

a atmosfera, ao consumo de grandes quantidades de matérias-primas não renováveis bem como à produção de poluentes como

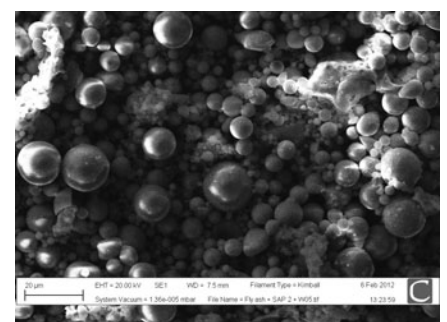
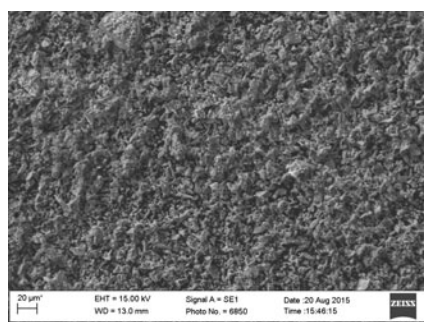
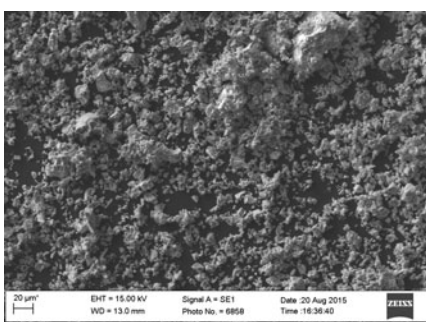


Fig. 1: Captações REM de CP (CEM I), EG e CV



■ Dr. Agnieszka J. Klemm é docente do tema materiais de construção no departamento de Engenharia Civil na Universidade Caledoniana de Glasgow. Ela trabalha no Instituto de Tecnologia do Concreto, é colaboradora do Chartered Institute of Building e também trabalha na Higher Education Academy. Além disso, ela é colaboradora RILEM e especialista em vários projetos de pesquisa europeus (FP7/H2020). Seus interesses de pesquisa incluem durabilidade e previsão do comportamento de materiais compósitos com matriz frágil, tecnologia de materiais e materiais de construção inteligentes. a.klemm@gcu.ac.uk



■ Fernando C. R. Almeida é doutorando no departamento de Engenharia Civil da Universidade Caledoniana de Glasgow. Ele concluiu um mestrado nas divisões de Construção Civil (Universidade Federal de São Carlos) e Engenharia Civil (Universidade Federal de São Carlos, incluindo um intercâmbio acadêmico com a Universidade de Coimbra). Seus interesses de pesquisa incluem a durabilidade e sustentabilidade de materiais de construção com foco na utilização de produtos secundários e novos materiais no concreto e argamassa. fernando.almeida@gcu.ac.uk



■ O Dr. Karol S. Sikora é docente do tema de materiais de construção sustentável e planejamento no departamento de Engenharia Civil da Universidade de Xi'an Jiaotong-Liverpool, na China, bem como professor convidado da Universidade da Irlanda, em Galway e docente honorário na universidade de Liverpool. Ele atua como representante da Irlanda em três ações COST na área de Engenharia de construção em madeira e é membro do comitê de normas irlandês para a indústria madeireira. Seus resultados de investigação foram publicados em mais de 20 revistas especializadas e atas de conferência revistas por pares. Possui experiência interdisciplinar e seus interesses de pesquisa incluem produtos de engenharia de construção em madeira, tecnologia de concreto, desenvolvimento sustentável e outros assuntos relacionados. karol.sikora@xjtlu.edu.cn

dioxinas e metais pesados [3]. Assim, a substituição de cimento Portland por SCM contribui com melhorias para a sustentabilidade da indústria de concreto em [2]-[8]. O uso de EG e CV não provoca só uma poupança na eliminação de resíduos, mas também a uma diminuição dos custos dos materiais de construção e ao desenvolvimento de soluções para um gerenciamento de resíduos ambientalmente responsável [5]. Além disso, as propriedades do concreto, como a resistência e durabilidade são melhoradas pelos SCM [2][6], o que aumenta a aceitação deste material de construção dentro da indústria de construção. A fig. 1 exibe captações REM de CP, EG e CV.

Os produtos secundários industriais têm de apresentar, pelo menos, uma das três características seguintes, para classificação como SCM: (i) características hidráulicas, ou seja, a capacidade de cura pela reação com a água (por ex. CP, EG), que eventualmente necessita de uma ativação, por ex. mediante uma subida do valor de pH (ativação alcalina), (ii) características pozolônicas, ou seja, a capacidade de cura pela reação com calcário em um meio aquoso (por ex. CV, EG, pó de sílica), onde, por regra, o calcário é retirado de CP, e (iii) características de ativação, ou seja a capacidade de reforço da hidratação de materiais de construção pozolônicos/hidráulicos pela preparação de calcário (por ex., resíduos muito calcários) e/ou a iniciação/aceleração da hidratação (ativação alcalina e de sulfato) [8]. A Fig. 2 exibe equações para a hidratação CP, para a hidratação EG e para a reação pozolônica de cinza volante.

Com EG, trata-se de um produto secundário da indústria do aço [2][9]. A escória granulada é um material hidráulico latente, cuja reatividade depende da composição química, da finura, do teor de vidro, da temperatura e da concentração alcalina do sistema de reação. Através da hidratação de escória granulada ativada pela carga alcalina/calcária presente em CP é formado hidrato de silicato de cálcio (CSH) (Fig. 2). A utilização de EG em cimento e concreto causa uma redução do calor de hidratação, uma solidificação retardada, maiores resistências finais, uma permeabilidade reduzida, bem como uma maior resistência aos ataques de cloretos e sulfatos, bem como reações álcali-silicas [9][10].

Concrete Curing Solutions



Brilliant Quality!

- Higher Product Quality in Shorter Time
- Possibility of Cement Savings
- Payback in 1-2 years
- Higher Production Output



CURETEC
Experts in Concrete Curing

CureTec Energietechnik GmbH & Co. KG
Lehmkuhlen 13 D - 49757 Vrees / Germany
Fon +49 (0) 4479 / 9390-600 · Fax +49 (0) 4479 / 9390-620

www.curetec.biz

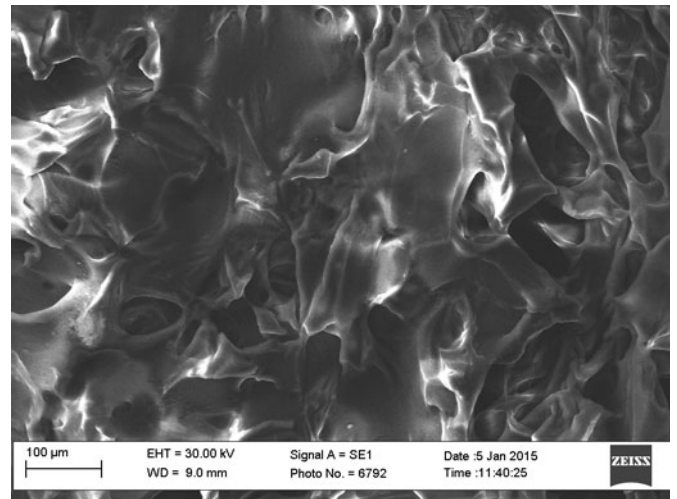
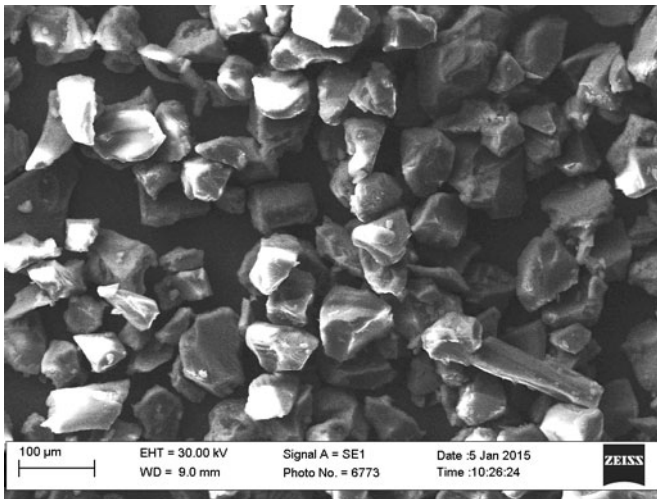


Fig. 3: Captação REM de SAP em estado seco e molhado

Em contrapartida, com CV (material pozo-lânico) trata-se de um produto secundário de usinas de carvão [2][11]. Na reação pozolânica, a sílica (Si(OH)_4 , existente em CV) e o hidróxido de cálcio (HC, a partir da hidratação do cimento) reagem na presença de água e formam o gel CSH (Fig. 2). A CV pode também incluir fases de aluminato (Al(OH)_4^-), que reagem em combinação com a sílica com HC e levam a formação de hidratos de silicato de alumínio de cálcio (por ex. C_2ASH_8). A atividade pozolânica da CV depende da finura, do teor de cálcio, da estrutura, da superfície específica, da distribuição de tamanhos de grãos e da perda por ignição (Loss On Ignition, LOI) a partir de [2]. Uma substituição parcial de CP por CV pode causar menores resistências iniciais, maiores resistências finais, menor redução do calor de hidratação, menor permeabilidade, maior resistência a descarga para a limpeza, uma maior resistência a sulfato em exposição à água do mar e uma prevenção de expansão álcali-silica [12].

A adição de EG ou CV ao concreto causa um retardo de solidificação e uma maior resistência final. Ambos os SCM podem causar uma desaceleração das reações do cimento, pelo que é necessário mais tempo para a formação dos produtos de hidratação. Por conseguinte, é aumentado o processo de cura, no qual deve ser assegurada uma quantidade de água suficiente. Os polímeros superabsorventes (SAP) podem ser usados como aditivos para o tratamento posterior interior, para melhoramento do processo de hidratação. As suas capacidades de absorção de grandes quantidades de água de uma mistura de concreto fresco e de oferecê-las novamente em estado fresco ou curado, podem ser usadas para melhorar algumas propriedades do concreto, por ex. uma redução da contração

autógena [1][13][14]. A Fig. 3 mostra captações REM dos SAP utilizados no presente estudo, em estado seco e molhado.

Assim, no presente artigo são apresentados os resultados dos ensaios de dois estudos com diferentes tipos de SAP, em arga-

Tab. 1: Composição dos corpos de prova de argamassa

Corpos de prova	Tipo SCM	Teor de SCM	Tipo de SAP	Cimento/areia (c/a)	Água/cimento (a/c)
RS-25	EG	25%	-	1:2	0,50
XS-25	EG	25%	X	1:2	0,50
YS-25	EG	25%	Y	1:2	0,50
RS-50	EG	50%	-	1:2	0,50
XS-50	EG	50%	X	1:2	0,50
YS-50	EG	50%	Y	1:2	0,50
RA-11	CV	25%	-	1:1	0,45
XA-11	CV	25%	X	1:1	0,45
ZA-11	CV	25%	Z	1:1	0,45
RA-12	CV	25%	-	1:2	0,45
XA-12	CV	25%	X	1:2	0,45
ZA-12	CV	25%	Z	1:2	0,45

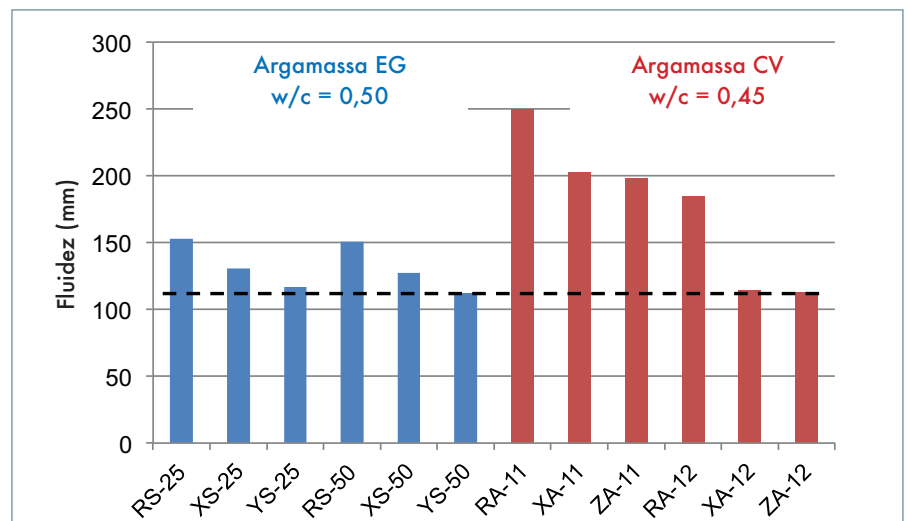


Fig. 4: Resultados da verificação de fluidez. A linha tracejada indica o nível de consistência para a determinação da relação a/c.

massas com cimentos de mistura (com EG e CV). No âmbito da série de ensaios foram testados três tipos de SAP: SAP X, SAP Y e SAP Z com uma capacidade de absorção de água de 25-30 g/g, 35 g/g e 10 g/g da solução de pasta cimento. Foi estudada a influência dos SAP na contração autógena (CA) (com ajuda do procedimento de tubo reforçado [15]) bem como as propriedades mecânicas [16]. A composição da argamassa utilizada no âmbito do presente estudo está representada na Tab. 1. A relação água-cimento (a/c) da argamassa CV foi ajustada em consideração à trabalhabilidade da argamassa EG [17]; a argamassa seca com escória granulada (com 50% de EG e SAP Y) foi utilizada como padrão para determinar a consistência da argamassa mais seca com FA (com SAP Z r na proporção de 1:2) (Fig. 4). Em seguida, a relação a/c foi ajustada para todas as argamassas contendo CV.

Escória granulada (EG)

Para avaliação da influência de ambos os tipos de SAP (X e Y) sobre argamassa EG, o CP foi substituído por porções diferentes de escória granulada (25% e 50%) (Tab. 1). Os corpos de prova correspondentes sem EG foram apresentados no artigo anterior [1].

Normalmente, o concreto produzido com EG apresenta um comportamento de contração autógena mais pronunciado que o concreto de referência produzido sem EG [10][18][19]. A este é atribuído geralmente a maior contração química, a presença de poros mais finos, a supressão de hidróxido de cálcio (HC) como freio de contra-

ção, bem como a redução da umidade de poros associada às reações de hidratação [20].

Uma CA expandida pode ser atribuída ao elevado grau de hidratação da EG e, assim, a um maior grau de autosssecagem. Além disso, o CSH formado na reação (Fig. 2) causa uma contração química, uma vez que os produtos de hidratação apresentam um volume menor que a água e os produtos isentos de água iniciais em conjunto [18]. Conseqüentemente, uma contração química elevada de concreto com EG causa uma autosssecagem mais rápida e reforçada, e a uma maior CA [10][19].

Além disso, pode ser alcançada uma estrutura mais densa, mediante a adição de escória granulada a uma matriz de cimento, devido à formação de pequenos poros. Por sua vez, os poros mais finos causam uma menor umidade relativa interna, o que provoca maiores forças capilares durante o processo de autosssecagem, causando assim uma maior CA [10][21]. Com este é fornecido um comportamento linear elástico da matriz com a escória granulada [22]. Por outro lado, a contração autógena também pode ser causada por deformações plásticas e por fluência da matriz de cimento sob tensão própria, que resulta da transformação de etringita em monossulfato e da utilização de HC [22]. Além disso, a escória granulada em ligação com o HC libertado na hidratação de CP pode revelar uma atividade pozolânica mínima, que é comparável às reações de CV (Fig. 2). O consumo causado pela reação de cristais HC pode libertar tensões interiores no concreto e favorecer uma maior contração.



Novidade mundial: KKM-RT



O seu parceiro para:

- Misturadores cônicos KKM
- Misturadores de laboratório KKM-L + KKM-RT
- Misturadores intensivos com 1 ou 2 agitadores mecânicos
- Equipamentos de mistura estacionários e móveis
- Balanças para cimento, água, agregados e aditivos
- Elevadores (caçamba aérea ou de descarga pelo fundo)
- Silos para cimento ou agregados
- Equipamentos de transporte e alimentação
- Acessórios



Gemeindebeunden 6 · D-88422 Bad Buchau
 Tel: +49(0)7582-93030 · Fax: +49(0)7582-930330
 info@kniele.de · www.kniele.de

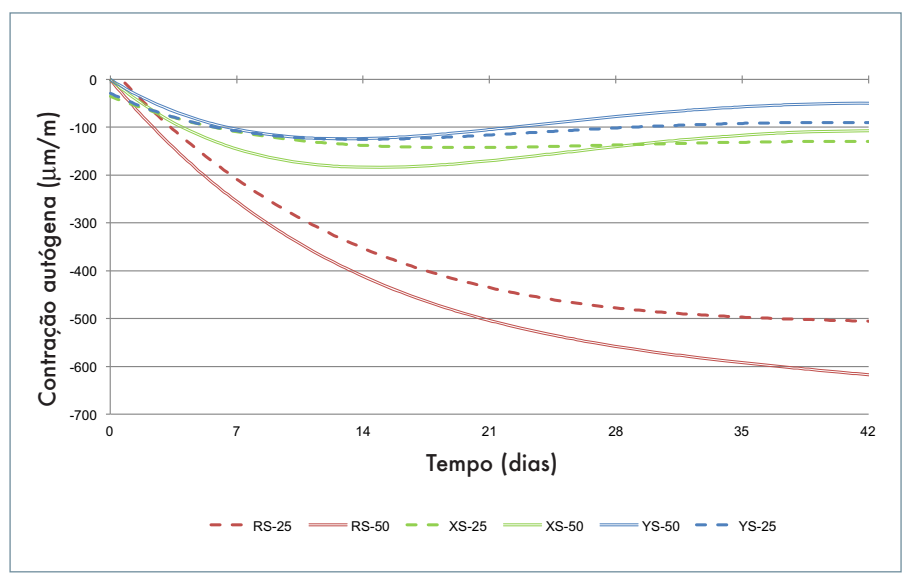


Fig. 5: Contração autógena de argamassas com escória granulada (EG)

Esta maior CA pode ser resolvida mediante o aumento do teor de EG na mistura [18]-[20]. Quanto maior a porção de CP criada pela EG, mais pronunciada é a contração, por autosssecagem. Isso também é confirmado nos resultados dos ensaios representados na Fig. 5. A argamassa com uma porção de EG de 25% e 50% apresentam, depois de 42 dias, uma CA de cerca de 500 ou 600 $\mu\text{m}/\text{m}$.

Este comportamento altera-se drasticamente ao adicionar SAP. Enquanto a argamassa com EG apresenta uma CA de mais de 500 $\mu\text{m}/\text{m}$, os valores dos corpos de prova correspondentes com SAP ficam abaixo de 120 $\mu\text{m}/\text{m}$ (redução em mais de 75%). Facto óbvio: quanto maior a capacidade de absorção de água dos SAP, mais pronunciada a redução da CA. Os SAP podem funcionar como "reservatórios de água" e causar uma alimentação com água e uma redução da tensão. É possível introduzir os SAP na mistura como pequenas reservas de água, que preparam a água para as reações de hidratação mais duradouras [23][24]. Especialmente em argamassas com EG, esta alimentação de água de longo prazo pode provocar reações eficientes da escória granulada, sendo evitada uma autosssecagem em um estágio precoce.

Por outro lado, os SAP podem também funcionar como liberadores de tensão. As argamassas com EG apresentam tendencialmente uma estrutura porosa mais fina, mediante a qual são reforçadas as forças de tensão causadas por meio de crescente de água entre as paredes dos poros [18]. Para aumentar o teor de ar na argamassa fresca por meio de SAP [1], estes poros de ar adicionais podem contribuir para a redução de tensões capilares. Em seguida, as forças criadas no processo de autosssecagem são reduzidas e os seus impactos sobre a CA são minimizados. Dessa forma, o aumento do teor de ar pelos SAP compensa os impactos de uma estrutura de poros finos pela EG.

Relativamente às características mecânicas de materiais de construção à base de cimento com escória granulada, é geralmente aceite que a EG provoca uma redução da resistência inicial, apesar de causar um aumento da resistência em longo prazo [2][9][19][25]. Isso se deve ao facto de que a escória granulada somente desenvolve a sua capacidade hidráulica lentamente, porque esta precisa de uma ativação para o desencadeamento do processo de hidratação e para a formação de CSH [18]. Além disso, existe uma estreita conexão

entre a superfície e a distribuição de tamanhos de grãos de escória granulada e a resistência de argamassas com EG [9]. Basicamente, a hidratação de escória granulada pode ser acelerada mediante o aumento da sua superfície específica, a utilização de ativadores químicos (alcalinos em CP) ou pelo aumento da temperatura de reação [18]. No estudo experimental aqui descrito, o CP com 410 m^2/kg ou 390 m^2/kg apresenta uma maior finura que a escória granulada. Isso pode ser visto como explicação para a redução da resistência à compressão e à tração com porções elevadas de EG (como se pode ver nas Fig. 6 e 7). Além disso, a porcentagem para a ativação da hidratação da escória granulada diminui os alcalinos disponíveis na mistura com o aumento da porcentagem de substituição da escória granulada no CP. Este modelo de uma resistência à compressão reduzida em argamassas com elevado teor de EG continua na presença de SAP.

Além disso, os SAP provocam, obviamente, somente uma ligeira redução da resistência à compressão de argamassas com EG, especialmente em um estágio precoce. Esta perda de resistência é, no entanto, compensada parcialmente ao longo do tempo pela hidratação contínua apoiada pelos mecanismos interiores de tratamento posterior [24][26][27]. Assim, a Fig. 6 mostra que a argamassa com SAP Y, apesar de apresentar nos primeiros dias uma resistência à compressão ligeiramente diminuída, depois de 90 dias apresenta uma resistência comparável aos corpos de prova de referência. Os SAP favorecem a formação de uma rede de CSH densa no estado colapsado, conduzindo assim a um fecho de poros e a uma resistência à compressão aumentada [28].

Como já referido em [26], as características de resistência à tração das argamassas EG podem ser melhoradas pelos SAP, especialmente em estágios finais. No

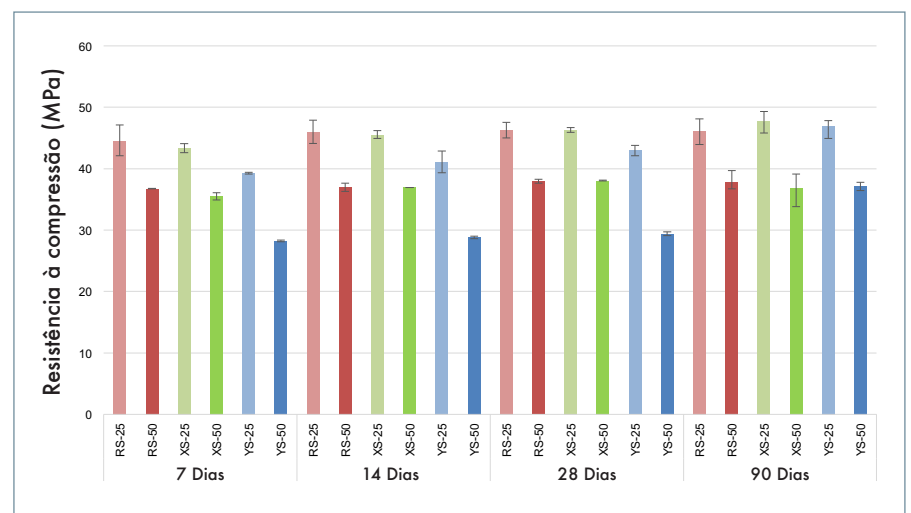


Fig. 6: Resultados da verificação de resistência à compressão de argamassas com EG

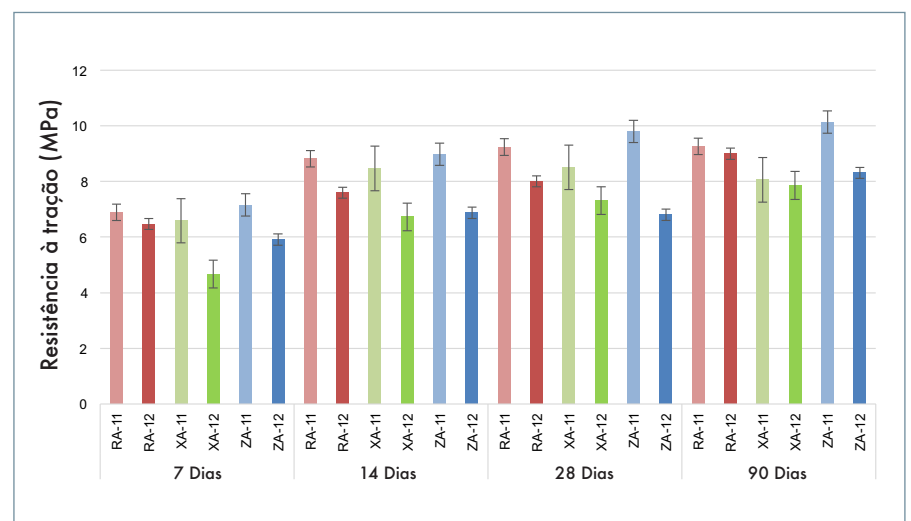


Fig. 7: Resultados da verificação de resistência à tração de argamassas com EG

entanto, os resultados dos ensaios aqui apresentados não apoiam esta afirmação; somente os corpos de prova com SAP Y e 25% de EG apresentam melhores resultados que a argamassa de referência correspondente (Fig. 7). Assim, os impactos dos diferentes tipos de SAP são obviamente de maior significado para o comportamento de flexão de argamassas com escória granulada. O desempenho dos SAP em argamassas EG pode depender da sua capacidade e cinética de sorção, bem como da concentração na solução porosa, devido às diferentes porcentagens de escória granulada na mistura [1][24][28]. Geralmente, a diferença entre os valores de resistência à tração de longo prazo é diminuída pelo aumento da porcentagem de EG. Uma vez que esta característica ocorre com maior incidência com poros menores, podem ser fornecidos gradualmente produtos de hidratação posteriores da escória granulada nestas cavidades mais finas. Esse efeito leva a valores de resistência à tração da mesma ordem de grandeza que a comparação de argamassas com diferentes teores de EG em estágios finais.

Assim, os SAP podem ser inseridos para redução da CA em argamassas com EG. Quanto maior a porção de EG, mais pronunciada a redução. Durante a adição de SAP não existem quaisquer impactos significativos na resistência à compressão em longo prazo, obviamente que a resistência depende em elevada medida do tipo de SAP e do teor de EG de uma mistura.

Cinza volante (CV)

Os impactos da modificação de SAP de argamassas com CV para o comportamento de contração autógena foram claramente reconhecidos, como se pode ver na Fig. 8. As misturas de referência com uma relação de cimento-areia (c/a) de 1:1 criaram desde o início os maiores valores. Os resultados não foram afetados da mesma forma pelos diferentes SAP. Nos corpos de prova com SAP Z e c/a = 1:1, os impactos foram os mais pronunciados, aqui a CA foi quase quatro vezes menor que a do corpo de prova de referência. Com SAP X foi criada uma redução tripla sete dias após o fabrico do corpo de prova. Entre a primeira e a terceira semana, a CA permaneceu quase inalterada. Na terceira semana, o processo de inchamento do corpo de prova com SAP X e SAP Z foi quase completado. Embora o corpo de prova de referência com c/a = 1:2 (RA-12) apresente uma CA baixa, em um estágio final foi registado um nível idêntico ao do corpo de prova de referência com menor teor de areia (RA-11). Uma tendência semelhante foi observada em todos os corpos de prova SAP: entre a segunda e a quinta semanas foi registado um ligeiro inchamento, no entanto, depois não foram mais observadas outras alterações lineares.

Uma vez que o corpo de prova com SAP Z apresenta uma CA significativamente baixa e um corpo de prova de referência uma CA elevada, é provável que a maioria da água armazenada tenha sido consumida durante este período. Por conseguinte, pode ser assumido que o SAP Z alimentou a matriz de cimento com água, assim que a autosecação tiver ocorrido. Um ligeiro inchamento até cinco semanas pode indicar que a dessorção de água condicionada pelo SAP Z durou pelo menos até esse ponto. Mediante o SAP X, a CA diminui de forma comprovada; assim, o efeito desse polímero é comparável ao do SAP Z.

O tipo de polímero e, conseqüentemente, a capacidade de absorção de água e a cinética de absorção/dessorção foram considerados os fatores com maior influência no desenvolvimento da CA. Apesar dos impactos comparáveis sobre a CA, o SAP X e o SAP Z apresentam um comportamento de sorção muito diferente.



SOLUÇÕES PARA PRÉ-FABRICADOS E USINAS DE CONCRETO



August 24th - 26th
Booth 640



MCT Italy S.r.l.
Via Perugia 105
06084 Bettona - Perugia
Italy

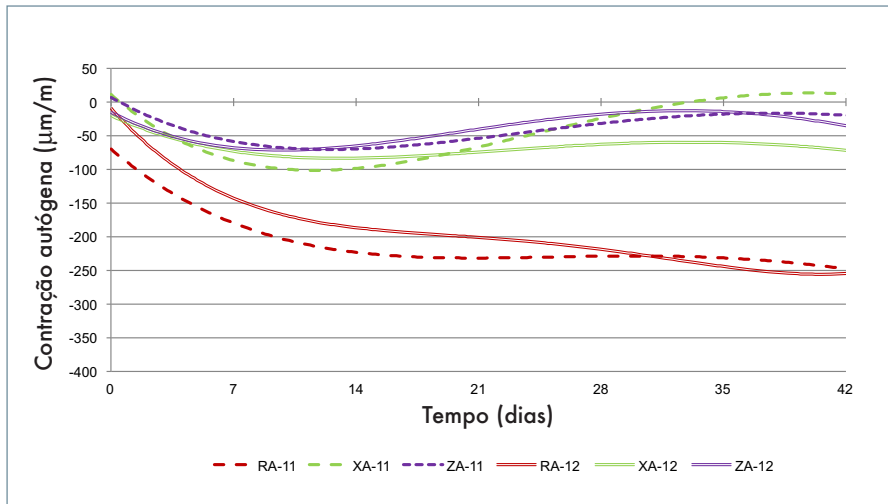


Fig. 8: Contração autóloga de argamassas com cinza volante (CV)

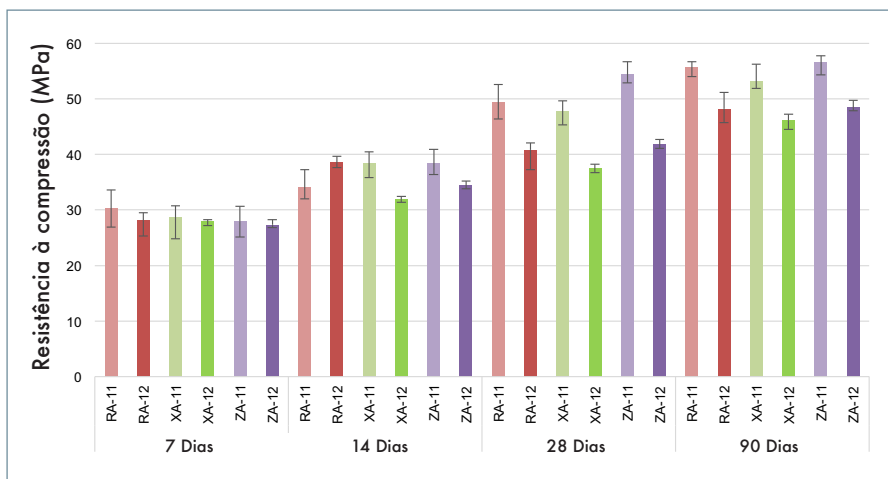


Fig. 9: Resultados da verificação de resistência à compressão de argamassas com CV

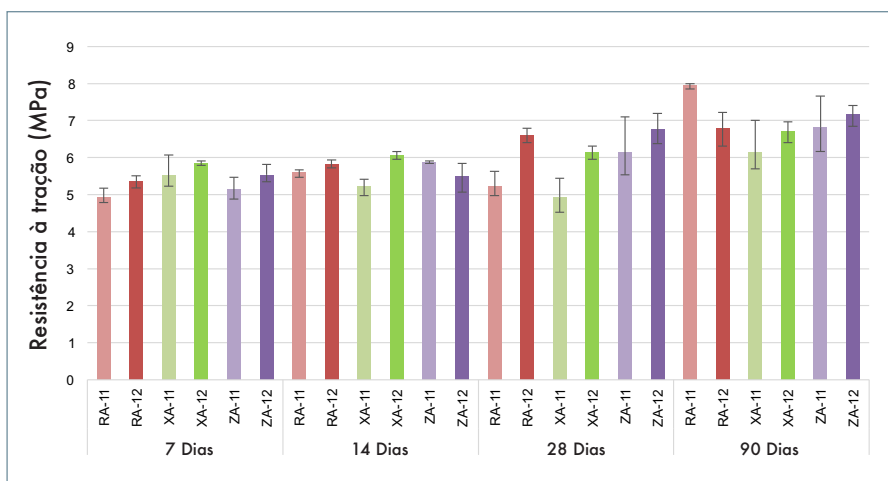


Fig. 10: Resultados da verificação de resistência à tração de argamassas com CV

de aproximadamente uma semana. Além disso, a CV pode ter uma influência decisiva sobre o comportamento descrito. Vários investigadores [29]-[31] relatam que a CA aumenta com o aumento do grau de hidratação da CV. Berry et al. [31] relatam que o teor de etringita em misturas de cimento CV, nas primeiras cinco horas depois do processo de mistura, foi superior ao teor nas misturas com CEM I, o que conduziu a um maior consumo de água. Como consequência, puderam ocorrer espaços ociosos vazios, o que conduziu a uma CA aumentada. No entanto, foram também relatados resultados opostos [32].

Os corpos de prova com uma relação de cimento-areia de 1:2 apresenta uma resistência à compressão um pouco menor que os corpos de prova com uma relação de 1:1, como representado na Fig. 9. Vários estudos registam um desempenho mecânico comparável de concretos de cimento Portland e concretos com 20-30% de cinza volante do teor de cimento [33-37]. Geralmente, foi determinado um esquema semelhante nos corpos de prova de referência e nos corpos de prova modificados por SAP. Os valores de resistência à compressão de todos os corpos de prova aumentaram em um estágio final (depois de quatro semanas). Os valores de resistência à tração de todos os corpos de prova apresentam durante as primeiras duas semanas um certo aumento, estabilizando no decurso das duas semanas seguintes e voltando a aumentar depois (Fig. 10). Depois de um tempo de cura de quatro semanas, os corpos de prova com uma relação c/a de 1:2 não apresentam, no entanto, nenhuma alteração significativa. Nos corpos de prova com uma relação c/a de 1:1, depois da quarta semana foi registada uma subida dos valores de resistência, mais pronunciada nos corpos de prova de referência.

Em oposição aos corpos de prova com uma relação de c/a de 1:1, os SAP têm um impacto insignificante no desempenho de argamassa com uma relação c/a de 1:2. Em todos os corpos de prova estudados se pode observar uma subida baixa mas contínua da resistência à compressão e da resistência à tração. Isso pode ser ligado à influência significativa do teor de agregado mais elevado. Devido ao baixo teor de pasta de cimento, a formação de "Poros SAP" (ou seja, poros restantes depois do colapso dos SAP) só tem um impacto limitado no desenvolvimento da resistência [28][38][39]. Os "poros SAP" são suficientemente pequenos e não afetam a resistência à compressão. Por outro lado, a ocor-

A redução significativa da trabalhabilidade pelo SAP Z foi um indicador de uma absorção de água especialmente rápida. Contudo, uma redução clara da CA na primeira semana pode indicar uma diminuição da autosssecagem pela liberação de

uma quantidade significativa de água a partir do SAP Z em colapso. Em contraste, o SAP X não tem, em comparação com o SAP Z, nenhum impacto significativo em termos de trabalhabilidade e retardo da contração autóloga, que foi terminada depois

Um Produto Para Cada Projeto

Tecnologia de mistura líder
do Reino Unido
Especialistas desde 1969.

rência de "poros SAP" influencia a resistência à tração, que reage a alterações de porosidade em todos os tamanhos de poros.

Além disso, a adição de CV ao cimento Portland tem, independentemente de uma modificação por meio de SAP, uma influência significativa no processo de hidratação e no desenvolvimento de microestruturas em materiais compósitos à base de cimento.

O grau de reatividade da CV está ligado à sua distribuição de tamanhos de grãos [40][41]. De acordo com as observações, a reatividade é executada de forma diretamente proporcional à porção de partículas inferiores a 10 μm e inversamente proporcional a partículas superiores a 45 μm [40]. Além disso, as porções de agregados mais elevadas na matriz não têm qualquer influência significativa sobre a densidade do gel CSH nas interfaces de partículas em materiais compósitos com cimentos CV. Uma vez que as partículas de cinza volante têm geralmente um tamanho inferior a 40 μm , funcionam como materiais de enchimento eficientes para espaços ociosos na área dos agregados e têm um papel importante no adensamento das partículas de cimento. Além disso, é aceite que 91 dias após o início da hidratação, uma parte da cinza volante ainda esteja livre [40][42]. Estas partículas livres, que apresentam uma módulo de elasticidade superior ao da matriz, podem funcionar como micro-agregado na pasta de cimento e são assim consideradas como material compósito em microescala.

Observações finais e perspectiva

Os cimentos de mistura ganham cada vez mais importância na indústria de construção devido aos benefícios ambientais resultantes e à melhoria geral do desempenho de materiais de construção à base de cimento. No entanto, devido ao seu processo de hidratação prolongada devido a reações pozolânicas, estes apresentam um maior risco de autosssecagem e formação de fissuras. Isso pode ser resolvido com a introdução de polímeros superabsorventes (SAP), que fornecem água para o processo de hidratação durante um período de tempo mais longo.

Os estudos experimentais confirmaram que a adição de SAP às argamassas de EG e às argamassas de CV causam uma redução significativa da contração autógena. Ambos os materiais apresentam, depois de duas semanas, ainda ligeiros inchaços, que

indicam um aumento na formação de produtos de hidratação.

A influência nas características mecânicas não depende somente do tipo de SAP (composição química, ligações cruzadas e capacidade de absorção de água), mas também do tipo de cimento. Também a concentração de íons (causada por diferentes SCM) em uma solução porosa tem uma influência decisiva no comportamento de absorção e dessorção. Depois de um tempo de cura de seis semanas pode, no entanto, ser observada uma tendência semelhante em todos os corpos de prova. Assim, as argamassas modificadas por SAP apresentam uma resistência final semelhante à dos corpos de prova de referência, embora inicialmente, devido ao colapso dos SAP, seja registada uma diminuição dos valores.

Contudo, deve notar-se que são necessários estudos mais detalhados antes de poderem ser formuladas outras recomendações práticas, especialmente com a utilização de diferentes combinações de aditivos de cimento. ■



rapid

International Headquarters

Rapid International Ltd

96 Mullavilly Road, Tandragee,

County Armagh, Irlanda do Norte.

BT62 2LX

T: +44 (0) 28 3884 0671

E: marketing@rapidinternational.com

www.rapidinternational.com

■ Bibliografía

- [1] A. J. Klemm and F. C. R. Almeida, "Application of Superabsorbent polymers as novel admixture for cementitious materials," *Concrete Plant International*, no. 3, 2016.
- [2] R. Siddique and M. I. Khan, *Supplementary Cementing Materials*, vol. 1. Berlin: Springer, 2011.
- [3] C. Meyer, "The greening of the concrete industry," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 31, no. 8, pp. 601–605, Sep. 2009.
- [4] E. Aprianti, P. Shafiqh, S. Bahri, and J. N. Farahani, "Supplementary cementitious materials origin from agricultural wastes – A review," *Constr. Build. Mater.*, vol. 74, pp. 176–187, Jan. 2015.
- [5] F. A. Rodrigues and I. Joekes, "Cement industry: Sustainability, challenges and perspectives," *Environ. Chem. Lett.*, vol. 9, no. 2, pp. 151–166, 2011.
- [6] E. C. Arvaniti, M. C. G. Juenger, S. a. Bernal, J. Duchesne, L. Courard, S. Leroy, J. L. Provis, A. Klemm, and N. De Belie, "Physical characterization methods for supplementary cementitious materials," *Mater. Struct.*, vol. 48, no. 11, pp. 3675–3686, 2014.
- [7] B. Lothenbach, K. Scrivener, and R. D. Hooton, "Supplementary cementitious materials," *Cem. Concr. Res.*, vol. 41, no. 12, pp. 1244–1256, Dec. 2011.
- [8] O. Peyronnard and M. Benzaouza, "Estimation of the cementitious properties of various industrial by-products for applications requiring low mechanical strength," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 56, no. 1, pp. 22–33, Nov. 2011.
- [9] R. Siddique and R. Bennacer, "Use of iron and steel industry by-product (GGBS) in cement paste and mortar," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 69, pp. 29–34, Dec. 2012.
- [10] C. Jiang, Y. Yang, Y. Wang, Y. Zhou, and C. Ma, "Autogenous shrinkage of high performance concrete containing mineral admixtures under different curing temperatures," *Constr. Build. Mater.*, vol. 61, pp. 260–269, Jun. 2014.
- [11] M. Ahmaruzzaman, "A review on the utilization of fly ash," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 36, no. 3, pp. 327–363, Jun. 2010.
- [12] F. Massazza, "Pozzolanic cements," in *Cement & Concrete Composites*, 1993, pp. 185–214.
- [13] V. Mechtcherine, M. Gorges, C. Schroeßl, A. Assmann, W. Brameshuber, A. B. Ribeiro, D. Cusson, J. Custódio, E. F. Silva, K. Ichimiya, S. Igarashi, A. Klemm, K. Kovler, A. N. Mendonça Lopes, P. Lura, V. T. Nguyen, H.-W. Reinhardt, R. D. T. Filho, J. Weiss, M. Wyrzykowski, G. Ye, and S. Zhutovsky, "Effect of internal curing by using superabsorbent polymers (SAP) on autogenous shrinkage and other properties of a high-performance fine-grained concrete: results of a RILEM round-robin test," *Mater. Struct.*, vol. 47, no. 3, pp. 541–562, 2013.
- [14] V. Mechtcherine, H.-W. Reinhardt, and (Eds.), *Application of Superabsorbent Polymers (SAP) in Concrete Construction: State-of-the-Art Report Prepared by Technical Committee 225-SAP*. RILEM: Springer, 2012.
- [15] ASTM Standard: Standard test method for autogenous strain of cement paste and mortar. ASTM C-1698: 2009.
- [16] BS: Methods of test for mortar for masonry – part 11: determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. BS EN 1015-11: 1999.
- [17] BS: Methods of test for mortar for masonry – part 3: determination of consistence of fresh mortar (by flow table). BS EN 1015-3: 1999.
- [18] M. Valcuende, F. Benito, C. Parra, and I. Miñano, "Shrinkage of self-compacting concrete made with blast furnace slag as fine aggregate," *Constr. Build. Mater.*, vol. 76, pp. 1–9, Feb. 2015.
- [19] K. M. Lee, H. K. Lee, S. H. Lee, and G. Y. Kim, "Autogenous shrinkage of concrete containing granulated blast-furnace slag," *Cem. Concr. Res.*, vol. 36, no. 7, pp. 1279–1285, Jul. 2006.
- [20] Y. Wei, W. Hansen, J. J. Biernacki, and E. Schlagen, "Unified shrinkage model for concrete from autogenous shrinkage test on paste with and without ground-granulated blast-furnace slag," *ACI Mater. J.*, vol. 108, no. 1, pp. 13–20, 2011.
- [21] P. Lura, K. van Breugel, and I. Maruyama, "Effect of curing temperature and type of cement on early-age shrinkage of high-performance concrete," *Cem. Concr. Res.*, vol. 31, no. 12, pp. 1867–1872, Dec. 2001.
- [22] P. Lura, "Autogenous deformation and internal curing of concrete," Delft University of Technology, 2003.
- [23] D. Snoeck, O. M. Jensen, and N. De Belie, "The influence of superabsorbent polymers on the autogenous shrinkage properties of cement pastes with supplementary cementitious materials," *Cem. Concr. Res.*, vol. 74, pp. 59–67, Aug. 2015.
- [24] C. Schröfl, V. Mechtcherine, and M. Gorges, "Relation between the molecular structure and the efficiency of superabsorbent polymers (SAP) as concrete admixture to mitigate autogenous shrinkage," *Cem. Concr. Res.*, vol. 42, no. 6, pp. 865–873, Jun. 2012.
- [25] A. Oner and S. Akyuz, "An experimental study on optimum usage of GGBS for the compressive strength of concrete," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 29, no. 6, pp. 505–514, Jul. 2007.
- [26] H. Beushausen, M. Gillmer, and M. Alexander, "The influence of superabsorbent polymers on strength and durability properties of blended cement mortars," *Cem. Concr. Compos.*, vol. 52, pp. 73–80, 2014.
- [27] A. J. Klemm and K. Sikora, "The effect of cement type on the performance of mortars modified by superabsorbent polymers," in *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting III*, M. G. Alexander, H.-D. Beushausen, F. Dehn, and P. Moyo, Eds. London: Taylor and Francis, 2012, pp. 210–216.
- [28] A. J. Klemm and K. S. Sikora, "The effect of Superabsorbent Polymers (SAP) on microstructure and mechanical properties of fly ash cementitious mortars," *Constr. Build. Mater.*, vol. 49, pp. 134–143, 2013.
- [29] M. H. Zhang, "Microstructure, crack propagation, and mechanical properties of cement pastes containing high volumes of fly ashes," *Cem. and Concr. Res.*, vol. 25, no. 6, pp. 1165–1178, 1995.
- [30] P. Termkhajornkit, T. Nawa, M. Nakai, and T. Saito, "Effect of fly ash on autogenous shrinkage," *Cem and Concr. Res.*, vol. 35, no. 3, pp. 473–482, 2005.
- [31] E. E. Berry, R. T. Hemmings, and B. J. Cornelius, "Mechanisms of hydration reactions in high volume fly ash pastes and mortars," *Cem and Concr. Compos.*, vol. 12, no. 4, pp. 253–261, 1990.
- [32] M. H. Shehata, and M. D. A. Thomas, "The effect of fly ash composition on the expansion of concrete due to alkali-silica reaction," *Cem. and Concr. Res.*, vol. 30, no. 7, pp. 1063–1072, 2000.
- [33] F. Rivera, P. Martínez, J. Castro, and M. López, "Massive volume fly-ash concrete: A more sustainable material with fly ash replacing cement and aggregates," *Cem. and Concr. Compos.*, vol. 63, no. 10, pp. 104–112, 2015.
- [34] A. A. Ramezani-pour, and V.M. Malhotra, "Effect of Curing on the Compressive Strength, Resistance to Chloride-Ion Penetration and Porosity of Concretes Incorporating Slag, Fly Ash or Silica Fume," vol. 17, no. 2, pp. 125–133, 1995.
- [35] P. Chindapasirt, C. Jaturapitakkul, and T. Sinsiri, "Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste," *Cem. and Concr. Compos.*, vol. 27, no. 4, pp. 425–428, 2005.
- [36] A. Harison, V. Srivastava, and A. Herbert, "Effect of Fly Ash on Compressive Strength of Portland Pozzolona Cement Concrete," *JAIR*, vol. 2, no. 8, pp.476-479, 2014.
- [37] V. G. Papadakis, "Effect of fly ash on Portland cements systems Part I. Low-calcium fly ash," *Cem. and Concr. Res.*, vol. 29, no. 11, pp. 1727–1736, 1999.
- [38] K. S. Sikora, and A. J. Klemm, "The effect of Superabsorbent Polymers (SAP) on workability and hydration process in fly ash cementitious composites," *J. Mater. Civil Eng.*, vol. 27, no. 5, 2015.
- [39] K. S. Sikora, and A. J. Klemm, "The effect of Superabsorbent Polymers (SAP) on performance of fly ash cementitious mortars exposed to accelerated freezing/thawing conditions," *Int. J. CEMEM*, vol. 2, no. 3, pp. 255–268, 2014.
- [40] P. K. Mehta, "Influence of fly ash characteristics on the strength of portland-fly ash mixtures," *Cem. and Concr. Res.*, vol. 15, no. 4, pp. 669–674, 1985.
- [41] K. Ergoddu, and P. Turker, "Effects of fly ash particle size on strength of portland cement fly ash mortars," *Cem. and Concr. Res.*, vol. 28, no. 9, pp. 1217–1222, 1998.
- [42] V. M. Malhotra, and P. K. Mehta, "High-performance, High-volume Fly Ash Concrete: Materials, Mixture Proportioning, Properties, Construction Practice, and Case Histories, edition 2," *Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development*, Inc., Ottawa, Canada, 2005.