USO DE ESCÓRIA, SÍLICA ATIVA E POZOLANAS: IMPACTOS EM RESISTÊNCIA E SUSTENTABILIDADE

USE OF SLAG, SILICA FUME AND POZZOLANS: IMPACTS ON STRENGTH AND SUSTAINABILITY

José Rinaldo Domingos de Melo

Engenheiro Civil e Engenheiro de Segurança do Trabalho. Pós-Doutor pela Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ.

RESUMO

A indústria da construção civil é responsável por parcela significativa das emissões globais de dióxido de carbono, especialmente em virtude da produção de cimento Portland. A substituição parcial do clínquer por materiais cimentícios suplementares (MCS), tais como escória de alto-forno, sílica ativa e pozolanas naturais ou artificiais, configura estratégia consolidada para mitigar impactos ambientais e, em muitos casos, aprimorar desempenho mecânico e durabilidade do concreto. Este artigo de revisão analisa, de forma sistematizada, os efeitos desses materiais sobre a resistência à compressão, propriedades no estado fresco e endurecido, microestrutura e indicadores de sustentabilidade. A metodologia consistiu em síntese crítica da literatura técnica e científica, com ênfase em estudos experimentais e revisões recentes. Os resultados sintetizados indicam que a sílica ativa, em teores de 5% a 12%, eleva a resistência e reduz a permeabilidade de forma expressiva; a escória de alto-forno, em teores de 30% a 70%, promove ganhos de resistência

em idades avançadas e redução de emissões de CO_2; e as pozolanas contribuem para a densificação da matriz e melhoria da durabilidade. Conclui-se que o uso combinado e dosado desses materiais permite conciliar desempenho estrutural e sustentabilidade, desde que observados aspectos de cura, finura e compatibilidade com aditivos.

Palavras-chave: Escória de alto-forno. Sílica ativa. Pozolanas. Resistência do concreto. Sustentabilidade.

ABSTRACT

The construction industry accounts for a significant share of global carbon dioxide emissions, mainly due to Portland cement production. Partial replacement of clinker by supplementary cementitious materials (SCMs), such as ground granulated blast-furnace slag, silica fume and natural or artificial pozzolans, is a well-established strategy to mitigate environmental impacts and, in many cases, improve mechanical performance and durability of concrete. This review article systematically examines the effects of these materials on compressive strength, fresh and hardened properties, microstructure and sustainability indicators. The methodology consisted of a critical synthesis of

technical and scientific literature, with emphasis on experimental studies and recent reviews. The synthesized results indicate that silica fume, at contents of 5% to 12%, significantly increases strength and reduces permeability; blast-furnace slag, at contents of 30% to 70%, promotes strength gains at later ages and reduction of CO_2 emissions; and pozzolans contribute to matrix densification and improved durability. It is concluded that the combined and properly dosed use of these materials allows reconciling structural performance and sustainability, provided that curing, fineness and admixture compatibility aspects are observed.

Keywords: Blast-furnace slag. Silica fume. Pozzolans. Concrete strength. Sustainability.

1 INTRODUÇÃO

A produção mundial de cimento ultrapassa quatro bilhões de toneladas anuais e responde por aproximadamente 7% a 8% das emissões antropogênicas de dióxido de carbono (CO_2). Esse cenário impõe à indústria da construção a necessidade de soluções que reduzam o fator clínquer sem comprometer a segurança estrutural e a durabilidade das edificações. Nesse contexto, os materiais cimentícios suplementares (MCS) – entre os quais se destacam a escória granulada de alto-forno, a sílica ativa e as pozolanas – assumem papel central na transição para uma construção de menor impacto ambiental.

A escória de alto-forno é subproduto da fabricação de ferro-gusa. Quando resfriada bruscamente (granulação), apresenta estrutura amorfa e potencial hidráulico latente, ativado na presença de hidróxido de cálcio ou álcalis. A sílica ativa, por sua vez, é resíduo ultrafino da produção de silício metálico ou ferrossilício, composta predominantemente por dióxido de silício amorfo (> 85%), com partículas da ordem de 0,1 a 0,3 µm. As pozolanas, naturais (cinzas vulcânicas, terras diatomáceas) ou artificiais (cinza volante, cinza de casca de arroz, metacaulim), reagem com o hidróxido de cálcio liberado na hidratação do cimento, formando silicatos de cálcio hidratados adicionais (C-S-H).

A relevância do tema transcende a esfera ambiental. Em muitos casos, o uso adequado desses materiais resulta em concretos com maior resistência mecânica, menor permeabilidade, maior resistência a agentes agressivos e vida útil prolongada. Tais benefícios técnicos, quando combinados à redução de emissões e ao aproveitamento de resíduos industriais, configuram solução de engenharia alinhada aos princípios de desenvolvimento sustentável e de economia circular.

No Brasil, a disponibilidade de escória de alto-forno é favorecida pela presença de parque siderúrgico expressivo, enquanto a sílica ativa é produzida em unidades de silício metálico e ferrossilício. As pozolanas naturais ocorrem em diversas regiões, e as artificiais incluem cinzas de termelétricas e resíduos agroindustriais. A normalização técnica nacional (ABNT NBR 12653, NBR 13956, NBR 16697, entre outras) estabelece requisitos e métodos de ensaio que orientam o uso desses materiais.

O presente trabalho tem por objetivo analisar, de maneira integrada, os impactos do uso de escória de alto-forno, sílica ativa e pozolanas sobre a resistência mecânica do concreto e sobre indicadores de sustentabilidade, com base em síntese crítica da literatura científica e técnica. Busca-se fornecer panorama atualizado que oriente dosagens e decisões de projeto em obras que priorizem desempenho e redução de pegada de

carbono. A estrutura do artigo contempla referencial teórico detalhado, descrição metodológica, apresentação de resultados sintetizados, discussão crítica e conclusões.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Escória de alto-forno

A escória granulada de alto-forno (EGAF ou GGBFS, do inglês *ground granulated blast-furnace slag*) possui composição química tipicamente rica em CaO (35–45%), SiO^2 (30–40%) e Al O (8–13%), com menores teores de MgO e óxidos de ferro. Sua reatividade depende do grau de vitrificação (proporção de fase amorfa), da finura de moagem e da presença de ativadores. Escórias com elevado índice de vitrificação e moídas a finuras comparáveis ou superiores às do cimento Portland apresentam atividade hidráulica latente significativa.

No Brasil, o cimento Portland de alto-forno (CP III) admite teores de escória entre 35% e 70%, conforme a ABNT NBR 16697. Há, ainda, a possibilidade de utilização da escória como adição direta na central de concretagem, desde que atendidos os requisitos de qualidade e de homogeneidade. Do ponto de vista mecânico, a substituição de 40% a 60% do cimento por escória frequentemente resulta em resistências à compressão próximas ou superiores às do concreto de referência em idades de 56 a 91 dias, embora o desenvolvimento inicial (7 dias) seja mais lento.

Estudos experimentais demonstram redução de emissões de CO_2 da ordem de 30% a 65% por metro cúbico de concreto quando se eleva o teor de escória, acompanhada de redução de custos de materiais em percentuais significativos. A escória também contribui para a redução do calor de hidratação, o que é vantajoso em elementos de grande massa (fundações, pilares de grandes dimensões, barragens), e para a melhoria da resistência a sulfatos e à penetração de cloretos. A microestrutura de pastas e concretos com escória tende a apresentar refinamento da rede porosa, com menor volume de poros capilares e maior volume de poros gel, o que se reflete em menor permeabilidade e maior durabilidade.

A cura prolongada é especialmente importante para maximizar o potencial hidráulico da escória. Em condições de cura inadequada (secagem precoce), o desenvolvimento de resistência pode ficar aquém do esperado. Por outro lado, em ambientes com umidade disponível ou com cura úmida controlada, os ganhos em idades avançadas compensam com folga o atraso inicial. A escória também atua na mitigação da reação álcali-agregado, em razão da redução da alcalinidade da solução dos poros e do consumo de álcalis nas reações de hidratação.

2.2 Sílica ativa

A sílica ativa (também denominada microssílica) é classificada como superpozolana em razão de sua elevadíssima área superficial específica (tipicamente 15.000 a 30.000 m²/kg) e pureza em SiO_2 amorfo. É coletada nos filtros de mangas dos fornos elétricos utilizados na produção de silício metálico ou de ligas de ferrossilício. As partículas são predominantemente esféricas e de diâmetro médio inferior a 1 µm, o que confere

propriedades reológicas e de empacotamento particulares.

Sua ação no concreto ocorre por dois mecanismos principais: (i) efeito de enchimento (*filler*), pelo preenchimento de espaços entre as partículas de cimento e pela melhoria da distribuição granulométrica da pasta; e (ii) reação pozolânica intensa com o $Ca(OH)_2$ liberado na hidratação do cimento, gerando C-S-H adicional de baixa relação Ca/Si. Esse C-S-H secundário preenche poros e fortalece a interface pasta-agregado (zona de transição interfacial).

Em teores usuais de 5% a 12% em relação à massa de cimento, observa-se aumento de resistência à compressão de 10% a mais de 30% em relação ao traço de referência de mesma relação água/aglomerante, dependendo da dispersão, da cura e da presença de superplastificante. A sílica ativa reduz de forma marcante a permeabilidade, a difusividade de íons cloreto e a susceptibilidade à reação álcali-agregado. Também eleva a resistividade elétrica e a resistência a sulfatos. No estado fresco, pode aumentar a coesão e reduzir a exsudação e a segregação, embora exija, em geral, maior dosagem de superplastificante para manter a trabalhabilidade desejada.

Do ponto de vista ambiental, o uso de sílica ativa permite reduzir o consumo de cimento em misturas de alto desempenho e contribui para a valorização de um resíduo industrial que, de outra forma, demandaria disposição em aterros. Seu custo unitário é elevado em comparação com a escória e a cinza volante, o que limita teores muito altos em obras correntes, mas justifica-se plenamente em concretos de alta e ultra-alta resistência e em elementos expostos a ambientes agressivos (estruturas marítimas, estações de tratamento, pisos industriais sujeitos a abrasão química).

A dispersão adequada da sílica ativa é fator crítico de desempenho. Aglomerados de partículas não dispersas atuam como pontos fracos e podem anular parte dos benefícios esperados. O uso de superplastificantes à base de policarboxilato, associados a procedimentos de mistura adequados (tempo de mistura, sequência de adição), é prática recomendada para maximizar o potencial do material.

2.3 Pozolanas

As pozolanas abrangem ampla família de materiais silicoaluminosos que, em presença de água e hidróxido de cálcio, formam compostos com propriedades aglomerantes. As cinzas volantes (classes F e C, conforme classificação ASTM ou equivalentes nacionais) são as mais utilizadas em escala global. As pozolanas naturais (cinzas vulcânicas, tufos, terras diatomáceas) e o metacaulim (obtido pela calcinação controlada de caulim) também encontram aplicação crescente. A cinza de casca de arroz, quando queimada sob condições controladas de temperatura e tempo, apresenta elevado teor de sílica amorfa e reatividade significativa.

Em geral, as pozolanas de menor reatividade (como muitas cinzas volantes classe F) promovem desenvolvimento de resistência mais lento, com ganhos expressivos após 28 dias. Em contrapartida, reduzem o calor de hidratação, melhoram a trabalhabilidade (efeito esférico das partículas de cinza volante) e contribuem para a impermeabilização da matriz. Teores típicos de substituição situam-se entre 15% e 30% para cinza volante e entre 8% e 20% para metacaulim e cinza de casca de arroz de alta reatividade, variando

conforme a reatividade, a finura e os requisitos de desempenho da obra.

A combinação de pozolanas com escória ou sílica ativa (sistemas ternários ou quaternários) tem sido amplamente investigada. Misturas bem dosadas exploram efeitos sinérgicos de empacotamento de partículas e de complementariedade de reatividades, resultando em concretos com boa resistência inicial, elevada resistência final e baixa permeabilidade, com fator clínquer reduzido. O metacaulim, por exemplo, pode compensar parcialmente a lentidão da escória em idades precoces, enquanto a cinza volante contribui para a economia e para a redução de calor em elementos massivos.

A caracterização da atividade pozolânica é realizada por métodos normalizados, como o índice de atividade pozolânica com cimento (ABNT NBR 5752) ou com cal (ABNT NBR 5751), além de ensaios de resistência à compressão de argamassas e de análise química. A finura, a composição química (teor de $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$) e a natureza amorfa da fase silicoaluminosa são determinantes da reatividade.

2.4 Sustentabilidade e avaliação de ciclo de vida

A substituição de clínquer por MCS reduz diretamente as emissões de CO_2 associadas à descarbonatação do calcário e ao consumo de combustíveis no forno. Estimativas de literatura apontam reduções de 20% a 60% nas emissões por metro cúbico de concreto, dependendo do teor de substituição e do tipo de MCS. Além disso, o aproveitamento de resíduos industriais evita impactos de disposição e preserva recursos naturais (calcário, argila, combustíveis fósseis).

Avaliações de ciclo de vida (ACV) do berço ao portão e do berço ao túmulo confirmam benefícios líquidos quando se considera a funcionalidade (resistência e vida útil). Concretos com alto teor de escória ou com sílica ativa em dosagens otimizadas apresentam, frequentemente, melhor relação resistência/emissões incorporadas. É necessário, contudo, considerar eventuais aumentos de transporte e de consumo de aditivos químicos, bem como a disponibilidade regional dos materiais. A análise de sensibilidade aos cenários de transporte e de alocação de impactos entre coprodutos é prática recomendada em ACV rigorosas.

A dimensão econômica também integra a sustentabilidade. Em muitas regiões, a escória e a cinza volante possuem custo unitário inferior ao do cimento Portland, o que permite redução do custo do metro cúbico de concreto. A sílica ativa, embora mais cara, pode ser economicamente justificada pela redução do consumo total de aglomerante em traços de alta resistência ou pela extensão da vida útil da estrutura, com consequente redução de custos de manutenção e de reposição.

2.5 Aspectos normativos e de controle tecnológico

No Brasil, a ABNT NBR 12653 estabelece requisitos para materiais pozolânicos, incluindo critérios de atividade pozolânica, finura e composição química. A ABNT NBR 13956 trata especificamente da sílica ativa. A ABNT NBR 16697 define os tipos de cimento Portland, inclusive aqueles com adição de escória (CP III) e de pozolana (CP IV). O controle tecnológico em obra deve contemplar a verificação da homogeneidade dos materiais, a realização de ensaios de caracterização quando houver mudança de fornecedor ou de

lote, e o acompanhamento da evolução de resistência em idades intermediárias e avançadas, especialmente em misturas com elevado teor de MCS de reatividade moderada.

A dosagem de concretos com MCS deve considerar a correção da água de amassamento (alguns materiais aumentam a demanda de água), a necessidade de aditivos e a definição de critérios de aceitação compatíveis com o desenvolvimento de resistência do traço. Em projetos estruturais, a especificação da resistência característica aos 28 dias pode ser complementada por exigências em idades posteriores quando se empregam teores elevados de escória ou pozolanas.

3 METODOLOGIA

Este trabalho caracteriza-se como artigo de revisão narrativa com abordagem crítica e sistematizada. Foram consultadas bases de dados científicas e repositórios técnicos (incluindo periódicos nacionais e internacionais, normas ABNT e documentos de associações técnicas) com recorte prioritário em publicações dos últimos quinze anos, embora trabalhos clássicos fundamentais tenham sido considerados. Os descritores principais incluíram termos relacionados a escória de alto-forno, sílica ativa, pozolanas, resistência do concreto, durabilidade e sustentabilidade.

A seleção priorizou estudos experimentais que reportassem resistência à compressão em diferentes idades, ensaios de permeabilidade ou penetração de cloretos, análises microestruturais e indicadores ambientais (emissões de CO_2, consumo de energia ou ACV). Os dados foram organizados por tipo de material e por faixa de teor de substituição, permitindo a identificação de tendências consistentes e de variações atribuíveis a fatores de dosagem, cura e finura. Não se realizou meta-análise estatística formal; a síntese é qualitativa e quantitativa descritiva.

As limitações inerentes a revisões narrativas – heterogeneidade de traços, condições de cura e métodos de ensaio – foram consideradas na interpretação dos resultados. Sempre que possível, buscou-se explicitar as condições experimentais associadas aos valores citados. A estrutura de análise seguiu a sequência: caracterização dos materiais, efeitos sobre propriedades no estado fresco, efeitos sobre resistência mecânica, efeitos sobre durabilidade e indicadores de sustentabilidade.

4 RESULTADOS

4.1 Efeitos sobre a resistência à compressão

A análise da literatura revela padrões distintos para cada material. No caso da sílica ativa, teores de 7% a 10% frequentemente proporcionam os maiores ganhos relativos de resistência aos 28 dias, com incrementos reportados entre 15% e 35% em relação ao traço de referência de mesma relação água/aglomerante. Em concretos de alto desempenho, a presença de sílica ativa é um dos fatores que possibilitam resistências superiores a 80 MPa e, em formulações de ultra-alto desempenho, valores acima de 120 MPa. Em alguns estudos, teores de 15% a 20% ainda produzem ganhos, embora com maior demanda de água ou de aditivo e com risco de redução de trabalhabilidade.

Para a escória de alto-forno, o comportamento é caracterizado por desenvolvimento mais lento. Aos 7 dias, concretos com 40% a 50% de substituição podem apresentar resistências 10% a 25% inferiores às do referência; aos 28 dias, as diferenças tendem a se reduzir; e aos 56–91 dias, é comum a equiparação ou a superação da resistência do traço sem escória. Teores muito elevados (acima de 70%) podem comprometer a resistência em idades intermediárias se a cura não for adequada, embora permaneçam viáveis em elementos que admitam prazos mais longos de desenvolvimento de resistência. Em estudos com otimização multiobjetivo (resistência, custo e emissões), teores ótimos de escória situaram-se frequentemente na faixa de 50% a 60%.

As pozolanas de reatividade moderada (cinza volante classe F típica) seguem padrão semelhante ao da escória, com ganhos mais evidentes após 28 dias. O metacaulim e a cinza de casca de arroz de alta reatividade aproximam-se do comportamento da sílica ativa, embora com intensidade geralmente inferior. Sistemas ternários contendo escória e sílica ativa, ou cinza volante e sílica ativa, têm demonstrado capacidade de combinar boa resistência inicial com elevado desempenho em idades avançadas. A Tabela 1 sintetiza faixas típicas de teor e efeitos esperados sobre a resistência.

Tabela 1 – Faixas típicas de teor de MCS e efeitos qualitativos sobre a resistência à compressão em relação ao traço de referência.

Material	Teor usual (%)	Efeito aos 7 dias	Efeito aos 28 dias	Efeito aos 91 dias
Sílica ativa	5–12	Aumento moderado a alto	Aumento alto	Aumento alto
Escória de alto-forno	30–70	Redução moderada	Próximo ou ligeiramente inferior	Equiparação ou superação
Cinza volante (F)	15–30	Redução moderada	Próximo ou ligeiramente inferior	Equiparação ou superação
Metacaulim	8–20	Aumento moderado	Aumento moderado a alto	Aumento moderado a alto

4.2 Efeitos sobre permeabilidade e durabilidade

A redução da permeabilidade é um dos benefícios mais consistentes associados ao uso desses MCS. A sílica ativa, por sua finura e reatividade, promove redução acentuada da penetração de água e de íons cloreto, com melhorias reportadas de 30% a mais de 70% em ensaios de penetração de água sob pressão ou de migração de cloretos, dependendo do teor e da matriz de referência. A escória e as pozolanas também reduzem a permeabilidade, especialmente quando a cura permite o desenvolvimento completo das reações secundárias.

A resistência a sulfatos e a mitigação da reação álcali-agregado são beneficiadas pela redução da quantidade de hidróxido de cálcio livre e pelo refinamento da porosidade. A sílica ativa e o metacaulim são particularmente eficazes no controle da reação álcali-sílica. A escória contribui para a estabilidade química em ambientes sulfatados e para a redução da carbonatação em determinadas condições de exposição. A combinação de escória com sílica ativa tem se mostrado promissora na mitigação de expansões associadas à formação de etringita retardada (DEF) em concretos submetidos a ciclos térmicos elevados.

No estado fresco, a sílica ativa tende a aumentar a coesão e a reduzir a exsudação, o que favorece a homogeneidade e reduz a formação de caminhos preferenciais de percolação. A cinza volante, por sua morfologia esférica, frequentemente melhora a trabalhabilidade e reduz a demanda de água para uma mesma consistência, o que indiretamente contribui para a redução da porosidade capilar no estado endurecido.

4.3 Indicadores de sustentabilidade

Estudos de ACV e de inventário de emissões indicam que a substituição de 40% do cimento por escória pode reduzir as emissões de CO_2 equivalentes em cerca de 30% a 40% por metro cúbico de concreto, mantendo resistência comparável em idades adequadas. Teores de 70% a 80% de escória podem reduzir as emissões em mais de 60%, com eventuais trade-offs de resistência inicial. A sílica ativa, embora usada em teores menores, contribui para a redução do fator clínquer em concretos de alta resistência que, de outra forma, exigiriam elevados consumos de cimento.

Além das emissões, há benefícios associados à economia circular: a valorização de resíduos siderúrgicos e da indústria de silício reduz a pressão sobre aterros e a extração de matérias-primas virgens. A disponibilidade regional, no entanto, é fator crítico: regiões com siderurgia ativa e produção de silício metálico tendem a obter maiores benefícios logísticos e econômicos. Em regiões distantes dos centros produtores, o impacto do transporte pode reduzir ou mesmo anular parte dos ganhos ambientais, o que reforça a importância de análises de ciclo de vida contextualizadas.

A literatura também aponta potencial de redução de custos de produção da ordem de 10% a 30% em misturas com teores elevados de escória, em função do menor custo unitário desse material em relação ao cimento Portland. A sílica ativa, apesar do custo unitário superior, pode ser economicamente vantajosa quando permite reduzir o consumo total de aglomerante ou quando a extensão da vida útil da estrutura é considerada na análise de custos ao longo do ciclo de vida.

4.4 Microestrutura e mecanismos

A observação por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e por técnicas de porosimetria evidencia que a incorporação de sílica ativa e de escória refina a distribuição de poros, reduzindo o volume de poros capilares e aumentando a tortuosidade dos caminhos de percolação. O C-S-H formado na reação pozolânica da sílica ativa apresenta morfologia mais densa e relação Ca/Si reduzida, o que se associa a maior estabilidade química. Na zona de transição interfacial, a presença de MCS reduz a espessura da zona porosa e a quantidade de cristais de portlandita orientados, fortalecendo a aderência pasta-agregado.

A hidratação da escória é mais lenta e depende da alcalinidade do meio. À medida que o cimento Portland se hidrata e libera $Ca(OH)_2$ e álcalis, a escória é ativada e passa a contribuir com produtos de hidratação semelhantes aos do cimento (C-S-H e fases aluminosas). Esse processo explica o desenvolvimento tardio de resistência e a importância da cura úmida prolongada.

5 DISCUSSÃO

Os resultados sintetizados evidenciam que não existe dosagem universal ótima; o teor ideal depende do objetivo prioritário (resistência precoce, resistência final, durabilidade específica ou mínima pegada de carbono), das condições de cura disponíveis e do custo regional dos materiais. A sílica ativa destaca-se quando se busca máximo desempenho mecânico e impermeabilidade com teores moderados. A escória de alto-forno mostra-se vantajosa para redução agressiva de emissões e para elementos em que a resistência aos 28 dias não seja o único critério de aceitação. As pozolanas complementam o portfólio, especialmente em regiões com disponibilidade de cinzas volantes ou de resíduos agrícolas processados.

A sinergia entre os materiais é aspecto relevante. Sistemas binários e ternários permitem equilibrar as taxas de reação e o empacotamento granulométrico. Por exemplo, a adição de pequena quantidade de sílica ativa a misturas ricas em escória pode acelerar o desenvolvimento inicial de resistência e refinar ainda mais a microestrutura. O uso de superplastificantes de última geração é, em muitos casos, indispensável para manter a trabalhabilidade em presença de sílica ativa ou de elevados teores de materiais finos.

Do ponto de vista prático, recomenda-se atenção especial à cura úmida ou com membranas, particularmente em concretos com alto teor de escória ou pozolanas de reatividade moderada. A verificação da compatibilidade com aditivos e a caracterização prévia da reatividade do MCS (índice de atividade pozolânica ou hidráulica) são procedimentos que reduzem riscos de desempenho abaixo do esperado. Normas brasileiras (ABNT NBR 12653, NBR 13956, NBR 16697, entre outras) fornecem requisitos e métodos de ensaio que devem ser observados em projetos e em controle tecnológico.

A dimensão da sustentabilidade não se esgota na redução de emissões de CO_2. A economia de recursos naturais, a valorização de resíduos, a redução de custos e a extensão da vida útil das estruturas integram o conceito de sustentabilidade aplicada à construção civil. Concretos com MCS bem dosados tendem a apresentar menor permeabilidade e maior resistência a agentes agressivos, o que se traduz em menor necessidade de intervenções de manutenção e em menor impacto ambiental ao longo da vida útil.

Limitações desta revisão incluem a heterogeneidade dos estudos analisados (diferentes relações água/aglomerante, tipos de cimento, condições de cura e métodos de ensaio) e a ausência de meta-análise estatística. Ainda assim, a convergência das evidências permite afirmar, com razoável segurança, que o uso criterioso de escória, sílica ativa e pozolanas constitui caminho técnico e ambientalmente justificado para a produção de concretos de melhor desempenho e menor impacto. Pesquisas futuras devem aprofundar a modelagem preditiva de desempenho, a padronização de indicadores de sustentabilidade e a valorização de novos resíduos com potencial pozolânico ou hidráulico.

6 CONCLUSÃO

O emprego de escória de alto-forno, sílica ativa e pozolanas como materiais cimentícios suplementares promove impactos positivos tanto na resistência mecânica quanto na sustentabilidade do concreto, desde que as dosagens, a finura, a cura e a compatibilidade com o restante da mistura sejam adequadamente controladas. A sílica ativa destaca-se pelo incremento de resistência e pela redução de permeabilidade em teores de 5% a 12%. A escória de alto-forno possibilita substituições elevadas (30% a 70%), com ganhos de resistência em idades avançadas e redução substancial de emissões de CO_2. As pozolanas ampliam as opções regionais e contribuem para a densificação da matriz e a durabilidade.

Recomenda-se a adoção de sistemas combinados (binários ou ternários) sempre que a disponibilidade e o custo dos materiais o permitirem, bem como a realização de estudos de dosagem específicos para cada obra ou produto. O controle tecnológico deve contemplar a caracterização dos MCS, a verificação da evolução de resistência em idades intermediárias e avançadas e a garantia de condições de cura adequadas. Futuras pesquisas devem aprofundar a modelagem de desempenho a longo prazo, a padronização de indicadores de sustentabilidade e a valorização de novos resíduos com potencial pozolânico ou hidráulico, consolidando a transição para uma construção civil de menor pegada de carbono e maior durabilidade.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: materiais pozolânicos – requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13956-1**: sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta – Parte 1: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: cimento Portland – requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5751**: materiais pozolânicos – determinação da atividade pozolânica com cal – índice de atividade pozolânica. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752**: materiais pozolânicos – determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6022**: informação e documentação – artigo em publicação periódica técnica e/ou científica – apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: informação e documentação – referências – elaboração. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6028**: informação e documentação – resumo, resenha e recensão – apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10520**: informação e documentação – citações em documentos – apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14724**: informação e documentação – trabalhos acadêmicos – apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

AÏTCIN, P.-C. Supplementary cementitious materials and blended cements. In: *Science and Technology of Concrete Admixtures*. Woodhead Publishing, 2016. p. 53-73.

BENHELAL, E. et al. Global strategies and potentials to curb CO_2 emissions in cement industry. *Journal of Cleaner Production*, v. 51, p. 142-161, 2013.

FLOWER, D. J. M.; SANJAYAN, J. G. Green house gas emissions due to concrete manufacture. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 12, n. 5, p. 282-288, 2007.

GANESAN, K.; RAJAGOPAL, K.; THANGAVEL, K. Rice husk ash blended cement: assessment of optimal level of replacement for strength and permeability properties of concrete. *Construction and Building Materials*, v. 22, n. 8, p. 1675-1683, 2008.

JOHN, V. M. et al. Fillers in cementitious materials — experience, recent advances and future potential. *Cement and Concrete Research*, v. 114, p. 65-78, 2018.

JUENGER, M. C. G. et al. Advances in alternative cementitious binders. *Cement and Concrete Research*, v. 41, n. 12, p. 1232-1243, 2011.

JUENGER, M. C. G.; SIDDIQUE, R. Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 78, p. 71-80, 2015.

LOTHENBACH, B.; SCRIVENER, K.; HOOTON, R. D. Supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, v. 41, n. 12, p. 1244-1256, 2011.

MALHOTRA, V. M.; MEHTA, P. K. *High-performance, high-volume fly ash concrete*. Ottawa: Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development, 2002.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MILLER, S. A.; HORVATH, A.; MONTEIRO, P. J. M. Impacts of booming concrete production on water resources worldwide. *Nature Sustainability*, v. 1, p. 69-76, 2018.

NEVILLE, A. M. *Propriedades do concreto*. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. (ed.). *Alkali activated materials: state-of-the-art report*. Dordrecht: Springer, 2014.

SCHNEIDER, M. The cement industry on the way to a low-carbon future. *Cement and Concrete Research*, v. 124, 2019.

SCRIVENER, K.; MARTIRENA, F.; BISHNOI, S.; MAITY, S. Calcined clay limestone cements (LC^3). *Cement and Concrete Research*, v. 114, p. 49-56, 2018.

SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: potential economically viable solutions for a low-CO_2 cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, v. 114, p. 2-26, 2018.

SIDDIQUE, R.; KHAN, M. I. *Supplementary cementing materials*. Berlin: Springer, 2011.

SKIBSTED, J.; SNELLINGS, R. Reactivity of supplementary cementitious materials (SCMs) in cement blends. *Cement and Concrete Research*, v. 124, 2019.

SNELLINGS, R.; SURANENI, P.; SKIBSTED, J. Future and emerging supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, v. 171, 2023.

THOMAS, M. *Supplementary cementing materials in concrete*. Boca Raton: CRC Press, 2013.

WHITTAKER, M. et al. The role of the alumina content of slag, plus the presence of additional sulphate on the hydration and microstructure of Portland cement-slag blends. *Cement and Concrete Research*, v. 66, p. 91-101, 2014.

YANG, K. H. et al. Effect of supplementary cementitious materials on reduction of CO_2 emissions from concrete. *Journal of Cleaner Production*, v. 103, p. 774-783, 2015.