



Ministério da Educação – Brasil
Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri – UFVJM
Minas Gerais – Brasil
Revista Vozes dos Vales: Publicações Acadêmicas
ISSN: 2238-6424
QUALIS/CAPEs – LATINDEX
Nº. 21 – Ano XI – 05/2022
<http://www.ufvjm.edu.br/vozes>

Novas tecnologias aplicadas no estudo da fabricação do clínquer de cimento Portland

Pedro Henrique Amaral Lima
Graduado em Engenharia Civil - UFVJM/MG – Brasil
Discente do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Ambiente e Sociedade da
Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri - UFVJM
<http://lattes.cnpq.br/3128359296518109>
E-mail: pedrohenriqueamaral11@hotmail.com

Prof. Dr. Stênio Cavalier Cabral
Doutor em Engenharia e Ciências dos Materiais - UENF/RJ - Brasil
Docente do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Ambiente e Sociedade da
Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri - UFVJM
<http://lattes.cnpq.br/2452889693767673>
E-mail: stenio.cavalier@ufvjm.edu.br

Prof. Dr. Sérgio Antônio Brum Junior
Doutor em Engenharia Civil - UENF/RJ - Brasil
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR
<http://lattes.cnpq.br/9286086846141450>
E-mail: sergiojunior@utfpr.edu.br

Prof. MSc. Fábio Araújo Pereira
Mestre em Engenharia Civil.
Universidade Federal do Amapá - UNIFAP
<http://lattes.cnpq.br/9180912233806978>
E-mail: fabioaraujopereira@gmail.com

Resumo: A indústria do cimento exerce influência considerável no desenvolvimento da infraestrutura econômica e social de um país. Esse setor está diretamente associado à construção civil e, portanto, orienta a demanda por cimento. Neste contexto, a promoção da construção civil através de obras de construção pesada (barragens, rodovias, obras de saneamento, etc.), edificações (habitacionais, comerciais e industriais), construções específicas (terraplenagem, instalações, etc.) e do setor informal (pequenas obras e renovações) são atividades influentes na utilização do cimento no mercado nacional. No entanto, uma série de implicações ambientais são desencadeadas pela atividade cimenteira, que assume a responsabilidade mundial pela emissão de cerca de 5% do gás carbônico (CO₂) para a atmosfera. Com o objetivo de atenuar essas emissões, tem crescido a demanda por tecnologias ambientalmente adequadas por intermédio da utilização de matérias-primas de fontes renováveis e muitas vezes locais, visto que tais parâmetros têm sido continuamente disseminados. A este respeito, uma medida atenuante eficaz é a diminuição do teor de clínquer na composição do cimento. Para isso, normalmente são empregadas diferentes adições de minerais para substituí-lo. Nesse sentido, por meio de uma revisão bibliográfica o artigo apresenta as principais inovações voltadas à fabricação do clínquer do cimento Portland. Conclui-se que diante da necessidade de novos materiais, novos estudos e pesquisas buscam complementos que atendam melhor essa demanda.

Palavras-chave: Cimento Portland. Construção Civil. Clínquer. Adições Minerais.

Introdução

O cimento é designado como uma das mercadorias mais importantes para o fortalecimento econômico. Nenhum outro material exerce tamanha versatilidade quanto o cimento quando se versa a respeito de obras de edificação, de pavimentação e/ou de infraestrutura. Mundialmente, o mercado cimentício movimenta mais de US\$ 250 bilhões de dólares/ano, em que a China apresenta-se como país responsável por mais de 50% da fabricação e do consumo mundial (ARUJO, 2020).

Segundo dados do Centro Nacional de Informações sobre Minerais dos Estados Unidos (USGS National Minerals Information Center), o processo produtivo mundial de cimento Portland somente no ano de 2016 atingiu a marca de aproximadamente 4,2 bilhões de toneladas. Para mais, ainda em 2016, o Brasil foi autor da produção de 60 mil toneladas de cimento, o que fez com que o referido país se apoderasse da oitava posição do ranking total (QUIRINO, 2017).

Em virtude das suas particularidades, o cimento na sociedade contemporânea passou a ser considerado como matéria-prima substancial para construção civil, logo, seu consumo tende a aumentar especialmente para atender as expectativas dos países

subdesenvolvidos e promover a reparação da demanda habitacional e de infraestrutura. De acordo com Scrivener, John e Gartner (2016), a perspectiva de produção mundial de cimento para 2050 está na faixa de 3,7 a 4,4 bilhões de toneladas.

Entretanto, apesar dos seus inúmeros aspectos positivos, no processo de produção do cimento são gerados graves problemas ambientais, sobretudo, em decorrência do lançamento de gases de efeito estufa na atmosfera e da utilização de recursos minerais e combustíveis fósseis (QUEIROZ, 2018).

Arelado a isso, o elevado consumo de concreto no tempo presente oportuniza a exploração e o desenvolvimento de novas investigações e pesquisas relacionadas à atenuação dos impactos originados em virtude da produção do cimento Portland, como emissões de gases do efeito estufa e demanda energética, além de possibilitar a diminuição de custos. Desse modo, o emprego de materiais em substituição parcial do cimento vem sendo adotado como alternativa para minorar os agravos suscitados pela indústria do cimento. Nesse escopo, faz-se necessário utilizar materiais capazes de substituírem de maneira enérgica o clínquer do cimento (MARTINS *et al.*, 2020).

Scrivener e Favier (2015) enfatizam que o uso de cimentos com baixo teor de clínquer podem assegurar uma opção sustentável para minimizar os impactos ambientais, porquanto a utilização de diferentes materiais cimentícios suplementares (MCS) em substituição ao clínquer vem sendo empreendida nas últimas décadas com o intuito de mitigar as problemáticas ambientais a longo prazo.

Destarte, é contínua a busca por materiais capazes de substituírem parcial ou totalmente o clínquer, como é o caso dos materiais suplementares. Esses materiais começaram a ser empregados nas misturas de concretos e argamassas em função do seu custo reduzido, do carência relativo à destinação adequada de rejeitos provenientes de vários setores industriais e também para minimizar a utilização de cimento Portland, em razão da sua potencialidade poluidora (NEVILLE, 2016).

Além desses benefícios, Bortoletto *et al.* (2017) corroboram afirmando que os materiais suplementares atuam propiciando uma melhor hidratação do cimento aplicado, apurando sua performance e também contribuem para o aumento de aspectos atrelados à resistência e durabilidade, uma vez que há a possibilidade de diminuir a fração de cimento consumido para se obter concretos e argamassas com características qualitativas.

Simoneto (2020) compartilha de vertentes similares ao enfatizar que a indústria cimenteira tem idealizado e produzido uma variedade de ações para atenuação dos níveis de emissão de gases do efeito estufa em seus sistemas de produção. O referido autor cita que uma das ações já implantadas foi a diminuição do percentual de clínquer integrado ao cimento através da utilização de materiais cimentícios suplementares (MCS), em particular os materiais carbonáticos e pozolânicos.

Metodologia

No que concerne à sua finalidade, o trabalho em questão se trata de uma pesquisa aplicada, uma vez que a mesma é caracterizada pelo enfoque em quesitos práticos na busca de elucidações moderadamente imediatas. Esse tipo de pesquisa muitas das vezes proporciona o desenvolvimento de ingerências e programas de aprimoramento das premissas sociais ou educacionais (MOREIRA e RIZZATTI, 2020). Para mais, a pesquisa aplicada tem como objetivo a geração de conhecimentos vinculados à aplicação prática e ao esclarecimento de determinados problemas (GIL, 2017).

No que tange aos procedimentos, o respectivo trabalho tem como percurso metodológico a revisão bibliográfica, levando em consideração seu caráter documental a partir da investigação de determinadas temáticas percorridas por autores importantes sobre o conteúdo em pauta (SANT ANA e LEMOS, 2018).

A pesquisa bibliográfica é desenvolvida com base no recolhimento de referências teóricas já apuradas e disseminadas por vias escritas e eletrônicas, tais como livros, artigos científicos, além de outros. Qualquer trabalho de cunho científico tem seu início alicerçado em uma pesquisa bibliográfica, que faculta ao pesquisador a obtenção de conhecimentos a respeito do que já foi estudado acerca daquele assunto (FONSECA, 2002).

Fonseca (2002) ainda salienta que existem estudos científicos que são embasados tão somente por intermédio da pesquisa bibliográfica, os quais são estruturados e produzidos por meio de registros teóricos exteriorizados com a finalidade de levantar fundamentos preexistentes acerca do problema a respeito do qual se busca uma elucidação.

Nesse sentido, foram avaliados e selecionados diversos materiais bibliográficos relevantes na área estudada para desenvolvimento do presente trabalho.

Revisão Bibliográfica

História do cimento Portland

A palavra “cimento” é oriunda da língua latina “*caementu*”, que na antiga Roma intitulava uma categoria de pedra natural de rochedos fragmentados. O produto é o elemento essencial do concreto, que hoje se configura como o segundo material de maior utilização pelo ser humano, ficando somente atrás da água. Em um contexto histórico, a evolução do cimento tem seu início antes do século XVIII, mas se efetiva em meados de 1780, quando estudiosos e especialistas da área se dedicaram ao descobrimento da formulação ideal para se obter o ainda pouco desenvolvido cimento hidráulico. Nesse tempo, a demanda atrelada à busca de insumos com propriedades ligantes que atuassem como matéria-prima para argamassas de revestimento externo fez com que, no período entre 1780 e 1829, o cimento obtivesse algumas formulações e designações distintas, tais como “cimento romano” e “cimento britânico” (SNIC, 2016).

Para Battagin (2021), ao descrever a respeito do processo evolutivo que o cimento teve ao longo do tempo, o autor enfatiza que o seu desenvolvimento de forma mais “concreta” se deu a partir dos anos de 1756, uma vez que nesse período, o engenheiro civil inglês Jonh Smeaton estabeleceu a calcinação de rochas calcárias moles e rochas calcárias argilosas, caracterizando-se, dessa forma, o marco preambular do cimento moderno. Em 1818, o engenheiro Louis Vicat foi consagrado como inventor do cimento artificial ao realizar um procedimento experimental em que uma mistura era feita tanto de componentes argilosos como calcários, cujos aspectos apresentavam-se bem semelhantes à forma de como Smeaton procedeu.

Mais adiante, o também inglês Joseph Aspdin produziu e patenteou no ano de 1824 uma mistura resultante da calcinação de pedras calcárias e argila. Nesse experimento, foi alcançada uma espécie de pó com finura considerável que quando combinado com água e depois de seco, apresentava aspectos de rigidez e resistência surpreendentes, assim como as pedras da Ilha Britânica de Portland. Em virtude disso,

Joseph Aspdin obteve a patente da mistura nomeando-a de Cimento Portland, em homenagem às pedras encontradas naquela ilha (GARCIA e REIS, 2020; BATTAGIN, 2021).

De acordo com Neville (2016), no ano de 1845 foi criado, por Isaac Johnson, o cimento moderno, em que a associação de argila e giz foi submetida à queima até a temperatura de clinquerização, o que possibilitou a geração de compostos altamente cimentantes.

Hoje, o cimento está presente e evidente na maioria das construções existentes. Apresenta como elementos constituintes o clínquer, calcário, gesso, argila, além de outros aditivos. Como produto pronto, o cimento é combinado à água e areia, se transforma em uma massa densa que depois de seca, é capaz de estruturar casas, prédios e várias outras obras de infraestrutura permitindo-lhes obter diferentes formatos nas mais diferentes localidades, em virtude da sua excelente trabalhabilidade (SILVA e FERNANDES, 2017).

O cimento Portland

O cimento Portland configura-se como a matéria-prima elementar de maior utilização no cenário da construção civil, seja pela sua aplicação em argamassas ou no concreto. Trata-se de um material com características secas e pulverulentas que possui propriedades aglomerantes, e que em presença aquosa desenvolve a capacidade de promover agregação a materiais inertes. Posteriormente ao tempo de cura, o cimento ao interagir com a água apresenta tendências de ganho no que tange à resistência mecânica em razão da rigidez proporcionada pelo mecanismo envolvendo a reação de hidratação. Aspectos tais como desempenho, trabalhabilidade e maleabilidade, este último quando no estado fresco, atrelado ao seu atributo de resistência a eventuais intempéries, certificam um vasto campo de aplicações e funcionalidades (COSTA, 2017).

Trinta (2019) define o cimento Portland como um pó fino que apresenta propriedades aglomerantes e de endurecimento sob efeito da ação da água. É constituído principalmente de clínquer, sendo este o componente fundamental presente em todos os tipos de cimento Portland, e adições, as quais variam em conformidade aos tipos de cimento existentes. O clínquer compõe-se, em suma, na mistura de calcário e argila

submetida em um forno a uma temperatura de 1450°C e é consecutivamente subordinado ao resfriamento. O produto proveniente do forno apresenta aspecto granular, coloração cinza escura e tem como característica ser um forte ligante hidráulico quando triturado. Em presença aquosa, o material resultante se torna pastoso, primeiramente, e, ulteriormente, se torna endurecido, adquirindo resistência e durabilidade.

O mercado desfruta de uma ampla diversidade de cimentos, com características e propriedades inerentes ao atendimento dos diferentes padrões de obras e empreendimentos. Os tipos de cimento se diferenciam com base na quantidade de clínquer e a presença de aditivos – tais como gesso, escórias, pozolanas e material carbonático, incorporados no processo de moagem. As adições às misturas cimentícias têm o intuito de alterar determinadas características do produto, além de alvidrar vantagens ambientais em razão do reaproveitamento de resíduos, da diminuição das emissões de gases poluentes e a extração de matéria-prima (LIMA, 2019).

De acordo com a quantidade de adições minerais empregue, o cimento Portland brasileiro admite uma classificação. Hodiernamente, encontra-se em vigência a NBR 16697 (ABNT, 2018), que determina a composição dos cimentos, sendo os principais: CP I, CP I S, CP II E, CP II Z, CP II F, CP III, CP IV, CP V e CP B.

Os principais elementos constituintes do cimento Portland brasileiro são o clínquer, o sulfato de cálcio (gesso), a escória de alto forno, as cinzas volantes e o material carbonático (fíler calcário), os quais apresentam limitações mínimas e máximas estipuladas em conformidade ao tipo de cimento a ser fabricado (SIMONETO, 2020).

O Quadro 1 representa as classes e siglas do cimento Portland, e o Quadro 2, por sua vez, exhibe os limites de composição dos diferentes tipos de cimento Portland, representados em porcentagem de massa, conforme preconiza a NBR 16697 (ABNT, 2018).

Quadro 1 – Classes e siglas do cimento Portland.

Designação o normalizada (tipo)	Subtipo	Sigla	Classe de Resistência à compressão aos 28 dias de idade (MPa)	Sufixo
Cimento Portland comum	Sem adição	CP I	25, 32 ou 40	RS ou BC
	Com adição	CP I - S		
Cimento Portland composto	Com escória graduada de alto forno	CP II - E		
	Com material carbonático	CP II - F		
	Com material pozolânico	CP II - Z		
Cimento Portland de alto forno		CP III		
Cimento Portland pozolânico		CP IV		
Cimento Portland de alta resistência inicial		CP V	ARI	
Cimento Portland branco	Estrutural	CPB	25, 32 ou 40	-
	Não estrutural	CPB	-	

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 16697:2018.

Quadro 2 – Limites de Composição do Cimento Portland (porcentagens em massa).

Designação Normalizada	Sigla	Classe de Resistência	Clínquer + sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto forno	Material Pozolânico	Material Carbonático
Cimento Portland comum	CP I	25, 32 ou 40	95 – 100	0 – 5		
	CP I-S		90 – 94	0	0	6 – 10
Cimento Portland composto com escória granulada de alto-forno	CP II-E		51 – 94	6 – 34	0	0 – 15

Quadro 2 – Limites de Composição do Cimento Portland (porcentagens em massa).
(continua)

Designação Normalizada	Sigla	Classe de Resistência	Clínquer + sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto forno	Material Pozolânico	Material Carbonático
Cimento Portland composto com material pozolânico	CP II-Z	25,32 ou 40	71 – 94	0	6 – 14	0 – 15
Cimento Portland composto com material carbonático	CP II-F		75 – 89	0	0	11 – 25
Cimento Portland de alto forno	CP III		25 – 65	35 – 75	0	0 – 10
Cimento Portland pozolânico	CP IV		45 – 85	0	15 – 50	0 – 10
Cimento Portland de alta resistência inicial	CP V	ARI	90 – 100	0	0	0 – 10
Cimento Portland branco	Estrutural	CPB	75 – 100	-	-	0 – 25
	Não estrutural		50 – 74	-	-	26 – 50

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 16697:2018.

Processo de fabricação do cimento Portland

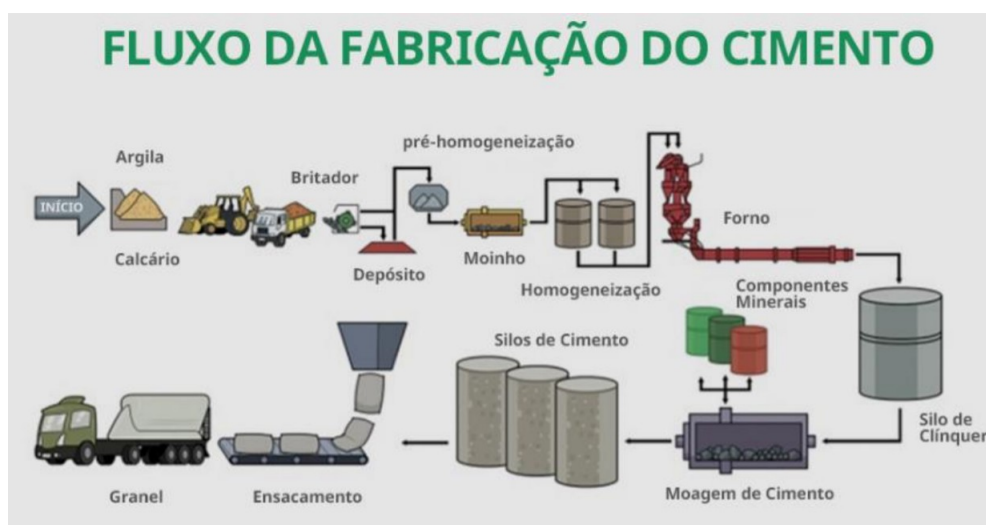
Segundo Bauer (2011), as localidades em que se produzem o cimento usualmente são próximas às jazidas, o que garante certamente um cenário vantajoso no que diz respeito ao transporte, por ser um produto acessível que não comporta fretes a distâncias significativas. Os processos operacionais fundamentais do cimento Portland envolvem o mecanismo extrativo da matéria-prima, britagem, moagem e mistura, combustão, moagem do clínquer e distribuição final. É válido salientar que após a extração da

matéria-prima através da exploração de pedreiras, esta, quando rochosa, é britada com a finalidade de reduzir o tamanho dos grãos.

Após a matéria-prima ser processada por via seca ou úmida, os produtos gerados a partir destes dois processos se encontram e abastecem o forno, sendo que a mistura pulverulenta é oriunda da via seca e a lama oriunda da via úmida. Neste procedimento, forma-se o clínquer, que sai do forno com elevada temperatura e é resfriado por intermédio de corrente de ar ou por ação da água (BRASIL, 2019).

Após submetido ao processo de resfriamento, o clínquer é combinado com a gipsita para manuseio do tempo de pega e é transportado ao moinho de bola acoplado a um separador de ar, onde é triturado. O clínquer pulverizado é carregado de forma pneumática aos separadores de ar, em que um ciclo reconduz os grãos de grande tamanho ao moinho, gerando os de menor tamanho, que resulta no cimento Portland propriamente dito. O material resultante é direcionado aos silos de estocagem e, por fim, o cimento é embalado e transportado para o local de uso (BRASIL, 2019).

Figura 1 – Esquema de fabricação do cimento.



Fonte: Cimento Mauá, 2017.

Embora apresente essencialidade aos múltiplos setores da humanidade, a indústria cimentícia, no presente, apresenta taxas de emissão acentuadas de CO₂, responsabilizando-se pelo percentual de 5% das respectivas emissões de gás carbônico do mundo (GARTNER e HIRAO, 2015). É importante salientar que ao fabricar o cimento,

a etapa que mais emite CO₂ tem sua ocorrência durante a produção de clínquer. A fração excedente é resultante da transportação de matérias-primas e das emissões derivadas do uso de energia elétrica no processo de fabricação.

No intento de amenizar os impactos ambientais ocasionados em virtude desse mecanismo, a diminuição do percentual de clínquer na composição final dos cimentos caracteriza-se como uma alternativa promissora estudada em inúmeros países do mundo, tais como Suíça, Índia, Cuba, EUA, China e Brasil. Para isso, o emprego de adições minerais em substituição à parte do clínquer vem sendo paulatinamente adotado na busca de cimentos com potenciais sustentáveis (BARBALHO, SILVA e RÊGO, 2019).

Adição de materiais em substituição ao clínquer do cimento Portland

Para que seja possível diminuir a quantidade de clínquer empregado na fabricação do cimento, sem que sejam extintas as propriedades de resistência e durabilidade, torna-se necessária a aplicação de outros materiais, de maneira que estes possuam capacidade de cooperar na melhoria e manutenção das principais especificidades do cimento Portland comum. Os materiais utilizados que viabilizam uma manutenção satisfatória de características relacionadas à redução da associação clínquer/cimento, são as chamadas adições minerais (LINS, 2017).

Conforme dados disponibilizados pelo Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC, 2019), a indústria tem habitualmente utilizado adições às misturas cimentícias. O aproveitamento de subprodutos originados a partir de outras atividades e matérias-primas alternativas é uma prática exercida há mais de cinco décadas somente no Brasil. A produção de cimentos constituídos de adições de materiais como escórias siderúrgicas, cinzas volantes, argilas calcinadas e fíler calcário, além de promover a diversificação nas funcionalidades e características intrínsecas do cimento, favorece expressivamente para a atenuação de emissões e do consumo de combustíveis, o que corresponde também a uma saída ambientalmente adequada para subprodutos decorrentes de outros processos produtivos e para a subsistência de recursos naturais não renováveis. Sob esse aspecto, todos os parâmetros referidos devem atender, sobretudo, às especificações preconizadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT.

As adições minerais frequentemente utilizadas apresentam uma variedade de vantagens, sejam elas técnicas, relativas ao aperfeiçoamento das propriedades peculiares do cimento; vantagens econômicas, na promoção da redução de custos e consumo energético; e vantagens sustentáveis e estratégicas vinculadas ao aproveitamento de resíduos e conservação de jazidas (QUEIROZ, 2018). Segundo Mehta (2008), o percentual de 50 a 70% da massa do clínquer presente no cimento Portland pode ser substituído por uma diversidade de materiais complementares.

Esses materiais ao serem incorporados aos demais componentes do cimento, atuam na contribuição da formação de compostos com propriedades cimentantes e/ou agem como sítios de nucleação dos produtos de hidratação. Tipicamente, no Brasil, as escórias e a cinza volante, configurados como subprodutos derivados da indústria siderúrgica e termelétrica respectivamente, são os materiais cimentícios suplementares (MCS) utilizados em maiores teores em substituição ao clínquer para a produção dos cimentos Portland (CARDOSO, 2020).

Sílica Ativa

A obtenção da sílica ativa se dá por meio da redução do quartzo a uma temperatura específica em fornos a arcos elétricos, em que os principais produtos são o silício ou ligas que apresentam o silício em sua composição. O quartzo é submetido ao aquecimento com uma temperatura de aproximadamente 2000°C. Nesse processo, fragmentos de carvão ou lascas de madeira são inseridos para remoção do oxigênio presente. A liga é acumulada no fundo do forno, e à proporção em que o quartzo vai se convertendo em liga, ocorre a liberação de vapor de SiO (Óxido de Silício) (SILVA, BORTOLETTO e ALMEIDA, 2017).

Com sua inserção em substituição à parte do cimento, há de forma notável a redução do processo de segregação, haja vista que os particulados finos se apoderam dos pequenos vazios existentes no concreto, o que impede a subida da água através do fenômeno de capilaridade. Tais finos atuam na contribuição dos preenchimentos nos canais capilares, propiciando ainda uma maior aderência à mistura. Esse processo também exerce vantagens para o concreto sob o estado endurecido, visto que com a presença dos finos da sílica cooperando no preenchimento de vazios que, ausente dessa

adição seriam ocupados de água livre, há o aumento da resistência do concreto, já que essa água seria evaporada, tendo espaço para infiltração de águas e agentes agressivos por intermédio dos capilares vazios (ACI 234R-06).

Cinza do bagaço da cana-de-açúcar

O emprego de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar como adição ao cimento Portland tem correspondido às expectativas e se tornado uma alternativa promissora, principalmente em regiões onde a produção de materiais usados como adição ao cimento Portland é limitada, como é o caso das cinzas volantes, escórias de alto forno e pozolanas naturais. Diversos trabalhos evidenciam que a utilização da cinza do bagaço de cana-de-açúcar como adição apresenta resultados positivos no que se refere à reologia, durabilidade e propriedades mecânicas do concreto, além de proporcionar a diminuição de emissão de dióxido de carbono no ar em razão da substituição parcial do cimento Portland (CORDEIRO e KURTIS, 2017).

Quando empregada em substituição na parcela de cimento Portland, a cinza do bagaço da cana-de-açúcar exprime respostas eficientes e análogas aos compósitos de referência em virtude do seu potencial de pozolanicidade, diminuindo assim a demanda de cimento necessário e por consequência a emissão de gases tóxicos na atmosfera provindos do processo de fabricação. Outra vertente significativa está associada à taxa ideal de substituição, onde verifica-se a possibilidade de substituição em até 30% da massa de cimento, sem que haja a ocorrência de alterações bruscas de resistência em comparação às argamassas ausentes de adição. Nesse sentido, a granulometria mais fina da cinza possibilita a obtenção de melhores características de resistência à compressão (SANTOS *et al.*, 2020).

Escória de alto-forno

A escória de alto forno é designada como um rejeito originado a partir da produção de ferro gusa, e por exibir volumes substanciais de material produzido, seu destino exerce notoriedade. Devido às excelentes propriedades hidráulicas da escória granulada de alto forno, seu emprego é corrente no processo produtivo do Cimento Portland de Alto Forno, conhecido também como CP III. A substituição do clínquer por escória promove variações

nas propriedades já conhecidas do concreto, tais como redução da reação álcali-agregado e da permeabilidade, atenuação do calor de hidratação, elevação da resistência a sulfatos, e em determinadas proporções, ganhos na resistência à compressão (MAIA, 2016).

A inserção de escória de alto forno nas misturas cimentícias são capazes de modificar a rede capilar do concreto, diminuindo o tamanho e a quantidade de poros existentes. Essa implicação da escória repercute no concreto sob endurecimento e em sua durabilidade. Nesse ínterim, é válido ressaltar que os resultados profícuos da escória no que diz respeito às características mecânicas e de durabilidade do concreto dependem de vários aspectos, entre eles a qualidade da escória, a análise adequada do traço, o lançamento e transporte do concreto no estado fresco e a atenção adequada no tempo e tipo de cura (CABRERA-MADRID, ESCALANTE-GARCÍA e CASTRO-BORGES, 2016).

Argila calcinada

As argilas calcinadas são resultantes do processo de queima de tipos específicos de argilas naturais existentes na crosta terrestre. Mehta e Monteiro (2014) explicam que essas argilas naturais não oferecem uma reatividade relevante com a cal, a não ser que os arranjos cristalinos de seus minerais argilosos sejam modificados através de um tratamento térmico em temperaturas variando na faixa de 600 a 900 °C, a calcinação. Somente após o referido tratamento (e de um procedimento de moenda, dependendo do material) o material pode ser classificado como pozolânico, e desse modo ser empregado como adição ou substituição parcial em misturas de cimento.

A utilização de argilas calcinadas como substituintes parciais do cimento é sugerida por Tironi *et al.* (2014b) e Amin (2012). De acordo com os autores citados, tais materiais apresentam potencial sustentável ao promoverem a diminuição da emissão de gases nocivos à atmosfera e da energia consumida no processo produtivo do cimento, além de assegurar (ou até mesmo aperfeiçoar) as propriedades mecânicas e a durabilidade desses materiais. Para mais, os autores reiteram que entre os tipos de argilas calcinadas, as caulínicas se destacam em virtude da sua reatividade pozolânica após o tratamento de calcinação e moagem.

Cinza da casca de arroz

Outro material que tem sido gradativamente estudado e empregado no intuito de fornecer melhorias às principais características do cimento através da substituição do respectivo material é a cinza de casca de arroz (CCA). Essa cinza pode ser considerada um material pozolânico que apresenta excelente potencialidade na substituição do cimento em concretos, uma vez que a sua aplicação suscita o aumento de resistência mecânica e reduz os poros existentes na mistura, garantindo bons resultados no que tange à durabilidade e vida útil do material (PAULA, 2020).

A casca de arroz, por si só, é empregada como material combustível e como geradora de energia térmica em caldeiras do próprio campo industrial de beneficiamento do arroz. Esse procedimento traz como resultado a cinza de casca de arroz, que pode ser designada como um rejeito industrial que apresenta uma considerável quantidade de sílica em sua composição e que, a depender das condições de queima, pode exibir também elevado potencial pozolânico. Sob esse aspecto, o uso da CCA como material suplementar ao cimento Portland pode ser consagrado como adepto na melhoria das características mecânicas e de durabilidade tanto de argamassas como de concretos. Além disso, a substituição parcial do cimento pelo CCA também atua na contribuição da diminuição de emissão de dióxido de carbono resultante do processo de clínquerização (ZAPARTE, 2020).

Discussão

Estudos recentes têm utilizado uma ampla variedade de materiais tais como escória, argila, cinza volante e outros materiais em substituição parcial ou total ao clínquer do cimento Portland nos últimos anos. Em 2017, por exemplo, no trabalho de Lins foi avaliado o uso de argila calcinada e o fíler calcário como aditivos minerais em substituição ao clínquer do cimento Portland, onde foi possível verificar a eficiência na utilização simultânea dos respectivos materiais, resultando em um novo tipo de cimento, nomeado como LC³. Os resultados do estudo demonstraram a viabilidade da utilização dessa nova classe cimentícia sem que haja a diminuição da resistência à compressão a partir da substituição de um percentual de 30% de cimento, por 20% de argila calcinada e 10% de

fíler com baixa quantidade de calcário. Em síntese, o autor declara que o emprego de cimentos LC³ é considerada uma alternativa promitente, tendo em vista que os resultados obtidos certificaram resistências à compressão maiores que o cimento de referência em alguns casos.

O autor Santos (2019), por sua vez, determinou a avaliação da incorporação de resíduos de cerâmica vermelha e gesso reciclado provenientes da construção civil no processo produtivo de cimento Portland do tipo pozolânico. Através de ensaios químicos e físicos (Difração de Raios X, análise de pozolanicidade, ensaios mecânicos, porosidade, etc.) atestou-se a efetivação da utilização dos resíduos na produção cimentícia, assim como suas características específicas. Diante disso, observou-se que um percentual de até 30% de adição de resíduo de cerâmica vermelha em combinação com um percentual de 4,5% de gesso não compromete o potencial do cimento adquirido quando em comparação aos requisitos estabelecidos pelas normas correntes. Assim sendo, corrobora-se o reaproveitamento dos resíduos estudados como matérias-primas para fabricação do cimento, além de contribuir positivamente na redução do teor de clínquer e de custos operacionais.

Em 2020, Martins *et al.* aferiram a utilização de resíduos sólidos provenientes da produção de magnésio metálico como substituinte parcial do cimento Portland. Os resíduos foram designados a testes de caracterização química e física (FRX, DRX, MEX e granulometria), cuja finalidade consistiu na avaliação do comportamento mecânico e na porosidade. Para isso, corpos de prova em formato cilíndrico foram moldados com percentual de substituição do cimento de 25% em massa do rejeito, os quais foram submetidos à cura de 28 e 91 dias e posteriormente ao ensaio de resistência à compressão. Os resultados evidenciaram que devido à finura do resíduo, os poros da mistura foram reduzidos e a matriz cimentícia foi densificada. Além disso, os resultados relativos ao comportamento mecânico apresentaram valores superiores aos preconizados pela norma vigente e em pesquisas similares, o que revela a factibilidade do uso de resíduos oriundos da indústria do metal magnésio como substituto parcial do cimento Portland.

Em 2021, Baldin, Filho e Baldin estudaram o potencial de influência exercido por rejeitos de cerâmica vermelha na produção de placas de fibrocimento em decorrência da substituição do cimento Portland. Para tal, a substituição do cimento foi feita em diferentes percentuais, a saber: 0, 15, 25 e 50%. Ressalta-se que nessas combinações foram

adicionadas fibras de celulose e polipropileno. Através dos ensaios de FRX, DRX, MEX, termogravimetria e resistência mecânica à flexão (28 dias), foi possível observar, especialmente a partir desse último, que todas as porcentagens de substituição evidenciaram resultados aceitáveis em conformidade ao que estabelece a norma NBR 15498 no que se refere à resistência à flexão para aplicação em fachadas externas. Desse modo, afirma-se que o processo de substituição parcial do cimento por resíduos de cerâmica vermelha voltado para o objetivo em questão apresenta potencial gerador de produtos de ampla serventia na construção civil, além de promoverem benefícios ambientais e atenuarem determinados custos.

Campos *et al.* avaliaram em 2021 a fabricação de concretos substituídos parcialmente (20%) de cimento por pó de pedra, os quais foram submetidos também ao processo de otimização pelo mecanismo intitulado de empacotamento de partículas de Alfred (recurso eficaz utilizado para aprimorar a composição da matriz cimentícia e auxiliar na produção de concretos sustentáveis), na busca da atenuação do uso de cimento e as emissões de CO₂ por MPa de resistência à compressão. A utilização do método relatado possibilitou a obtenção de resistências maiores do que as previstas para a relação água/cimento empregada (0,5). Com isso, o traço de maior eficiência obteve um alcance de resistência à compressão de 68 MPa com 240 kg/m³ de consumo cimentício. Nesse sentido, pôde-se verificar e ratificar que em decorrência da utilização do método proposto, torna-se possível a produção de concretos mais ecoeficientes, contribuindo no reaproveitamento de um resíduo sólido e atenuando as emissões de CO₂ (CAMPOS *et al.*, 2021).

Conclusão

A construção civil representa uma função expressiva no setor econômico de inúmeros países do mundo, oferecendo retornos céleres na obtenção de emprego e renda. Sob outra concepção, é evidente que o ramo construtivo depende significativamente de recursos naturais, além de ser gerador de graves impactos ambientais.

Em razão disso, presentemente, há uma busca paulatina por materiais que respondam às condições ideais para substituição parcial do cimento. Nesse sentido, a

utilização de materiais em substituição ao clínquer vem ganhando espaço na produção cimentícia.

Sob essa perspectiva, vários benefícios são proporcionados em virtude da substituição parcial ou total do cimento na mistura, tais como a contribuição no aumento da resistência mecânica e durabilidade em concretos e argamassas; a colaboração na diminuição da emissão de CO₂ que é formado durante a produção do clínquer do cimento Portland e o favorecimento de um destino adequado a esses materiais residuais que outrora seriam descartados inadequadamente, tudo isso sem afetar o desempenho e a performance dos compósitos.

Referências

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

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. 234R-06: **Guide for the Use of Silica Fume in Concrete**. Indianapolis: IN, 2006.

AMIN, Noor-ul. Use of clay as a cement replacement in mortar and its chemical activation to reduce the cost and emission of greenhouse gases. *Construction and Building Materials*, v. 34, p. 381-384, 2012.

ARUJO, Geraldo Jose Ferraresi de. O coprocessamento na indústria de cimento: definição, oportunidades e vantagem competitiva. *Revista Nacional de Gerenciamento de cidades*, v. 8, n. 57, p. 52-61, 2020.

BALDIN, Claudia Regina Bernardi, FILHO, José Ilo Pereira e BALDIN, Vitor. Estudo da influência da substituição do cimento Portland por resíduo de cerâmica vermelha na fabricação de placas de fibrocimento. *Revista Matéria*, v. 26, n. 1, p.1-9, 2021.

BARBALHO, Enéas de Andrade, SILVA, Eugênia Fonseca da, REGO, João Henrique da Silva. Estudo da proporção de argila calcinada e filer calcário no cimento LC³ para diferentes teores de substituição. *Revista Matéria*, v. 25, n. 1, p.1-15, 2019.

BAUER, Luiz Alfredo Falcão. *Materiais de construção*. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

BATTAGIN, Arnaldo Forti. A história do cimento. Cimento Nacional. 2021. <<https://cimento.org/historia-do-cimento/>>. [Acessado em 15 nov. 2021].

BORTOLETTO, Marcelo, GUIMARÃES, Paulo Victor Campos, SILVA, Rodrigo Garozi da e AKASAKI, Jorge Luís. Avaliação do resíduo Cinza da Madeira de Eucalipto como

substituição parcial da areia em argamassas de cimento. *Revista Científica Anap Brasil*, v. 10, n. 18, p.80-93, 2017.

BRASIL, Matheus Dutra. *Estudo do comportamento do cimento portland com a incorporação de resíduos do beneficiamento de argilas bentonitas*. Vitória da Conquista/BA: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, 2019, 66p. Trabalho de Conclusão de Curso.

CABRERA-MADRID, J. A., ESCALANTE-GARCÍA, J. I. e CASTRO-BORGES, P. Resistência à compressão de concreto com escória de alto forno. *Revista ALCONPAT*, v. 6, n. 1, p.64-83, 2016.

CAMPOS, Heloisa Fuganti, BELLON, André Lucas, SILVA, Eduardo Reis de Lara e e JUNIOR, Maurício Villatore. Eco-efficient concrete, optimized by Alfred's particle packing model, with partial replacement of Portland cement by stone powder. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 15, n. 2, p.1-14, 2021.

CARDOSO, Thiago Costa. *Propriedades físico-químicas, hidratação e reologia de cimentos ternários com reduzido teor de clínquer a partir de argila não calcinada e filer calcário*. Porto Alegre/RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2020, 62p. Dissertação de Mestrado.

CIMENTO MAUÁ. Como é feito o cimento, sua composição e nomenclatura no mercado. 2017. Disponível em: https://cimentomaua.com.br/cimento-como-feito-composicao-e-nomenclatura/?fb_comment_id=1806861512721198_3372002209540446>. Acesso em 15 nov. 2021.

CORDEIRO, Guilherme C. e KURTIS, Kimberly E. Effect of mechanical processing on sugar cane bagasse ash pozzolanicity. *Cement And Concrete Research*, v. 97, p. 41-49, 2017.

COSTA, Lawrence Francisco. *Estudo do bagaço da cana de açúcar como material para construção civil no estado de Pernambuco – sistema ternário com metacaulim e cal hidratada*. Caruaru/PE: Universidade Federal do Pernambuco, 2017, 87p. Dissertação de Mestrado.

FONSECA, João José Saraiva da. *Metodologia da pesquisa científica*. Fortaleza: UEC, 2002.

GARCIA, Alexandre Pinheiro e REIS, Elton Aparecido Prado dos. Desenvolvimento e estudo da aplicação da cinza dos resíduos de milho produzido no solo brasileiro, como substituto parcial do cimento na produção de concreto. *ETIC*, v. 16, n. 16, p. 1-10, 2020.

GARTNER, Ellis e HIRAO, Hiroshi. A review of alternative approaches to the reduction of CO₂ emissions associated with the manufacture of the binder phase in concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 78, part A, p. 126-142, 2015.

GIL, Antônio Carlos. *Como elaborar projetos de pesquisa*. São Paulo: Atlas, 2017.

LIMA, João Afonso Néo de Andrade. *Rotina do processo produtivo e equipamentos para fabricação de cimento Portland na indústria Mizu-Baraúna/RN*. Mossoró/RN: Universidade Federal Rural do Semiárido, 2019, 26p. Monografia.

LINS, Diana Nascimento. *Análise da Resistência à Compressão do cimento LC³ e a influência das adições minerais em seu desempenho*. Brasília/DF: Universidade de Brasília, 2017, 163p. Dissertação de Mestrado.

MAIA, Ana Luiza de Figueiredo. *Escória granulada como material cimentício para melhoria dos parâmetros de durabilidade*. Belo Horizonte/MG: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2016, 48p. Trabalho de Conclusão de Curso.

MARTINS, Maysa Lorena Figueiredo, BARRETO, Richard Rodrigues, JUNIOR, Paulo Roberto Ribeiro Soares, PINHEIRO, Ivete Peixoto e BEZERRA, Augusto Cesar da Silva. Rejeito da indústria de magnésio metálico para substituição parcial do cimento Portland. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*. v. 13, n. 6, p. 1-9, 2020.

MEHTA, Povindar Kumar. *Concreto Sustentável*. Revista Técnica: São Paulo, 2008.

MEHTA, Povindar Kumar e MONTEIRO, Paulo J. M. *Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais*. 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MOREIRA, Marco Antonio e RIZZATTI, Ivanise Maria. Pesquisa em ensino. *Revista Internacional de pesquisa em didática das ciências e matemática*, v. 1, p. 1-15, 2020.

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

PAULA, Sabrina de. *Análise do comportamento mecânico de concretos em situações de incêndio com a substituição parcial de cimento por cinza de casca de arroz*. Lajeado/RS: Universidade do Vale do Taquari, 2020, 68p. Monografia.

QUEIROZ, Victor Silva. *Avaliação do ciclo de vida de emissão de CO₂ na indústria do cimento: um estudo comparativo entre o cimento LC³ e o cimento Portland composto*. Brasília/DF: Universidade de Brasília, 2018, 84p. Trabalho de Conclusão de Curso.

QUIRINO, Bryan Getúlio. *Potencialidade da cinza de cana-de-açúcar em substituição parcial do cimento Portland no concreto*. Belo Horizonte/MG: Universidade Federal de Minas Gerais, 2017, 35p. Trabalho de Conclusão de Curso.

SANT ANA, Wallace Pereira e LEMOS, Glen Cézar. Metodologia Científica: a pesquisa qualitativa nas visões de Lüdke e André. *Revista Eletrônica Científica Ensino Interdisciplinar*, v. 4, n. 12, p. 531-541, 2018.

SANTOS, Francisco Robson dos. *Efeitos da adição de resíduos de cerâmica vermelha e gesso da construção civil nas propriedades do cimento Portland*. Mossoró/RN: Universidade Federal Rural do Semi-árido, 2019, 85p. Dissertação de Mestrado.

SANTOS, Janekelly Vilela, NAHIME, Bacus de Oliveira, SANTOS, Igor Soares dos, Brasileiro, Kelly Patrícia Torres Vieira, KUNAN, Pâmela Millena, LOBO, Fausto Arantes, REIS, Idalci Cruvinel dos e ALVES, Michell Macedo. Efeitos da adição e substituição de cinza do bagaço da cana-de-açúcar em matrizes cimentícias. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 10, p. 77494-77509, 2020.

SCRIVENER, Karen L. Options for the future of cement. *Indian Concrete Journal*, v. 88, n. 7, p. 11-21, 2014.

SCRIVENER, Karen L. e FAVIER, Aurélie R. *Calcined Clays for Sustainable Concrete*. RILEM Bookseries, 2015.

SCRIVENER, Karen.L., JOHN, Vanderley M. e GARTNER, Ellis M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. [s.l] UNEP, 2016. Disponível em: <https://spiral.imperial.ac.uk/bitstream/10044/1/51016/2/2016-UNEP%20ReportComplete6.pdf>. Acesso em 20 nov. 2021.

SILVA, Rodrigo Garozi da, BORTOLETTO, Marcelo e ALMEIDA, Jéssica Gomes de. Sílica ativa e cinza do bagaço de cana-de-açúcar: Resíduos que podem suplementar ou substituir o cimento Portland. *Revista Científica*, v. 10, n. 21, p.14-25, 2017.

SILVA, Hudson Tiago Lima da e FERNANDES, Maria José Costa. Reflexões geográficas sobre a produção de cimento em Baraúna (RN): uma abordagem acerca dos seus fluxos comerciais. *Revista Pensar Geografia*, v. 1, n. 1, p. 29-49, 2017.

SIMONETO, Gabriel Werner. *Avaliação da alteração da finura e composição do cimento Portland brasileiro nas últimas décadas*. Foz do Iguaçu/PR: Universidade Federal da Integração Latino-Americana, 2020, 114p. Trabalho de Conclusão de Curso.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE CIMENTO – SNIC. SNIC 50 Anos. 2016. Disponível em: http://snic.org.br/assets/doc/historia_do_cimento_no_brasil.pdf. Acesso em 18 nov. 2021.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE CIMENTO – SNIC. Relatório Anual. 2019. Disponível em: http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2019.pdf. Acesso em 18 nov. 2021.

TIRONI, Alejandra, TREZZA, Monica A, SCIAN, Alberto N. e IRASSAR, Edgardo F. Thermal analysis to assess pozzolanic activity of calcined kaolinitic clays. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 117, n. 2, p. 547-556, 2014.

TRINTA, Regina Paula Baldez. *Caracterização do clínquer e comportamento físico-mecânico do cimento*. Rio de Janeiro/RJ: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2019, 102p. Dissertação de Mestrado.

ZAPARTE, Taiara Aparecida. *Análise global da influência da finura da cinza de casca de arroz como substituição parcial ao cimento portland nas propriedades da argamassa de revestimento*. Pato Branco/PR: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2020, 129p. Dissertação de Mestrado.

Publicado na Revista Vozes dos Vales - www.ufvjm.edu.br/vozes em: 05/2022

Revista Científica Vozes dos Vales - UFVJM - Minas Gerais - Brasil

www.ufvjm.edu.br/vozes

UFVJM: 120.2.095-2011 - QUALIS/CAPEX - LATINDEX: 22524 - ISSN: 2238-6424