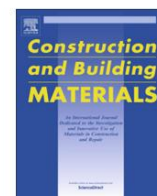


Listas de conteúdo disponíveis em [ScienceDirect](http://www.sciencedirect.com)

Construção e Materiais de Construção

página inicial do jornal: www.elsevier.com/locate/conbuildmat

Análise

Reciclagem de cinzas de combustão para produção sustentável de cimento: uma revisão crítica com mineração de dados e modelos preditivos de séries temporais

Yu Wang ^a, Yixin Shao ^b, Miodrag Darko Matovic ^c, Joann K. Whalen d, y

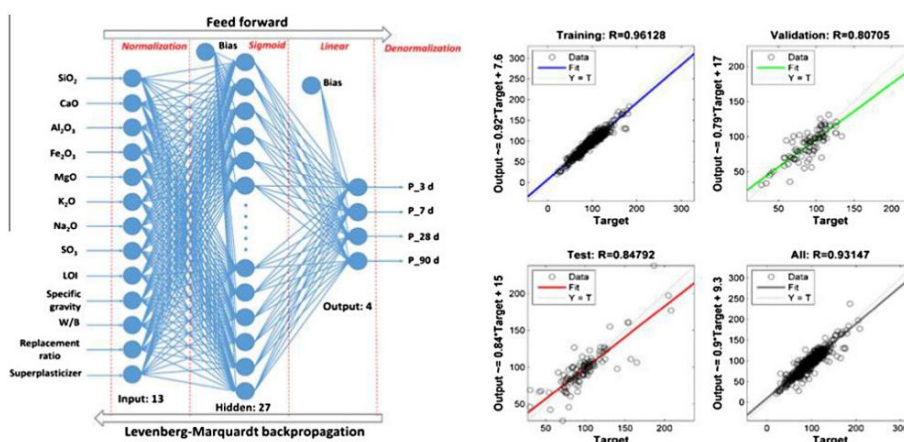
^a School of Computer Science, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA 30332, Estados Unidos ^bDepartment of Civil Engineering, McGill University, Montreal, Quebec H3A 0C3, Canadá ^cDepartment of Mechanical and Materials Engineering, Queen's University Kingston, Ontario K7L 3N6, Canadá ^dDepartment of Ciências dos Recursos Naturais, Macdonald Campus da McGill University, 2111 Lakeshore Road, Ste-Anne-de-Bellevue, Quebec H9X 3V9, Canadá

luzes

Revisou criticamente o progresso recente da pesquisa sobre várias cinzas como pozolanas. Criou uma rede neural artificial de mineração de dados para prever a atividade pozolânica.

Quantificou o efeito da cura do cimento em pozolanas por um modelo de série temporal. Preveja com precisão a atividade pozolânica em 3-90 dias de cura ($R^2 = 0,8479-0,9914$). Recomendado este modelo como um estimador rápido da atividade pozolânica antes do teste.

resumo gráfico



informações do artigo

História do artigo:

Recebido em 23 de fevereiro de 2016

Recebido em formulário revisado em 3 de julho de 2016

Aceito em 12 de julho de 2016

Palavras-chave:

cinzas de combustão

Produção de cimento

Reciclagem de lixo

Rede neural artificial

Análise de séries temporais

resumo

A combustão é um processo complexo que produz energia como meta e cinzas como subprodutos. As cinzas da combustão de carvão, biomassa e resíduos sólidos podem ser utilizadas como pozolanas em cimentos misturados devido à semelhança de suas propriedades físico-químicas com pozolanas convencionais (ex. sílica ativa). Essa estratégia recicla efetivamente as cinzas de combustão com atividade pozolânica e substitui uma proporção significativa do cimento Portland, o que potencialmente reduz as emissões de gases de efeito estufa (GEE) da produção de cimento. No entanto, os produtores de cimento que desejam substituir as cinzas pozolânicas ativas por pozolanas convencionais carecem de informações sobre a atividade pozolânica (AP) de cinzas de diversos materiais combustíveis. Um modelo de mineração de dados que pode extrair informações-chave para prever o PA de cinzas de combustão é visto como uma ferramenta de triagem para avaliar o potencial pozolânico de materiais combustíveis candidatos antes do trabalho experimental. Portanto, os objetivos deste capítulo são: 1) revisar criticamente o progresso recente da pesquisa no uso de várias cinzas de combustão como pozolanas, incluindo o mecanismo da reação pozolânica, fontes de materiais elegíveis e métodos de melhoria de PA, 2) criar um modelo de rede neural artificial (ANN) de mineração de dados para previsão de PA construído com base em dados relatados na literatura científica de 1998 a 2015, e 3) para descrever o efeito do período de cura do cimento no PA, com base em um modelo de série temporal. Os modelos de RNA e séries temporais desenvolvidos neste estudo podem prever com precisão

y Autor correspondente.

E-mail: joann.whelen@mcgill.ca (JK Baleia).<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.031>

0950-0618/ 2016 Elsevier Ltd. Todos os direitos reservados.

o PA das cinzas de combustão durante 3–90 d de cura ($R_2 = 0,8479-0,9914$). Recomendamos estes ferramentas de triagem como indicadores rápidos do potencial pozolânico das cinzas de combustão antes da realização de testes de resistência e outros testes experimentais.

2016 Elsevier Ltd. Todos os direitos reservados.

Conteúdo

1. Introdução 2.	674
Mecanismo de reação pozolânica 3. Fontes dos	675
resíduos sólidos elegíveis como pozolanas 3.1.	676
Elegibilidade dos materiais pozolânicos	676
3.2. Cinzas de combustão 3.2.1. Cinzas volantes.	676
de carvão 3.2.2. Cinzas de biomassa	676
.....	677
3.3. Outros resíduos sólidos.	678
4. Melhoria da atividade pozolânica em resíduos sólidos	678
4.1. Otimização da combustão.	679
4.2. Adição química durante a hidratação.	680
4.2.1. Acelerador de hidratação.	680
4.2.2. Outros produtos químicos	680
4.3. Elevação da temperatura de cura.	680
4.4. Pré-tratamento de materiais pozolânicos alternativos	681
4.4.1. Moagem mais longa.	681
4.4.2. Lavagem térmica e ácida.	681
5. Modelos preditivos da atividade pozolânica.	682
5.1. Seleção de dados e objetivo do modelo. 5.2.	682
Descrição da rede neural artificial (ANN)	682
Desempenho de redes neurais artificiais (ANN) 5.3.	685
5.4. Análise de séries temporais da atividade pozolânica.	685
6. Observações finais	686
Agradecimentos.	686
Apêndice A. Referências de dados	686
suplementares.	686

1. Introdução

A indústria de cimento Portland conta com a reação pozolânica para alcançar a ligação desejada e a resistência estrutural em produtos de cimento a um custo econômico menor do que o uso de Portland cimento sozinho. Uma pozolana é um material silicioso ou silicioso-aluminoso material praticamente sem função cimentícia. Na presença de água, ele reage com $\text{Ca}(\text{OH})_2$, daqui em diante referido como CH, para gerar $(\text{CaO})_x(\text{SiO}_2)_y(\text{H}_2\text{O})_z$, o complexo CSH que é o principal contribuinte para a resistência do concreto [22,84]. CSH suplementar formação durante a hidratação do cimento devido à reação pozolânica pode melhorar as propriedades do concreto, como resistência e durabilidade [132]. No entanto, a mistura cimento-pozolana-água é um sistema complexo, consistindo de muitos processos físico-químicos que são influenciados pela temperatura, proporção de mistura, reatividade da pozolana, tamanho de partícula de pozolana e outros fatores. O desafio é escolher uma pozolana adequada e economicamente viável com o direito características físico-químicas para garantir a qualidade final concreto.

Até 50% do cimento Portland pode ser substituído por uma pozolana em um cimento misturado sem qualquer impacto adverso no desempenho do concreto [50,71]. Misturando cimento com pozolanas ricas em sílica como cinzas vulcânicas, terra de diatomáceas e sílica ativa é uma prática que remonta à antiguidade, baseada em estruturas construídas mais de 2000 anos atrás pelas civilizações grega e romana [67]. Resíduos sólidos como cinzas de combustão e resíduos de catalisador podem ser usados como pozolana se possuírem propriedades físico-químicas semelhantes às pozolanas convencionais (por exemplo, sílica ativa). Uma pozolana elegível deve ser

ricos em compostos siliciosos ou silicioso-aluminosos e têm um fino tamanho de partícula ($<45 \text{ lm}$) [114]. Essa estratégia recicla efetivamente esses recursos ativos pozolânicos e reduz a quantidade de Portland cimento necessário para fazer concreto forte e durável, o que potencialmente reduz as emissões de gases de efeito estufa (GEE) do cimento produção [61,66]. Considerando esses benefícios ambientais em no contexto da produção sustentável de cimento, muitos pesquisadores testaram a atividade pozolânica (PA) de vários resíduos sólidos e relataram suas descobertas na literatura científica, levando a mais de 1612 publicações sobre este tema na Web of Science de 2005 a 2014. Por outro lado, são poucos os trabalhos que sintetizar, analisar criticamente e discutir as descobertas até o momento. Se resíduos sólidos podem ser reciclados como pozolanas sem impacto nas propriedades do cimento, esses resíduos abundantes que custam pouco ou nada podem diminuir a demanda por cimento Portland, ajudando a indústria de cimento a reduzir suas emissões de gases de efeito estufa (GEE). Portanto, um estudo de revisão é indispensável para compreender de forma abrangente o potencial de reciclagem de resíduos sólidos como pozolana.

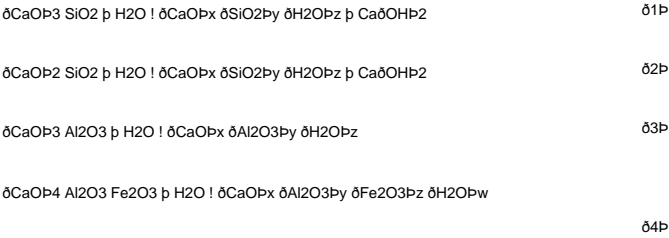
O grande banco de dados de estudos experimentais que avaliaram a atividade pozolânica (AP) de diversos resíduos sólidos pode ser desenvolver um modelo de mineração de dados que preveja a AP desses materiais. A vantagem de um modelo de mineração de dados é que as tendências podem ser analisadas e generalizações feitas, dando à indústria cimenteira uma ferramenta de triagem robusta para avaliar o potencial pozolânico de um resíduo material antes de realizar o trabalho experimental. Uma rede neural artificial (RNA) é uma ferramenta preditiva apropriada para este fim porque ANN é um algoritmo de mineração de dados de alto nível que simula

o comportamento de aprendizagem de neurônios humanos para matematicamente abordar objetivos complicados e não lineares [32,155]. Usando um Modelo ANN, Pala et al. [93] e Topcu e Sarıdemir [133] previram com sucesso o PA de cinzas volantes e notaram um pequeno desvio entre os resultados previstos e experimentais ($R^2 > 0,8$). Preditivo Modelos ANN de PA em cinzas de combustão foram descritos por Prasad et al. [107], Atici [9], Dantas et al. [35], e Duan et al. [37] para comprovando a aplicabilidade da modelagem. Embora esses estudos mostrem potencial dos modelos de RNA para avaliação de AP, eles têm limitado relevância para a indústria de cimento, pois cada estudo considerou uma única pozolana e contou com pequenos conjuntos de dados (<100 grupos de resultados experimentais) derivados de seus próprios resultados experimentais ou um subconjunto de valores para uma pozolana particular da base científica literatura. Assim, os modelos de RNA publicados não consideram a PA de diversos resíduos sólidos que potencialmente poderiam ser pozolanas em produção de cimento. Outra grande limitação da publicação modelos ANN é que eles não consideram o tempo de reação da pozolana explicitamente, embora, o tempo tenha um papel crucial no desenvolvimento de ligações químicas e estrutura física no cimento - pozolana - sistema de água [122]. Portanto, um modelo de RNA aprimorado é necessário para construir sobre o conhecimento existente e estender a análise a um conjunto de dados mais amplo que descreve os muitos materiais pozolânicos que pode ser considerado pela indústria cimenteira. Além disso, desde o a idade de cura reflete a reatividade da pozolana durante a hidratação do cimento, o modelo preditivo também deve incluir uma função de série temporal que revela a correlação entre a idade de cura e a AF em cimento.

Portanto, os objetivos deste artigo são, 1) sistematicamente revisar a literatura sobre o uso de resíduos sólidos como pozolana, incluindo o mecanismo de reação pozolânica, fontes de materiais elegíveis e métodos de melhoria de PA, 2) criar uma RNA aprimorada modelo para prever PA em cimento misturado que inclui 22 sólidos resíduos que são potenciais materiais pozolânicos, e 3) avaliar o efeito da idade de cura no PA em cimento misturado com base em um modelo de série temporal.

2. Mecanismo de reação pozolânica

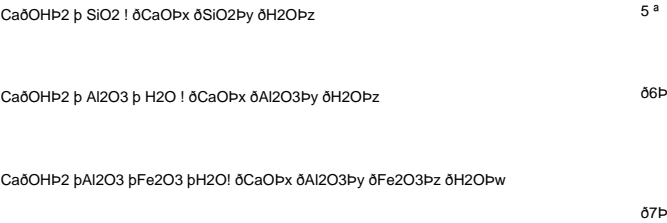
Como a reação pozolânica é altamente hidratação do cimento, começamos descrevendo o princípio da hidratação do cimento. O cimento Portland normalmente contém quatro componentes cimentícios, incluindo 45-75% de silicato tricálcico ((CaO)3SiO2, abreviado como C3S), 7-32% de silicato dicálcico ((CaO)2SiO2, C2S), 0-13% de aluminato tricálcico ((CaO)3Al2O3, C3A) e 0-18% de aluminoferrita tetracálcica ((CaO)4Al2O3Fe2O3, C4AF) [17]. Quando esses compostos interagem com a água, A maior hidratação do cimento ocorre pelas seguintes reações (Eq. (1)-(4)):



onde o complexo (CaO)x(SiO2)y(H2O)z, (CSH) é o principal produto de hidratação que contribui para a resistência do cimento. produtos, por exemplo, concreto [110]. Deve-se notar que o SO4²⁻ e O CO2 também pode participar das principais reações de hidratação do cimento, e interagir com as reações acima, como através do processo de ação de carbono. O C2S é hidratado mais lentamente do que o C3S, então o e resistência tardia medida durante a cura beneficiam de C3S e hidratação C2S , respectivamente. Por outro lado, a força conferida

pela hidratação de C3A e C4AF é trivial, uma vez que sua hidratação produtos (CaO)x(Al2O3)y(H2O)z, doravante designado como CAH e (CaO)x(Al2O3)y(Fe2O3)z(H2O)w conhecido como CAFH, são microestruturalmente mais fraco que o CSH [72]. Assim, a hidratação do C3S e C2S liberarão íons Ca2+ , que se dissolvem rapidamente do sólido C3S e C2S quando o cimento é misturado com água, levando a uma concentração supersaturada de Ca2+ na pasta de cimento-água. Com excesso de Ca2+, o gel de CSH se forma rapidamente junto com a cristalização de CH. Este processo é controlado por difusão iônica através de a estrutura porosa formada pelo CSH e tende a diminuir com tempo devido à diminuição da porosidade capilar, que retarda a taxa de hidratação de forma constante durante o período de cura [152]. O CH cristalino inibe o crescimento direcional do cristal CSH, tornando o concreto suscetível à ruptura se uma força for aplicada ao longo do plano cristalino de CSH. Portanto, diminuir a proporção de CH presente durante a hidratação do cimento pode ser uma opção para melhorar a resistência e durabilidade do concreto.

A reação pozolânica é uma forma de reduzir o CH contido no cimento porque pode transformar o CH em outros compostos que contribuem para a resistência do concreto [42]. Quando uma pozolana é adicionada durante a fase de hidratação do cimento, a superfície da pozolana é atacado por OH dissolvido formando assim um filme fino ao redor do partícula pozolana. Como a dissolução do CH é reversível, as concentrações de Ca2+ e OH aumentam rapidamente, o que estimula a dissolução de SiO2, Al2O3 e Fe2O3 da pozolana (Eq. (5)-(7)) [124].



Extra CSH, CAH e CAFH são produzidos pelas transformações descritas acima, o que promove a resistência e durabilidade do concreto [64]. Essas reações geralmente começam um ou mais semanas após o início da hidratação do cimento. Este atraso é atribuída à dependência da reação pozolânica na formação de CH cristalizado e a evolução do pH para um nível que permite a dissolução de compostos pozolânicos. Apesar destes descrições, este sistema de cimento-pozolana-água ainda não está totalmente compreendido, uma vez que numerosas mudanças físicoquímicas interdependentes ocorrem durante este processo.

Avaliação microscópica da reação pozolânica no cimento—pozolana—sistema de água revelam modificações físicas do microestrutura de cimento quando sílica ativa [13,130,135,146,152] e cinzas volantes com baixo teor de cálcio [145] são selecionadas como pozolanas. Além do mais promovendo a formação de CSH, pozolanas finamente moídas atuam como preenchedores físicos, o que reduz o tamanho dos poros e bloqueia os poros capilares do gel CSH, tornando o concreto mais denso [52]. Experimentalmente, a mistura cimento-pozolana-água apresentou um atraso (normalmente >10 h) na reação pozolânica que fez concreto mais permeável na idade de cura precoce (devido à menor proporção de cimento Portland), e então o concreto se tornaria mais compacto [135]. Uma vez concluída a cura, a permeabilidade mais baixa e a estrutura mais densa do cimento-pozolana-água mistura aumentou a durabilidade do concreto, conferindo maior resistência ao ataque de sulfato, eflorescência, retração, rachaduras, corrosão por cloro e reação de sílica alcalina (ASR) expansão do que as misturas de cimento Portland-água [82]. Em suma, esses estudos microscópicos atestam que as características físico-químicas propriedades das pozolanas são eficazes em tornar o concreto mais forte e mais durável.

3. Fontes dos resíduos sólidos elegíveis como pozolanas

3.1. Elegibilidade de materiais pozolânicos

Tendo em vista os requisitos da reação pozolânica, uma pozolana qualificada deve conter um teor adequado de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ para assegurar sua reatividade química. Segundo, sua tamanho de partícula deve ser fino o suficiente para garantir a grande área de superfície reativa para a reação pozolânica [80]. Atualmente, existem dois padrões internacionalmente reconhecidos para definir a elegibilidade de pozolanas, incluindo ASTM C618 [6] e EN 196 [16]. ASTM C618 é o padrão de referência na América do Norte, que indica que uma pozolana aceitável deve ter pelo menos 70% SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃, e não mais de 34% das partículas são retido em uma peneira de 45 Im (No. 325) (Tabela 1). Embora ASTM C618 foi desenvolvido para descrever os critérios mínimos para o carvão fly cinza como pozolana, este padrão foi aplicado a outras pozolanas como cinzas de biomassa. Por exemplo, Wang et al. [144] argumentou que ASTM C618 deve ser expandido para incluir cinzas volantes de biomassa como pozolan, uma vez que as propriedades do concreto não foram afetadas por misturas contendo 25% de cinzas herbáceas e de madeira com cimento Portland. Este argumento também foi apoiado por Wang e Baxter [143] após uma investigação completa do impacto das cinzas volantes de biomassa na resistência do concreto, estrutura microscópica e durabilidade. No entanto, ASTM C618 não controla a relação água-ligante (W/B) durante a preparação do concreto. Por esta razão, Pourkhorshidi et al. [106] questionou a racionalidade da ASTM C618 em comparação com EN 196, pois pozolanas (Trass, Tuff e Pumice) com alto PA de acordo com ASTM C618 não melhorou consistentemente a força e durabilidade do concreto, mas a classificação pozolânica fez pela EN 196 concordou bem com os resultados experimentais. Uma alternativa, método imparcial para definir a elegibilidade de pozolanas foi desenvolvido por Vassilev e Vassileva [138], que se baseou no método amorfo (vítreo) no cristal de cinzas para classificar como alto PA (82-100% de vidro), PA médio (65–82%) e PA baixo (30–65%). Os autores indicam que seu método pode estimar de forma simples e precisa o PA de cinzas testando sua composição em fase mineral (quartzo, mulita, sulfatos, oxihidróxidos e vidro).

Independentemente do método utilizado para avaliar potenciais pozolanas, qualquer material candidato deve ter alta PA, o que implica uma alta quantidade de SiO₂ amorfo + Al₂O₃ + Fe₂O₃ e tamanho de partícula pequeno. Muitos resíduos sólidos atendem a esses requisitos, e nossa literatura revisão encontrou mais de 158 notificações de AF em resíduos sólidos com funções pozolânicas variáveis relacionadas às suas diferentes características físico-químicas (Tabela 2). Ainda assim, algumas tendências gerais podem

tabela 1
Critérios químicos e físicos que qualificam as cinzas volantes de carvão como pozolana de acordo com ASTM C618 [6].

Critérios ASTM C618	Classe N (Natural pozolana)	Classe F	Classe C
Requisito químico			
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ , min., %	70	70	50
SO ₃ , máx., %	4	5	5
Teor de umidade, máx., %	3	3	3
Perda na ignição (LOI), máx., %	10	6	6
Requisito físico			
Quantidade retida quando peneirada a úmido			
na peneira de 45 Im (Nº 325), máx., %	34	34	34
Resistência com cimento Portland, a 7 d, min., % de controle	75	75	75
Resistência com cimento Portland, aos 28 d, min., % de controle	75	75	75
Necessidade de água, máx., % de controle		105	105
da autoclave ou contração, máx., %	0,8	0,8	0,8

ser discernidos de acordo com a origem desses materiais, e nós foco nas seguintes categorias: cinzas de combustão, alto-forno escórias e outros resíduos sólidos.

3.2. Cinzas de combustão

3.2.1. Cinzas volantes de carvão

A cinza volante da combustão do carvão é o sólido mais comum resíduos usados como pozolana. As cinzas volantes são capturadas por bag-houses ou precipitadores eletrostáticos e removidos da chaminé de exaustão antes ele sai da chaminé de uma usina a carvão. normalmente é leve castanho-amarelado e consiste principalmente em vidros vidrados do tamanho de silte e de argila. esferas [15]. Uma vez que esta cinza é muitas vezes rica em SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃, ela tem potencial para ser reciclado como uma pozolana [69]. Com base em suas propriedades químicas, as cinzas volantes são classificadas como pozolana Classe F ou Classe C por ASTM C618 (Tabela 1). Espera-se que as cinzas volantes da classe F da combustão de carvão antracito ou betuminoso tenham P70% SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃. Em contraste, cinzas volantes Classe C de linhita ou carvão sub-betuminoso combustão tem 50-70% SiO₂ + Al₂O₃ + teor de Fe₂O₃. Pode conter P10% CaO, possuindo assim também propriedades cimentícias em além de sua função pozolânica [6]. Assim, o PA de cinzas volantes classe F e classe C foram estudadas extensivamente.

A cinza volante classe F é uma pozolana aceitável em cimento misturado. Por Por exemplo, cinzas volantes com 86,3% de teor de SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ podem ser substituído por até 50% de cimento sem qualquer impacto negativo na resistência do concreto [126]. A mistura desta cinza no cimento antes da moldagem melhorou ainda mais as propriedades do concreto (resistência e resistência à abrasão) continuamente após 91 d ou 365 d de cura. No entanto, o concreto feito de cimento misturado era mais fraco do que isso do cimento Portland na fase inicial de cura (628 d) devido a um atraso na reação pozolânica durante o período inicial de hidratação do cimento. Isso implica que um período de cura mais longo pode ser necessário para o cimento misturado com cinzas volantes para atingir resistência como o cimento Portland. Ainda assim, outra cinza volante classe F (96,6% SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃) diminuiu a largura de microfissuração do concreto de 4,80 Im para 3,73 Im, pois aumentou a proporção de Si em concreto de 1,67 razão Si/Ca para 2,09 razão Si/Ca [55]. Além disso a análises regulares de resistência e estrutura, Lorenzo et al. [79] avaliou o desempenho de uma cinza volante Classe F (82,3% SiO₂ + Al₂O₃ + - Fe₂O₃) em um ambiente marinho simulado (0,03 mol/L Na₂SO₄ + 0,45 mol/L NaCl) e descobriu que a substituição de 35% de cimento por cinzas volantes aumentou a resistência à corrosão do concreto em quase duas vezes. A difusão de SO₄ 2+, Na+ e Cl em condições experimentais ativou a reatividade das cinzas, tornando assim a microestrutura do concreto mais compacta e durável.

Apesar de ter menor teor de SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃, a classe C voa a cinza é uma pozolana qualificada em misturas de cimento. Nassar et al. [89] avaliou a praticidade de misturar uma cinza volante Classe C com cimento durante a construção de estradas em grande escala, descobrindo que a estrada de concreto A base com 25% de cinza volante apresentou melhor resistência (36 MPa) e resistência à abrasão (perda de massa de 0,31 mg) do que o concreto Cimento Portland sozinho (32 MPa e 0,35 mg). Essas vantagens foram atribuídas à reação pozolânica das cinzas volantes, que tornou a microestrutura da pasta de cimento mais forte e compacta. Nassar et al. [89] concluíram que a pozolana de cinzas volantes pode reduzir a demanda de cimento, tornando o custo de capital de construção mais econômico, garantindo a vida útil e qualidade da infraestrutura.

As usinas a carvão geram outra cinza aglomerada que não é transportada pelos gases de escape, denominados cinzas de fundo [18,76]. Cabe a na parte inferior da unidade de combustão porque tem partículas maiores tamanho do que a cinza volante ou porque adere às paredes laterais quentes da caldeira. As cinzas de fundo são de cor cinza a preta e normalmente são mais grossas (35,0 Im) do que cinzas volantes (13,9 Im) [26,97]. No entanto, as cinzas de fundo propriedades químicas semelhantes às cinzas volantes Classe F, sendo ricas em SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ (por exemplo, 85,0%) mas virtualmente livre de CaO (por exemplo, 0,8%) [26.139].

mesa 2
Características físico-químicas representativas de pozolanas convencionais e resíduos sólidos testados como pozolanas.

Aula	pozolânico materiais	Composição química (% em peso) determinada por fluorescência de raios-X (XRF)														Quer dizer	Mediana	Específico	MAS	Ref.				
		análise														partícula	tamanho da partícula	gravidade	superfície					
		SiO2	CaO	Al2O3	Fe2O3	MgO	K2O	Na2O	SO3	LEI	Tamanho	(d50)	1	área										
																filme	filme		m2 /g					
Fumo de sílica convencional		94,00	0,40	0,10	0,10	0,40	0,90	0,10	1,50	52,10	0,07	41,00	4,32	0,19	0,63	0,26	2,70	0,10	0,60	—	2,16	—	[90]	
Metacaulim convencional		0,00	53,50	3,38	20,40	8,66	0,00	0,00	0,00	0,00							0,86			—	2,50	—	[101]	
Cinza de carvão	Cinzas volantes de carvão																	13,90	—		2,25	1,20	[97]	
Cinza de carvão	Cinzas de fundo de carvão	56,00	0,80	26,70	5,80	0,60	2,60	0,20	0,10								4,60	35,00	—		2,00	—	[26]	
Cinza de biomassa	Cinza de casca de arroz	84,75	2,78	0,16	65,30	6,40		0,00	2,32	2,57	0,37	2,00	3,10	5,70	0,60		3,72	—	10,10	10,00	2,16	—	[119]	
Cinzas de biomassa	Cinzas de óleo de palma	2,60	55,00	11,00	5,10		0,30	0,50	4,10	0,90	1,20	0,20	2,20				—	19,60	—	10,10	2,33	—	[117]	
Cinza de biomassa	Bagaco de cana-de-açúcar cinza																			5,60	2,27	—	[129]	
Cinzas de biomassa	Cinzas de madeira	41,00	11,40	9,30	66,38		2,60	2,30	3,90	0,90	0,00	4,44	2,06	4,92	0,41	0,00	—	0,00	—	—		40,29	[108]	
Cinzas de biomassa	Cinzas de espiga de milho	11,57	7,48				1,07													—	—	—	[3]	
Cinza de biomassa	Cinza de switchgrass	67,18	12,28	0,68			0,31	2,05	1,24	0,11				0,00			14,77	65,00	—		1,79	41,25	[147]	
Cinzas de biomassa	Cinzas de palha de trigo	83,80	12,54	4,55	1,05	2,39	0,00	0,00	1,49	7,22	—	11,84	54,82	2,60	1,38	4,36	9,26	0,16	0,00	11,73	—	—	[14]	
Cinza de biomassa	Cinza de resíduo de azeitona	67,20	9,98	0,10	0,08	0,80	0,10	7,22	25,40	1,70	0,32	2,38	50	—	35,40	23,50	1,60	0,60	10,60	—	—	—	[33]	
Cinzas de biomassa	Cinzas de serragem																			—	2,29	—	[38]	
Outras cinzas	Cinzas de lodo de esgoto	50,60	1,93	Leito																—	2,61	1,09	[94]	
Outras cinzas	fluído																			—	—	—	[59]	
	cinzas de combustão																							
Outras cinzas	Alúmen ativado	47,00	0,41	41,94	4,86	0,40	0,99	0,09	0,10					2,64	—					—	2,53	—	—	[92]
	cinzas de lodo																							
Outras cinzas	Cinza de esterco de gado	52,00	15,40	7,79	Granulado		3,20	2,94	4,91	0,66	1,54	5,52	0,00	0,32	0,00		2,50	—	0,75	—	0,81	0,56	—	[157]
Forno alto	moído	35,11	37,56	17,63	0,35	escória	de alto-													—	—	—	—	[74]
	escória																							
Outro sólido	Catalítico de fluído	48,20	0,01	46,00	0,95			0,01		0,01	0,50	0,04		1,50	—					—	2,42	—	—	[101]
	desperdiça																							
	catalisador de craqueamento																							
	resíduo																							
Outro sólido	Zeólito	67,79	1,68		13,66	1,44		1,20		1,42	2,04	0,50		0,00	—					—	2,20	—	—	[12]
	desperdiça																							
Outro sólido	Pó de vidro	72,80	4,90	1,40			0,00	3,40	0,30	16,30	0,00			0,00	150,00	—					2,40	—	—	[120]
	desperdiça																							
Outro sólido	areia do rio	91,20	0,70	1,80			0,20	0,10	2,30	0,10	0,00			1,80	—		2,20				2,61	—	—	[128]
	desperdiça																							
Outro sólido	Terra de Milos	58,23	7,40	14,22	4,31			1,43		2,24	1,30		1,16	0,00	—					—	—	—	—	[96]
	desperdiça																							
Outro sólido	Diatomácea	22,33	45,89	0,96			1,00		1,54	0,10	0,32		1,24	0,00	—					—	—	—	—	[96]
	desperdiça																							
Outro sólido	Brecha de Silica	82,10	0,83		8,78		0,82	0,04	3,10	2,33		0,00	0,70	75,00	—						2,70	—	—	[58]
	desperdiça																							
Outro sólido	Resíduos de minério de estanho	17,11	16,94	2,61			0,41		15,40	1,05	0,21		0,00	28,90	—					—	2,41	—	—	[75]
	desperdiça																							
Outro sólido	Resíduos Cerâmicos	67,03	0,11		19,95	6,29		1,37		3,54	0,21		0,00	0,47	—					—		3,00	—	[115]
	desperdiça																							
Outro sólido	Resíduos de ardósia	62,74	1,13		18,55	6,80	2,30	4,26	1,18				0,21	0,00	—		63,00				—	—	—	[44]
	desperdiça																							
Outro sólido	Resíduos de refinaria	39,20	0,10	59,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				1,30	—					—	2,60	—	—	[78]
	desperdiça																							
	catalisador																							

As argamassas com 25% de cinzas de fundo tinham quase a mesma resistência que as argamassas só de cimento (97% após 90 dias de cura) [26]. Uma moagem de 6 h período para reduzir o tamanho das partículas grossas de cinzas de fundo aumentou consideravelmente a sua PA, o que tornou a argamassa misturada mais forte em 27% do que quando misturado com cinzas de fundo não tratadas.

3.2.2. Cinzas de biomassa

A cinza da combustão da biomassa foi testada como poz zolan, mas a PA da cinza da biomassa é mais variável que a do carvão
pozolanas de cinzas devido à maior variabilidade na composição química do material de partida. Isso se deve ao fato de que a biomassa
é a matéria orgânica biológica de plantas ou materiais lignocelulósicos à base de plantas e é cultivada em muitos ambientes diferentes.
A combustão direta de biomassa em caldeiras gera vapor ou calor, um fonte de energia neutra em carbono que tem o potencial de substituir o combustível fóssil e alcançar a redução de CO2 [95]. queimando 1kg de biomassa gera 0,05-0,2 kg de cinzas, um resíduo sólido que é um potencial poluente devido ao seu tamanho de partícula fina e alta conteúdo [150]. A reciclagem de cinzas de biomassa como pozolana pode ser uma opção, mas a viabilidade desta abordagem requer mais cuidado estudo devido à composição química inconsistente da biomassa

cinzas, mesmo quando a matéria-prima é da mesma planta espécies. Por exemplo, switchgrass é um combustível de biomassa que pode ser colhido várias vezes ao longo do ano, dependendo dos objetivos do produtor. O teor de SiO2 + Al2O3 + Fe2O3 de queimado cinzas de switchgrass variaram de 44,2% a 67,9% quando biomassa de switchgrass que foi colhida em diferentes momentos durante a estação de crescimento, entre julho e novembro [91]. Esse ilustra a necessidade de caracterizar completamente cada cinza de biomassa antes é considerado para uso como pozolana.

A cinza de casca de arroz é frequentemente apresentada como uma pozolana qualificada com propriedades físico-químicas adequadas para produtos de cimento. Após a combustão da casca de arroz a 600 C, as cinzas continham 91,7% SiO2 com uma área de superfície específica de 77,4 m2 /g. Misturando 10% deste cinza com cimento melhorou a resistência da argamassa em 16,8% em comparação com uma argamassa simples [151]. Além de sua função pozolânica, o tamanho das partículas finas da cinza da casca de arroz também atuou como um enchimento, o que pode diminuir significativamente a permeabilidade do concreto. Ao misturar 10% de cinza de casca de arroz (88,1% SiO2 + Al2O3 + Fe2O3) com cimento, o a permeabilidade ao ar do concreto diminuiu de 1,08 10 16 m2 após 28 16 m2 a 0,08 10 dias de cura [111]. Além disso, um ultrafino cinzas finas de casca de arroz podem ser usadas para concreto de alta resistência

preparação. Ao misturar 10% de cinzas (88,0% SiO₂ amorfo, tamanho médio de partícula de 3,6 lm) no cimento e ajustar o W/B para 0,18, a resistência à compressão do concreto atingiu 180 MPa e 210 MPa após 28 d e 91 d de cura, respectivamente [136]. Isso indica que a cinza da casca de arroz é um substituto competitivo para a sílica ativa amorfa ultrafina (pozolana convencional), que tem disponibilidade limitada em todo o mundo e é mais cara do que a cinza da casca de arroz [136].

A cinza combustível de óleo de palma também mostrou uma função pozzolânica competitiva devido ao seu alto teor de SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ (45,8–79,1%) [20,29,118]. A cinza ultrafina do óleo de palma queimado foi um aditivo pozzolânico eficiente que produziu concreto de alta resistência. A substituição de 40% ou 50% do cimento Portland por esta cinza (75,14% SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃, tamanho médio de partícula de 2,06 lm) produziu uma amostra de concreto com resistência à compressão superior a 104 MPa ou 158 MPa aos 28 d [4,71]. O efeito de enchimento das partículas ultrafinas contidas nas cinzas de óleo de palma diminuiu ainda mais a porosidade do concreto, diminuindo assim sua permeabilidade ao cloreto, ar e água [71]. Quando foi testada a substituição de 70% do cimento por cinza combustível de óleo de palma (67,18% SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃), essa cinza minimizou efetivamente o risco de craqueamento térmico, diminuindo a liberação de calor de hidratação de 57,3 C para 41,5 C [10].

Resíduos de processamento de cana-de-açúcar, como cinzas de bagaço e cinzas de palha, também podem ser uma pozolana satisfatória. A cinza do bagaço era rica em SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ (por exemplo, 71,1–73,9%), o que aumentou a resistência do concreto em 13% quando uma mistura de 20% de cinza e cimento foi testada após 28 dias [30,129]. A mistura de 10 a 30% de cinzas pode diminuir ainda mais o risco de craqueamento térmico, diminuindo a liberação de calor de hidratação em 13 a 33%. Montakarni Wong et al. [85] também relataram um resultado bem sucedido da mistura de 20-30% de cinza de bagaço (89,2% SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃) com cimento sem qualquer redução na resistência do concreto. Semelhante a outras pozolanas finas, a cinza do bagaço também teve um papel duplo na formação do concreto, contribuindo para a função pozzolânica química e o efeito de enchimento físico [31]. As pesquisas com a cinza da palha da cana-de-açúcar concentraram-se principalmente em suas propriedades cinéticas pozzolânicas. Villar-Cocina et al. [142] desenvolveram um teste de condutividade simples para análise cinética que poderia distinguir se a reação pozzolânica era controlada por difusão física ou por equilíbrio químico, e este método foi validado por Frias et al. [45]. Os resultados revelaram que a cinza da palha da cana-de-açúcar da combustão a 800 C apresentou maior taxa de reação pozzolânica ((8,12 ± 0,67) 10⁻²) do que a da combustão a 1000 C ((6,34 ± 0,42) 10⁻²), o que implica que o equilíbrio químico foi o principal mecanismo responsável pela AP da cinza da palha da cana-de-açúcar [46].

Além das cinzas de biomassa descritas acima, cinzas de biomassa variadas foram estudadas como pozolanas em alguns artigos, como cinzas de sabugo de milho [2], cinzas de resíduo de azeitona [33], cinzas de capim-switch [147], cinzas de palha de trigo [14], casca cinzas [19], cinzas de bambu [141] e cinzas de serragem [38]. Apesar de suas diferentes fontes de biomassa e regimes de combustão, todos eles possuem uma característica físico-química semelhante, ou seja, uma estrutura cristalina amorfa rica em SiO₂. Concluímos que a cinza da combustão de biomassa com alto teor de SiO₂ amorfo tem potencial como pozolana elegível, comparável às cinzas volantes de carvão.

3.3. Outros resíduos sólidos

A escória de alto-forno é um subproduto não metálico da produção de ferro em alto-forno que é frequentemente usado como pozolana. A escória de alto forno contém >80% de cristal amorfo quando a escória fundida é rapidamente resfriada por imersão em água, com 28–38% SiO₂, 30–50% CaO, 8–24% Al₂O₃ e 1–18% MgO, o que indica que possui função pozzolânica e propriedades cimentícias. A mistura de 10 a 20% de escória com cimento alcançou resistência da argamassa comparável à argamassa simples [134], e até aumentou sua durabilidade à corrosão por cloreto em 53,4% em 90 d [25]. O alto teor de CaO da escória aumentou a alcalinidade da solução de hidratação, acelerando

a dissolução do SiO₂ e o aumento da reação pozzolânica. A escória de alto-forno também melhorou a durabilidade do concreto após exposição a condições extremas de temperatura. A mistura de 20 a 30% de escória no cimento facilitou o comprometimento de alta temperatura (900 C) do concreto em até 60% [74]. Esta observação foi confirmada por [68], que realizou um teste de congelamento-descongelamento de 30 ciclos em argamassas com 40% de escória. A variabilidade na reação pozzolânica de misturas de escória-cimento é observada em uma variedade de condições de cura. Por exemplo, a cura com água do mar foi benéfica para a resistência inicial (7 d) do concreto das misturas de escória-cimento (de 37,6 MPa a 41,3 MPa), mas prejudicial à resistência última de 360 d (de 66,0 MPa a 56,3 MPa), comparada à cura regular com água [25]. No entanto, as misturas de escória-cimento tiveram bom desempenho em condições regulares de cura e melhoraram claramente o desempenho do concreto, com menor custo operacional devido ao menor uso de cimento [50].

Outro resíduo sólido da indústria que possui função pozzolânica é o resíduo de catalisador de craqueamento catalítico fluido (FC3R) de refinarias de petróleo, que é rico em compostos reativos à base de sílica-alumina [158]. Payá et al. [99] testaram este material como uma "nova" pozolana e descobriram que FC3R continha 48,2% de SiO₂ e 46,0% de Al₂O₃ com estrutura semicristalina e cristalina. Ao misturar 30% de FC3R no cimento, aumentou a resistência da argamassa em 31,8% aos 28 d. O FC3R também diminuiu a permeabilidade dos produtos de hidratação, aumentando assim a resistência ao cloreto do vergalhão de aço em amostras de argamassa [86]. Essas melhorias foram atribuídas à formação auxiliar de CSH, CAH e CASH pelo SiO₂ e Al₂O₃ em FC3R [101,102,103].

Outros materiais de resíduos sólidos podem apresentar uma boa função pozzolânica, como papel/esgoto/cinza de lodo de alumínio [34,53,92], resíduos de vidro [120], areia de rio [128], resíduos de minério de estanho [75], carboneto de cálcio resi devido [109], resíduos cerâmicos [83], pó de tijolo vermelho inglês [54] e lodo de diodo emissor de luz [77]. Detalhes sobre as propriedades químicas desses materiais e seus PA estão resumidos na Tabela S1.

Concluímos que materiais ativos pozzolânicos de diversas fontes (cinzas de combustão, escórias de alto-forno e outros resíduos) possuem as mesmas características físico-químicas gerais, ou seja, um alto teor de SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ com um tamanho de partícula fino e estrutura amorfa de SiO₂.

Existem muitas cinzas naturais ou artificiais que podem ser usadas como pozolana. Por exemplo, cinza vulcânica moída é um bom pozolana natural devido ao seu alto teor de SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ de 83,9% [63,122].

As argamassas com 10% de cinzas vulcânicas apresentaram praticamente a mesma resistência à compressão das argamassas simples (27 MPa aos 7 d e 36 MPa aos 28 d). Entretanto, sua contribuição pozzolânica diminuiu a expansão ASR das barras de argamassa de 0,089 mm (argamassas simples) para 0,088 mm (20% cinzas), 0,082 mm (30% cinzas) ou 0,075 mm (40% cinzas).

A cinza da incineração de resíduos sólidos urbanos (RSU) pode ser utilizada como substituto do cimento. A incineração é um tratamento comum de RSU, pois pode reduzir o volume de resíduos em até 90% enquanto recupera o calor latente do RSU. A mistura de cinzas de RSU em concreto imobilizou os elementos de metal pesado das cinzas, evitando assim a poluição por lixiviação de metais [125]. Cinzas finas de RSU podem ser uma boa pozolana. Atingiu um estado de fusão após uma moagem de 96 h, devido à área superficial específica reativa ultra-alta de 79,7 m²/g no cristal de cinzas [24]. A mistura desta cinza aumentou a resistência da pasta de cimento em 4,5% (5% cinza) ou 18,2% (10% cinza) aos 28 d. Esta melhoria na pasta de cimento foi atribuída exclusivamente à formação suplementar de CSH por reação pozzolânica.

4. Melhoria da atividade pozzolânica em resíduos sólidos

Existem vários métodos eficazes para melhorar a PA de resíduos sólidos, como otimizar a combustão que produz cinzas pozzolânicas, adicionar produtos químicos durante a hidratação do cimento, elevar a temperatura de cura ou pré-tratar as pozolanas (mais

tempo de moagem para reduzir o tamanho das partículas, etapa de lavagem para melhorar a pureza de SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃). Em todos os casos, esses métodos visam aumentar o teor de SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ e cristal amorfo proporção de pozolanas.

4.1. Otimização da combustão

As condições de combustão alteram as propriedades físico-químicas dos cinzas, potencialmente alterando seu PA. Fatores como temperatura de combustão, tempo de retenção e método de resfriamento determinam o grau de remoção de carbono durante a combustão (afetando assim a SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ pureza das cinzas) e influenciam a transformação amorfa-cristalina sensível ao calor em cinzas. Até aqui, a influência desses fatores na PA das cinzas foram investigadas em estudos de combustão de biomassa (Tabela 3), uma vez que as condições de queima para

outras cinzas de combustão são definidas pelo gerador de energia ou ferro fundidora. Feng et al. [41] descobriram que a combustão a 800 C por 4 h produziu uma cinza de casca de arroz contendo 95,7% de SiO₂ amorfo, o valor mais alto alcançado em seus ensaios de combustão. Esta cinza aumentou a resistência à compressão da argamassa (com 10% de cinzas) em 42% após 91 d. No entanto, Xu et al. [151] propuseram uma combustão de 600 C por 2 h para o melhor PA de cinzas de casca de arroz. Adicionando 10% desta cinza em argamassas (W/B = 0,4) resultou na maior resistência à compressão de 59,87 MPa (28 d), em comparação com as cinzas produzidas pela combustão a 500 C (49,82 MPa), 700 C (47,40 MPa) ou 800 C (46,49 MPa). Essa aparente contradição indica que a temperatura de combustão não é o único fator que influencia a PA das cinzas, pois o tipo de forno de combustão e método de resfriamento também diferiram nestes estudos. Assim, Nair et al. [87] explorou o impacto do resfriamento na microestrutura de cinzas de casca de arroz. Eles sugeriram que

Tabela 3
Detalhes experimentais de testes de pozolanas e recomendações finais para melhorar a atividade pozolânica de cinzas de combustão de biomassa.

Materials	Inicial carregar g	Temperatura C	Aquecimento avaliar C/min h	Retenção Equipamento de combustão	Condição de moagem recomendada para o melhor atividade pozolânica min	Ref.
cinza de casca de arroz	—	500, 600, 700, 800 700	20	Forno elétrico 20	120	[151]
cinza de casca de arroz	100		10	28 2 cm inox bandeja de aço	20	[140]
cinza de casca de arroz	—	550, 600, 700, 800, 900, 1000	—	4	60	[41]
cinza de casca de arroz	—	—	—	Forno projetado	30, 60	[154]
cinza de casca de arroz	—	600, 750, 900 (combustão & gaseificação)	—	0,5	—	[148]
cinza de casca de arroz	20.000 Máx. 600 (aberto combustão)	—	—	—	—	[28]
cinza de casca de arroz	20.000- 25.000	—	—	Incinerador modificado	0–540	[137]
cinza de casca de arroz	—	500, 700, 900	—	0,25, 6, 12, 24	—	[87]
cinza de casca de arroz	—	850	—	0,17– 0,25	75	[23]
cinza de casca de arroz	—	750, 830	—	—	—	[90]
cinza de casca de arroz	20.000	Máx. 650	—	—	—	[29]
cinza de casca de arroz	—	650	3.3	1	—	[47]
Cinza de palha de trigo	200	500, 650, 700, 800	—	1, 2, 3	60	[7]
Cinza de palha de trigo	—	670	—	5	—	[14]
Cinza de palha de trigo	—	570, 670	—	5	—	[57]
Cinza de madeira de casca de arroz bagaço	—	700–900	—	—	—	[62]
Cinzas de casca de arroz e cinzas de óleo de palma	—	800–900	—	—	—	[117]
Cinzas de óleo de palma	—	500 ± 50	—	1,5	—	[71]
Cinzas de óleo de palma	—	800–1000	—	—	—	[131]
Lodo de papel	—	600, 650, 700, 750, 800	—	2, 5	—	[48]
Lodo de papel	—	700, 720-740	—	2	—	[43]
Lodo de papel	—	700	—	2	—	[53]
As cinzas das folhas de bananeira	—	900	—	24	30	[73]
Resíduos de ardósia	—	1000	—	2	—	[44]
Alúmen ativado	—	800	5	2	—	[92]
cinzas de lodo	—	—	—	—	—	[8]
Subproduto do bioetanol (palha de milho)	200	500, 650	—	1, 2	—	[147]
Cinzas de switchgrass	492– 1323	411	—	0,083	0,5	[46]
Cinza de palha de cana-de-açúcar	—	800, 1000	—	0,3	—	[1]
Cinza de espiga de milho	—	650 (ao ar livre combustão)	—	8	—	[141]
cinza de folha de bambu	—	600	—	2	—	

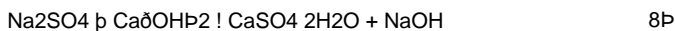
A combustão a 500 C por 12 h, com resfriamento rápido pela retirada imediata das cinzas do forno, foi importante para preservar o teor amorfo de SiO₂. O resfriamento rápido resultou em maior estrutura amorfa das cinzas, melhorando a PA das cinzas em 1,9%, em comparação ao resfriamento lento (as cinzas foram resfriadas até a temperatura ambiente dentro do forno). Além disso, o tempo de retenção dentro do forno de combustão (30-60 min), a duração do suprimento de ar (60-105 min) e o tempo de resfriamento (1-2 d) interagiram para afetar o PA da cinza de casca de arroz [154]. A cinza da casca de arroz apresentou o maior teor de SiO₂ de 86,5% e o menor teor de C de 3,21% quando os tempos de retenção, suprimento de ar e resfriamento foram de 30 min, 60 min e 2 d, respectivamente.

As condições de combustão que influenciaram a AP da cinza da casca de arroz são relevantes para outras fontes de biomassa. Por exemplo, a cinza da palha de trigo produzida a partir da combustão a 670 C tornou as pastas de cimento mais fortes em 11,5% do que a gerada a 570 C [14]. Além disso, a combustão a 700 C por 2 h produziu cinzas de lodo de papel com o melhor PA [48], resultando em depleção de CH de 14,2 mmol/L com cinzas sob as condições de 700 C/2 h, em comparação com 700 C/5 h cinzas (12,4 mmol/L), 750 C/2 h de cinzas (12,6 mmol/L), ou 750 C/5 h de cinzas (11,8 mmol/L). Claramente, há um efeito interativo da temperatura e do tempo de combustão na PA, o que levou outros pesquisadores a considerar esses dois parâmetros na otimização das condições de combustão para alta PA com cinzas de resíduo de bioetanol de palha de milho [8] e cinzas de palha de cana de açúcar [46], entre outros. No entanto, ainda não há consenso sobre os parâmetros de combustão recomendados para maximizar a AP em cinzas de combustão de biomassa, mesmo quando a mesma biomassa é utilizada. A inconsistência na literatura científica é atribuída ao fato de os pesquisadores não seguirem um protocolo experimental padrão em testes de combustão de biomassa, assim o tipo de forno, forma de ignição, ventilação do fluxo de ar e outros fatores não controlados influenciam a PA das cinzas de combustão de biomassa.

4.2. Adição química durante a hidratação

4.2.1. Acelerador de hidratação

Como a reação pozolânica está fortemente associada à hidratação do cimento, alguns aceleradores utilizados para hidratação podem alterar a PA. Aceleradores de hidratação comuns são Na₂SO₄, K₂SO₄, Na₂SO₃, CaSO₄, CaCl₂ (ou CaCl₂·2H₂O) e NaOH. Shi e Day [122] misturaram 4% de Na₂SO₄ ou 4% de CaCl₂·2H₂O com cimento para aumentar o PA de cinzas vulcânicas em 83,3% (Na₂SO₄) e 87,5% (CaCl₂·2H₂O) em 270 d. Na₂SO₄ melhorou o PA na idade de cura precoce (X d) por acelerar o consumo de CH, mas não contribuiu com nenhum aumento depois. Por outro lado, CaCl₂·2H₂O melhorou a PA ao longo de 270 dias de cura. Shi e Day [124] estudaram as funções desses aceleradores em misturas de CH—cinza vulcânica—água e descobriram que 4% de Na₂SO₄ reagiu com CH da seguinte maneira (Eq. (8)):



Consequentemente, a formação de NaOH promoveu a dissolução alcalina de SiO₂ na pozolana, acelerando assim a velocidade da reação pozolânica [156]. Por outro lado, a argamassa de cimento contendo CaCl₂·2H₂O (ou CaCl₂) formou rapidamente um novo cristal (CaO)3Al₂O₃CaCl₂10H₂O—(CaO)3Al₂O₃Ca(OH)₂12H₂O ao redor do gel CSH. Este cristal era mais forte e mais denso que o CSH, que desenvolveu a resistência e durabilidade do concreto. No entanto, a alta concentração de CaCl₂ dissolvido reduziu o pH nas misturas cimento-pozolana-acelerador, retardando assim a dissolução do álcali SiO₂. Consequentemente, o acelerador CaCl₂·2H₂O não contribuiu para a resistência inicial da pasta de cimento, mas melhorou a resistência tardia do cimento (Shi e Day [123]). K₂SO₄ teve uma função semelhante ao Na₂SO₄ devido ao íon SO₄ [104], de modo que tanto 4% Na₂SO₄ quanto 4% K₂SO₄ aumentaram a resistência de 21,0 e 22,3%. Enhanced (hidratação melhorou o PA em 55,5% (Na₂SO₄) ou 47,8% (K₂SO₄) após 90 dias de cura.

As proporções de aceleradores químicos que beneficiam o desenvolvimento da resistência do cimento incluem 3% Na₂SO₄ (Zhang et al. [156]), 5% Na₂SO₄ (Wang et al. [147]) e 1% K₂SO₄ (Gastaldini et al. [49]). Além disso, vários outros produtos químicos também se mostraram viáveis, incluindo 6–14% de CaSO₄ [105], 1% de Na₂SiO₃ [49] ou compostos sintetizados à base de NaOH [27,153]. A adição desses produtos químicos teria um efeito semelhante ao Na₂SO₄, que criava um ambiente alcalino mais forte que poderia estimular a formação de CH mais cristalizado ou intensificar a dissolução do SiO₂ das pozolanas.

4.2.2. Outros produtos químicos

Além dos aceleradores de hidratação convencionais mencionados acima, vários materiais emergentes podem melhorar a PA das pozolanas. Por exemplo, 5-15% de fibra de polipropileno melhorou a PA de metacaulim e zeólita, o que tornou o concreto misturado (5-10% de pozolana) mais resistente ao ataque de MgSO₄ [12]. A adição de 610% de resíduo de catalisador de aluminossilicato melhorou o PA das cinzas volantes devido a uma taxa de hidratação mais rápida nas fases iniciais de cura [149]. A emenda com álcool polivinílico a 3% diminuiu a porosidade da pasta de cimento com cinza de casca de arroz devido à formação de compostos amorfo suplementares [127]. A adição de 2,25-5% de nanosilica coloidal contendo 100% de SiO₂ amorfo reforçou a resistência inicial do cimento – argamassas de cinzas volantes [65]. O aumento da proporção de mistura desta nanosilica foi consistentemente benéfico para a resistência da argamassa nos estágios iniciais, mas afetou negativamente a resistência a longo prazo após 3 meses. A razão para a perda de resistência física do concreto não foi determinada por Hou et al. [65], e continua a ser explicado.

4.3. Elevação da temperatura de cura

Como a hidratação é um processo exotérmico e sensível à temperatura, o PA pode ser alterado por diferentes temperaturas de cura [121]. A maioria dos estudos até agora afirmou que uma temperatura de cura mais alta era vantajosa, especialmente para AP de curto prazo. Por exemplo, Namluk e Nawa [88] descobriram que uma temperatura de cura mais alta (50 C) melhorou a PA das cinzas volantes de carvão em argamassas em 6 vezes a medida à temperatura ambiente (20 C), porque encurtou o tempo para iniciar a reação pozolânica. das 28h às 12h. No entanto, a temperatura de cura mais alta (23-65 C) apenas aumentou a taxa de reação pozolânica, como verificado com análise cinética pozolânica [123], mas não alterou qualquer composição ou microestrutura do concreto. Por outro lado, Rojas e Sánchez de Rojas [112] argumentaram que a melhor PA do metacaulim na cura a 60 C foi atribuída ao maior teor amorfo de estratlingita (Ca₂Al₂(SiO₂)(OH)₁₀2,5 (H₂O)) em produtos de hidratação causados pela maior temperatura de cura. Essas disparidades justificam uma avaliação adicional dos produtos de hidratação e da cinética da reação pozolânica em função da temperatura.

A viabilidade de elevar a temperatura de cura para uma melhor PA a longo prazo foi avaliada por vários autores. Em comparação com a cura a 20 C, Hanehara et al. [56] relataram que uma cura a 40 C poderia aumentar a PA das cinzas volantes em 33,3% após 1 ano. As argamassas misturadas (20% ou 30% de cinzas volantes) apresentaram maior resistência a longo prazo com cura a 40 C (55,0 ou 55,2 MPa) do que a 20 C (53,2 ou 46,5 MPa). No entanto, uma cura a 40 C foi bastante prejudicial às argamassas simples e enfraqueceu a resistência de 51,0 MPa para 44,7 MPa. Isso foi explicado pela menor expansão térmica na microestrutura compacta das argamassas mistas, que não enfraqueceu em temperaturas de cura elevadas [81]. Conclusões semelhantes foram alcançadas por Escalante-García e Sharp [39] e Eziane et al. [40] com temperaturas de cura de 10–60 C para argamassas contendo cinza vulcânica, escória granulada de alto forno moída e pozolana natural.

Nenhuma correlação consistente entre temperatura de cura e PA surgiu até agora, devido à complexidade da cinética de reação no sistema cimento-pozolana-água. Diante dessa necessidade,

Payá et al. [100] desenvolveram um modelo que abordou vários fatores-chave, incluindo temperatura de cura (T) (20–80 C), porcentagem de substituição de cimento por cinza volante (R) (10–60%) e a compressão resistência da argamassa mista (S) (Eq. (9)).

$$S = a + bR + cT + dR^2 + eRT$$

onde a, b, c, d e e foram os coeficientes do modelo, listados na Tabela 4. Consequentemente, este modelo aconselhou matematicamente uma cura de 50-60 C para obter a argamassa de mistura mais forte. Embora seja possível experimentalmente obter um PA melhor usando uma temperatura de cura mais alta, não recomendamos esta estratégia, especialmente para um grande inscrição. A principal razão para desencorajar uma temperatura de cura mais alta é que o aumento da temperatura da água durante a cura consumiria mais energia externa, particularmente nas zonas de clima frio, onde a temperatura do ar poderia facilmente cair abaixo 10 C durante a construção e atividades de construção (por exemplo, Canadá, Rússia e países escandinavos).

4.4. Pré-tratamento de materiais pozzolânicos alternativos

4.4.1. Moagem mais longa

Prolongar o tempo de moagem de uma pozolana é benéfico para o seu PA, uma vez que o tamanho de partícula mais fino aumenta a área de superfície reativa do pozolan e proporciona um efeito de enchimento na microestrutura do concreto. Por exemplo, uma moagem de 60 min pode fazer cinzas de casca de arroz P90% passe uma peneira de 45 μm [154]. Cordeiro et al. [31] investigaram sistematicamente a correlação entre o tempo de moagem, partículas médias tamanho, finura Blaine, PA e capacidade de consumo de Ca^{2+} de açúcar cinza do bagaço de cana (Fig. 1). Um tamanho de partícula mais fino (de 76,3 a 1,7 μm) resultou consistentemente em melhor PA (49-103%). A melhoria do PA aumentou a resistência das argamassas através da promoção de CH

Tabela 4
Coeficientes do modelo (a, b, c, d e e) e desvio padrão (d) derivados pela Eq. (9) a abordar as correlações entre temperatura de cura, substituição de cimento por cinzas volantes (R), e a resistência à compressão da argamassa mista, modificada a partir do trabalho de Payá et al. [100].

R (%)	a	b	c	d	e	d (MPa)
0	39,55	0,403	0,00567	68,41	0,00169	2,3
10	40,80	0,419	0,00727	62,87	0,00219	2,5
40	40,98	0,396	0,00768	62,46	0,00302	3,0
60	42,07	0,383	0,00866	61,85	0,00278	2,7

consumo na reação pozzolânica (36-298 mg CaO/g). Moagem mais longa (10–120 min) aumenta a área de superfície externa (496–979 m^2/kg) de cinzas de lodo de esgoto, no entanto, não afetou seu constituinte cristalino, gravidade específica e superfície interna área. As cinzas mais finas do lodo de esgoto também atuaram como lubrificante no microestrutura da argamassa, melhorando assim sua trabalhabilidade [94]. Por outro lado, Givi et al. [51] têm uma visão oposta para a finura das cinzas e a trabalhabilidade do concreto, em seu estudo com cinzas de casca de arroz. Misturar 5-20% de cinzas finas (5 μm por 180 min de moagem) melhorou a resistência, mas reduziu a capacidade de trabalho do concreto. A explicação deles era que uma partícula de cinza mais grossa foi absorvida na superfície de carga oposta do cimento. partículas, o que restringiu a floculação dessas partículas. Consequentemente, as partículas de cimento foram dispersas e puderam capturar uma maior quantidade de água, o que reduziu a necessidade de água para obter uma consistência satisfatória. Esta explicação foi fundamentada por Van et al. [137], que descobriu que cinzas de casca de arroz mais finas absorveu parte da fase aquosa do gel CSH, diminuindo o conteúdo efetivo de água. Uma vez que as cinzas podem reter água dentro de sua microestrutura, maior tempo de moagem que reduz a capacidade de retenção de água dos poros das cinzas reduziria a PA, pois demonstrado ao comparar uma moagem P120 min, que reduziu o volume de poros de cinzas para 116,4 mm^3/g , com 45 min moagem que rendeu 135,1 mm^3/g [137]. Isso implica que o melhor pré-tratamento de moagem para uma pozolana não deve considerar simplesmente o efeito direto do tamanho das partículas no PA e como enchimento em concreto, mas também como a trabalhabilidade da argamassa e a absorção de água são afetadas pelo tamanho das partículas da pozolana.

4.4.2. Lavagem térmica e ácida

Os pré-tratamentos de lavagem térmica e ácida visam alterar a composição química das pozolanas por aquecimento (para remover carbono) ou lavagem (para remover óxidos de metais alcalinos e fosfato), levando a uma maior pureza de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ que torna as pozolanas mais reativo. Por exemplo, cinzas de óleo de palma aquecidas a 500 ± 50 C por 90 min em um forno a gás continha menos carbono, com base na Perda em Resultados de ignição (LOI) de 2,62% em cinzas tratadas do que em cinzas não tratadas (21,6%) [71]. Apesar de tratar as cinzas do óleo de palma a 500 C para 1 h reduziu o teor de LOI de 9,88% para 2,20%, este pré-tratamento não resultou em nenhuma transformação amorfo-cristalina ou aglomeração de partículas [20,21], então o tratamento simplesmente melhorou a pureza da pozolana. A lavagem ácida de pozolanas é comumente obtido com solução diluída de HCl ou H_2SO_4 (1–4 mol/L). Ácido

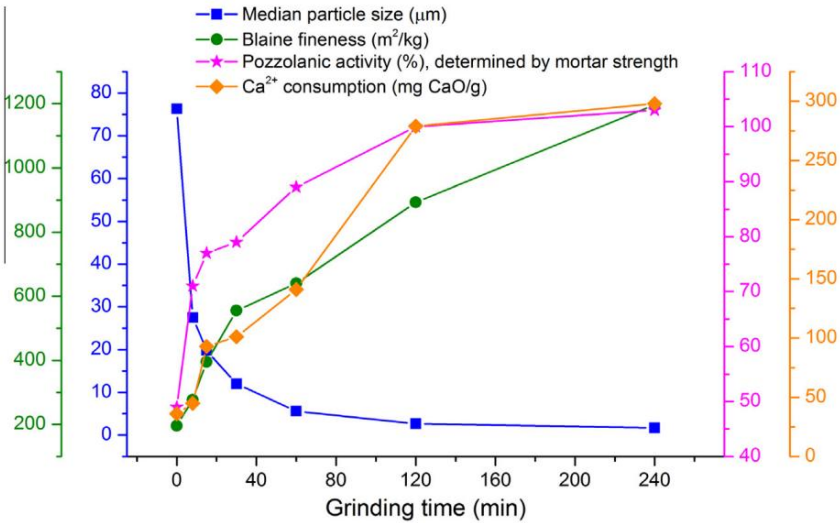


Fig. 1. Correlação entre tempo de moagem, tamanho médio de partícula, finura de Blaine, atividade pozzolânica e capacidade de consumo de Ca^{2+} da cinza de bagaço de cana-de-açúcar modificada do trabalho de Cordeiro et al. [31].

lavagem pode ser implementada antes ou depois da combustão que produz a cinza pozolânica, pois ambos os métodos removem efetivamente metais alcalinos solúveis K, dando taxas de remoção semelhantes de Na2O e K2O [36,41,113]. Apesar da eficácia desses pré-tratamentos em experimentos de laboratório, também não recomendamos melhorar o PA de cinzas de combustão em escala comercial. Pré-tratamentos implicam requisitos extras de energia para aquecer ou secar as pozolanas após lavando. Além disso, o resíduo líquido gerado pela lavagem ácida é um poluente ambiental devido à sua alta concentração de cloreto e sulfato. Essas desvantagens contradizem a lógica original para reaproveitamento de resíduos sólidos como pozolanas, que é minimizar o volume de resíduos e diminuir as emissões de GEE da energia e consumo de cimento sem aumentar os custos econômicos.

5. Modelos preditivos de atividade pozolânica

Estudos experimentais mostram que existem muitos resíduos sólidos materiais que podem ser usados como pozolanas. Esses dados podem ser usados desenvolver ferramentas de triagem como indicadores rápidos do potencial pozolânico em resíduos sólidos antes de realizar testes de resistência e outros testes experimentais. Assim, os objetivos das próximas seções são 1) criar um banco de dados abrangente dos dados experimentais existentes e 2) desenvolver modelos preditivos que prevejam o PA de um material não testado.

5.1. Seleção de dados e objetivo do modelo

Dados experimentais foram coletados descrevendo a pozolânica efeito de pozolanas não convencionais - nomeadamente cinzas de combustão, escórias de alto-forno e outros resíduos sólidos – na compressão resistência do concreto e da argamassa (Tabela S2). Este conjunto de dados foi compilado a partir de 707 grupos de resultados de testes derivados de 81 artigos publicados em periódicos revisados por pares de 1998 a 2014. Testes métodos nestes artigos estão em conformidade com as normas internacionalmente reconhecidas normas, como ASTM C 311-07, ASTM C109, NF EN 196-1 e EN 1015-11:1999. O conjunto de dados representou um grupo diversificado de pozolanos de resíduos sólidos que foram descritos na Seção 2, incluindo cinzas de combustível fóssil e de biomassa, escória de alto-forno, resíduos de catalisador, areia do rio, e muitos outros. A principal suposição era que a os dados eram cientificamente precisos e imparciais, garantindo assim a validade e representatividade dos resultados preditivos em uma ampla variedade de materiais pozolânicos candidatos. Todas as pozolanas possuem um alto teor de SiO2 + Al2O3 + Fe2O3 com estrutura amorfa e tamanho de partícula fino, que foi descrito fornecendo sua composição química e propriedade física (gravidade específica) em nosso modelo. Fatores que podem afetar a AP (como variáveis de entrada independentes) incluíram a composição química e gravidade específica de pozolanas, razão água-ligante (W/B), relação de substituição do cimento por material pozolânico e relação de mistura de superplastificante (aditivo comum para melhorar as características de fluxo das pastas de cimento) (Tabela 5). Observe que poucos documentos na literatura científica fornecem detalhes sobre o conteúdo amorfo das pozolanas. Não existe um método padrão para quantificar o conteúdo amorfo de tais materiais, e este parâmetro é estimado por métodos empíricos em praticamente toda a literatura sobre o tema. Incluir este parâmetro no modelo RNA exigiria que limitemos o conjunto de dados para estudos com estimativas de conteúdo amorfo, o que reduzir significativamente o número de pontos de dados na análise. Para considerar o conjunto mais amplo de pozolanas e minimizar a incerteza associado a este parâmetro mal definido, não incluímos o conteúdo amorfo de pozolanas e, em vez disso, contou com a entrada parâmetros mostrados na Fig. 2 para prever PA com nosso modelo ANN. Como a resistência à compressão foi a variável de resposta mais comum usada para avaliar o efeito pozolânico na literatura,

Tabela 5
Resumo das variáveis de entrada descrevendo as características físico-químicas de pozolanas e seu uso em cimentos misturados, bem como a resistência à compressão de argamassa de cimento após 3, 7, 28 e 90 d de cura, utilizada no desenvolvimento de um modelo de rede neural para prever a atividade pozolânica. A estatística descritiva de n = 707 estudos experimentais incluíram o intervalo (máximo, máx. e mínimo, Min.) e o desvio padrão (SD).

	Unidade	Máx.	Min.	SD	Mediana	Média
Variáveis de entrada						
SiO2	% em peso	99,80	11,84	66,43	65,60	20,98
Alto	% em peso		0,01	7,03	3,00	0,01
Al2O3	54,82% em peso		4,40	0,03	32,7021	130,0001
Fe2O3	59,40% em peso		2,60	2,00	0,01	0,77
MgO	40,19% em peso					2,51
K2O	23,50% em peso					2,56
Na2O	25,41% em peso	16,30				1,72
SO3	% em peso	12,20	0,02	1,26	0,68	1,69
Perda de ignição	% em peso		0,03	5,27	3,72	5,23
Gravidade Específica	1	28,90	0,13	2,32	2,31	0,19
Relação água-ligante		3,25	0,50			0,11
Taxa de substituição		0,80	70,00	1,00	22,17	20,00
Mistura superplastificante	1%	1,37				8,50
					1,03	1,28
Resultado dos testes						
Força compressiva 3 dias	MPa	131,38	4,32	32,09	25,67	22,11
Força compressiva 7 dias	MPa	127,15	1,00	39,60	34,10	22,53
Força compressiva 28 dias	MPa	131,08	3,20	50,18	45,45	22,69
Força compressiva 90 dias	MPa	136,90	6,10	59,78	54,40	24,52

incluiu dados sobre a resistência à compressão em 3, 7, 28 e 90 d para refletem as mudanças na função pozolânica durante os estágios iniciais e posteriores da cura. Para eliminar a interferência de diferentes condições experimentais em cada papel (por exemplo, temperatura de cura, umidade, dimensão de fundição, etc.), o PA foi normalizado comparando a resistência à compressão de argamassa de cimento: misturas de pozolanas ao do cimento Portland 100%, do mesmo estudo (Eq. (10)).

$$PA\delta\% = \frac{1}{100} \times \frac{\text{Resistência à compressão da amostra misturada}}{\text{Resistência à compressão da amostra simples}} \times 100 \quad (10)$$

Como a resistência à compressão é normalmente avaliada várias vezes durante a cura, o PA (%) foi calculado aos 3, 7, 28 e 90 dias de cura, quando os dados estavam disponíveis (n = 146). Com base nisso conjunto de dados, os seguintes modelos tiveram como objetivo 1) desenvolver uma RNA para PA previsão em diferentes idades de cura, usando concreto compressivo força como um indicador de AF e as características físico-químicas e de mistura parâmetros de uma pozolana como variáveis preditivas, e 2) investigar a correlação entre PA, um indicador de compressão do concreto força e idade de cura com um modelo de série temporal.

5.2. Descrição da rede neural artificial (ANN)

Uma RNA de retropropagação de feed forward foi construída para PA previsão (Fig. 2). Resumidamente, os sinais se movem em uma direção neste modelo da camada de entrada, através da camada oculta e para a saídas. Não há ciclo nem loop entre todos os elementos de processamento (PEs). Mais informações sobre a lógica e o algoritmo para este método de RNA são encontradas em Jain et al. [70], Zhang et al. [155], Basheer e Hajmeer [11], e Duan et al. [37]. Os PE em este modelo foram dispostos em camadas. Os PEs em cada camada foram totalmente ligado a todos os PEs em camadas sucessivas, mas houve nenhuma conexão de PEs na mesma camada. A entrada para um PE foi obtido pela multiplicação da saída dos PEs conectados pela força sináptica das conexões. Assim, as somas ponderadas de entrada (líquido) para o jth PE foram calculados com uma função de soma linear (Eq. (11)) [116].

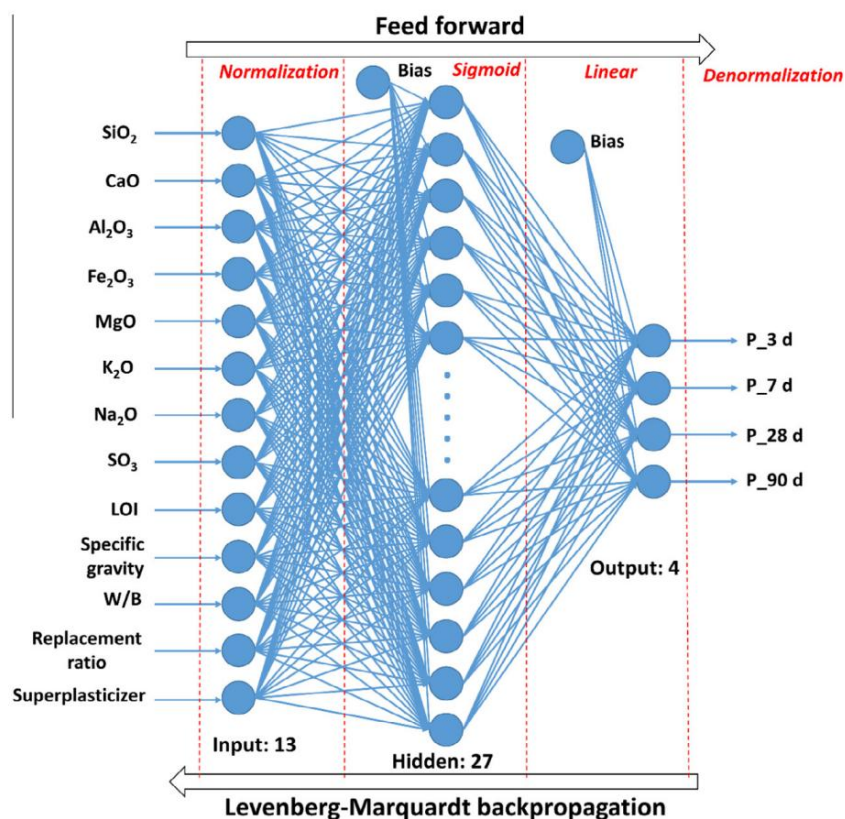


Fig. 2. Estrutura esquemática da rede neural artificial (RNA) de feed forward, com algoritmo de retropropagação, projetada para prever a atividade pozolânica de cimento misturado contendo até 50% de pozolana de fontes não convencionais (descrito na Tabela 2). P simbolizou a atividade pozolânica aos 3, 7, 28 e 90 dias de idade de cura.

$$\text{net}_{bj} = \sum_{i=1}^n x_{ij} w_{ij} + b_j$$

onde t_j era a saída de destino do j th PE e k representava a k th layer que era a camada superior da j th layer dentro de todo o modelo de rede. O processo de treinamento foi concluído com sucesso quando o processo iterativo convergiu. Dois índices foram usados para avaliar o desempenho do modelo, a saber, a raiz do erro quadrático médio (RMS) (Eq. (17)) e a raiz da fração de variância absoluta (R) (Eq. (18)).

onde o j th PE recebeu os sinais da camada anterior contendo n PEs, com o peso de w_{ij} . A saída, o_j , foi derivada do i th PE na camada anterior e b_j simbolizava o viés que simulava um valor limite. Assim, a saída o_j foi transformada da função soma (net_j) através de uma função sigmóide de ativação ($f()$) nos PEs da camada oculta (Eq. (12)). Uma constante a também foi usada para controlar a inclinação da região semi-linear.

$$o_j = \frac{1}{1 + e^{-\text{net}_{bj}}}$$

onde d_j era o sinal de erro do j th PE, e m era o número de iterações. g e b corresponderam às taxas de aprendizado e momentum. g foi obtido pela derivada parcial da função de erro na Eq. (14), como mostrado na Eq. (15) e (16).

O aprendizado desta RNA foi supervisionado por um método de retropropagação com algoritmo de Levenberg-Marquardt [5]. Com base em um princípio de descida de gradiente, quando os erros para um padrão de treinamento específico foram passados para trás da camada de saída para a camada de entrada, esses erros foram minimizados ajustando os pesos e vieses para cada PE (Eq. (13)). w_{ijm} e b_{jm} foram os pesos e vieses para cada PE na m th iteração.

onde d_j era o sinal de erro do j th PE, e m era o número de iterações. g e b corresponderam às taxas de aprendizado e momentum. g foi obtido pela derivada parcial da função de erro na Eq. (14), como mostrado na Eq. (15) e (16).

$$E_r = \frac{1}{2} \sum_j (t_j - o_j)^2$$

$$\frac{\partial E_r}{\partial w_{ij}} = o_j(1 - o_j)(t_j - o_j)$$

$$\frac{\partial E_r}{\partial b_j} = o_j(1 - o_j)(t_j - o_j)$$

k

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{p} \sum_{j=1}^p (t_j - o_j)^2}$$

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum_{j=1}^p (t_j - o_j)^2}{\sum_{j=1}^p t_j^2}}$$

onde t e o eram os valores alvo e preditivos do i ésimo padrão (com o número do padrão p). Um valor de RMS ou R que se aproxima de 0 ou 1 sugere um bom desempenho preditivo.

Essa RNA de retropropagação feed forward tinha uma camada de entrada, uma camada oculta e uma camada de saída (Fig. 2). A camada de entrada continha 13 nós que descreviam os fatores de resistência de pozolana e cimento listados na Tabela 5. A camada de saída tinha 4 nós para descrever a previsão de PA em 3, 7, 28 e 90 d de cura. Como não existe um método padrão para designar o número de nós na camada oculta, tivemos que executar algumas tentativas (1 a 40 nós neste estudo) para selecionar esse parâmetro [98]. Como resultado, uma camada oculta de 27 nós foi ótima e deu o menor erro quadrático médio (Fig. 3). Como a função sigmóide na camada oculta variou de 1 a 1, a camada de entrada foi normalizada após ser carregada com os dados iniciais e a camada de saída foi desnormalizada seguindo a transformação sigmóide [60]. Com base nessa topologia, 70% e 15% de dados (selecionados aleatoriamente) foram usados para

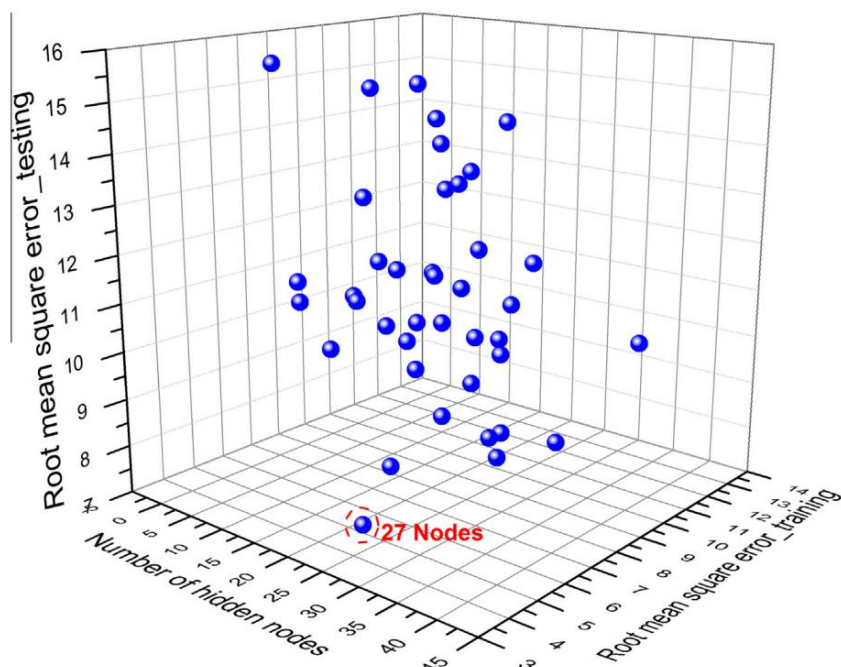


Fig. 3. Determinação do número de nós na camada oculta com base no menor erro quadrático médio das etapas de treinamento e teste. Como não havia um método claro para designar o número do nó na camada oculta, algumas tentativas (1 a 40 nós neste estudo) tiveram que ser executadas para selecionar esse parâmetro.

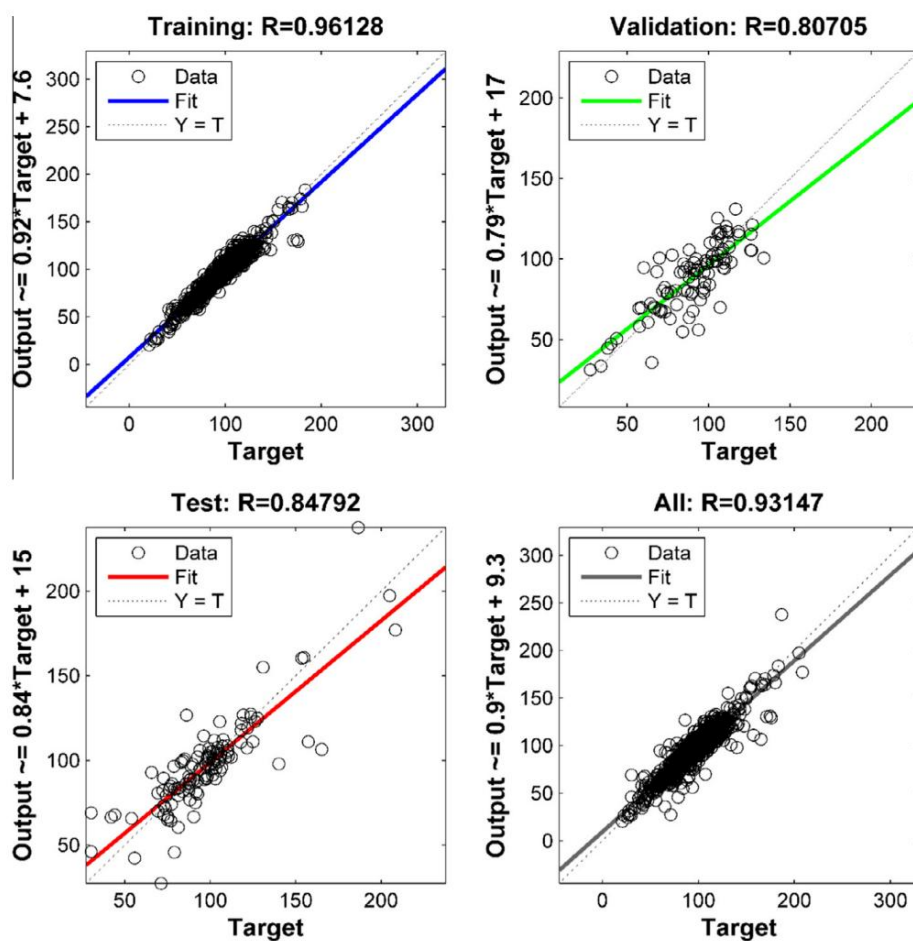


Fig. 4. Resultados preditivos da atividade pozolânica em cimento misturado por modelo de rede neural artificial. “Alvo” correspondeu aos resultados experimentais e “saída” representou os resultados preditivos obtidos a partir do modelo. Conforme explicado na Seção 5.2 acima, o PA nesta equação corresponde à atividade pozolânica normalizada com a unidade de %.

e validação, e isso deixou 15% de dados para teste de ANN. Impulso e as taxas de treinamento foram de 0,9 e 0,3, e o treinamento foi encerrado após 1000 ciclos de iteração [37]. O treinamento foi replicado 20 vezes, e os melhores resultados foram aqueles com o maior valor de R [35]. Além disso, para comparar a capacidade preditiva da RNA com análises de regressão convencionais, realizamos um modelo de regressão multivariável (MVR) no mesmo conjunto de dados com o mesmo etapas de normalização e desnormalização (Eq. (19)).

$$PA_{\delta} \% = \frac{1}{i} \sum_{i=1}^{13} \frac{x_{eui}}{b_i} e$$

$$\delta_{19} P$$

onde xi correspondia às 13 variáveis de entrada, ai e bi eram as parâmetros de regressão, e e simbolizava uma compensação de erro. Como explicado nos parágrafos anteriores, o PA nesta equação corresponde à atividade pozolânica normalizada com a unidade de %. Quando bi é igual a 1, esta função representa uma linearidade perfeita regressão (R = 1).

5.3. Desempenho da rede neural artificial (ANN)

O modelo ANN foi capaz de prever o PA de 22 tipos de sólidos resíduos com diversas propriedades físico-químicas que sofreu combustão, outro aquecimento e pré-tratamento antes eles foram misturados como pozolanas com cimento (Fig. 4). O R2 de 0,9613 da etapa de treinamento confirmou que este modelo foi bem sucedido em aprender a correlação entre as variáveis de entrada e saída. Um valor R de 0,8479 da etapa de teste foi mais uma evidência da precisão dos resultados preditivos. Além disso, a capacidade preditiva de a RNA se mostrou superior aos modelos de regressão multivariada, que foram limitados pelo fato de que eles devem prever os resultados separadamente para cada ponto de tempo. Isto é apoiado pela substancialmente valor quadrático médio de raiz menor de 10,76 para a ANN em comparação aos modelos de regressão (38,25–42,66 em 3–90 dias de cura, Tabela 6). Isso implica que o complexo sistema cimento-pozolana-água não poderia ser descrito com precisão com regressão tradicional abordagem de modelo, uma vez que não pode refletir as múltiplas interações que ocorrem entre os parâmetros de entrada com o tempo. Concluimos que a RNA construída neste estudo foi uma ferramenta robusta com capacidade avaliar e prever a elegibilidade de uma pozolana para mistura cimento, com base em seu efeito esperado na resistência à compressão.

Consideramos nossa RNA um indicador robusto e abrangente da AP de diversas pozolanas, mas observamos que ela é menos precisa do que modelos semelhantes relatados na literatura. Estatisticamente, o R de 0,8479 deste teste ANN indica capacidade preditiva adequada, mas não é tão próximo da previsão ideal quanto o R obtido por outros RNA de pozolanas relatadas por Duan et al. [37] (R = 0,9977), Dantas et al. [35] (R = 0,9854), Sarýdemir [116] (R = 0,9992) e Prasad et al. [107] (R = 0,9165). Isso se deve ao fato de que nossa RNA confiou em um conjunto de dados muito mais amplo, abrangendo 708 testes pozolânicos com diversos atributos físico-químicos que foram avaliados com vários métodos de teste (Tabela S2). Diferenças nos protocolos de teste entre os estudos torna cada ponto de dados experimental único e introduz erro experimental, mesmo quando materiais ou testes semelhantes condições são consideradas, resultando assim em mais variabilidade na conjunto de dados (Tabela 5). Em contraste, outras ANN tentando prever PA

Tabela 6
Comparação dos índices de erro preditivo de modelos de regressão multivariada e uma rede neural artificial que descreve a atividade pozolânica, um indicador de concreto resistência à compressão, após 3, 7, 28 e 90 d de cura.

	Modelo de regressão multivariável				Neurais artificiais rede
	3 dias	7 dias	28 dias	90 dias	
Raiz média erro quadrado	39,19	42,66	38,35	38,25	10,76
R	0,4778	0,4517	0,5154	0,5679	0,8479

baseou-se em dados coletados em condições experimentais semelhantes (ou seja, com o mesmo protocolo de teste) e até mesmo com a mesma pozolana, então não é surpreendente que os valores de R sejam maiores para aquelas ANN do que o nosso modelo. Embora tenhamos tentado normalizar os dados dentro de cada estudo, comparando o PA de cimento misturado com 100% cimento, outra opção seria normalizar o PA entre protocolos de teste. No momento, não temos informações suficientes calibrar a resistência à compressão de argamassas de cimento a partir de diferentes métodos de ensaio. Em conclusão, nossa abordagem de metadados para dados coleta e preparação do conjunto de dados rendeu um modelo ANN robusto que pode ser aplicado amplamente para prever o PA de muitos candidatos materiais considerados como pozolanas,

5.4. Análise de séries temporais da atividade pozolânica

Como as resistências à compressão do concreto ou da argamassa variam consideravelmente com diferentes idades de cura, e essas resistências são um reflexo do PA, a mudança do PA com a idade de cura pode ser definido por um modelo de série temporal. A equação de série temporal desenvolvida por Shi e Day [122] para analisar a relação força-idade sugere a validade dessa abordagem, mas como a AP contribuiria para essa relação não foi discutido em seu trabalho. Assumindo que há uma correlação linear positiva entre PA e resistência à compressão, um modelo PA série temporal foi desenvolvido em Eq. (20),

$$P(t) = P_U \frac{KT}{1 + KT} \frac{t - t_0}{t_0}$$

$$\delta_{20} P$$

onde P(t) foi o PA (%) em uma certa idade de cura t, e PU representou um PA final teórico (t = +1). KT (d⁻¹) significava um PA constante de taxa de mudança, e t0 (d) simbolizava um valor inicial teórico tempo de endurecimento. Após calcular os valores médios de n = 707 grupos de PA—dados de tempo, um ajuste de dados não linear foi realizado com a Eq. (20). Além disso, esses dados de tempo de PA foram interpretados estatisticamente por uma análise de variância unidirecional (ANOVA) com testes de LSD de Fisher (P < 0,05).

Como esperado, a PA aumentou significativamente (P < 0,05) com a idade de cura, de 97,21% (3 dias) para 103,99% (90 dias) (fig. 5). Houve pouca mudança na PA nos primeiros 7 dias, indicando um atraso na reação pozolânica de cerca de uma semana e, posteriormente, reforço do concreto misturado (de 7 d a 90 d de cura). Cimento A hidratação parece ser a fonte de resistência à compressão na argamassa na primeira semana, e tende a ser prejudicada na mistura

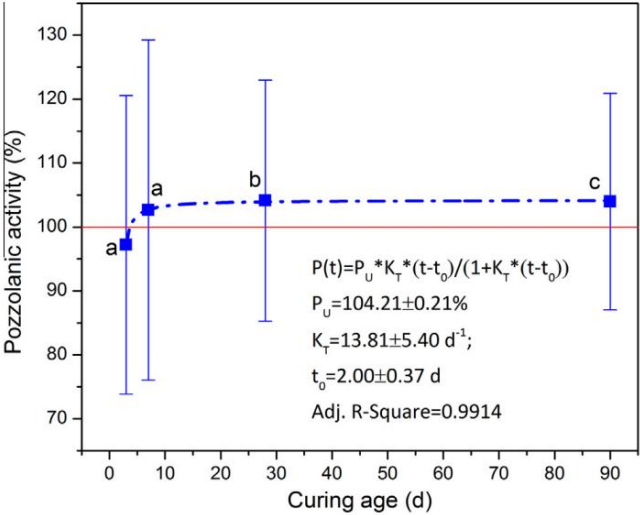


Fig. 5. Correlação entre atividade pozolânica e idade de cura em argamassa de cimento misturado contendo 0-50% de pozolana. O valor com letras diferentes foram significativamente diferente (P < 0,05, teste LSD de Fisher, n = 146).

cimentos, mas essa deficiência precoce foi superada em 7 dias, quando a PA média atingiu 100% (Fig. 5). O modelo de séries temporais (Eq. (20)) foi bem ajustado aos dados experimentais (Adj. $R^2 = 0,9914$), confirmando assim a adequação desta função para descrever a correlação PA-tempo (Fig. 5). A UP foi estimada em $104,21 \pm 0,21\%$ quando a idade de cura se aproximava de +1. Resolvendo esta função em função do tempo (0, +1), o PA excederia 100% somente se a cura for maior que 3,72 d, indicando uma vantagem teórica da reação pozolânica no PA após cerca de 4 d de cura. A partir daí, a reação do PA no sistema cimento-pozolana-água pode aumentar a resistência à compressão da argamassa após uma idade de cura suficientemente longa.

Embora os valores médios de PA se ajustem bem à equação preditiva do modelo de série temporal, o desvio padrão foi considerado grande, devido à ampla gama de características físico-químicas das pozolanas e condições experimentais representadas em nosso banco de dados (Tabela 5). A alta variação em nosso modelo de séries temporais indica que ele pode super ou subestimar os tempos de cura ideais para atingir a resistência crítica quando pozolanas específicas são usadas. No entanto, fornece informações sobre o desempenho geral que pode ser esperado de pozolanas derivadas de materiais de resíduos sólidos. Assim, nosso modelo pode ser considerado como um caso de referência ou diretriz para o desempenho de pozolanas alternativas.

6. Observações finais

Inúmeros resíduos sólidos têm potencial para uso como pozolanas em cimentos misturados. Uma pozolana aceitável deve ser significativamente rica em SiO_2 amorfo, Al_2O_3 e Fe_2O_3 , e seu tamanho de partícula deve ser fino o suficiente para assegurar uma superfície cristalina altamente reativa. A mistura desses materiais com cimento economiza matéria-prima, combustível e energia devido ao menor uso de cimento Portland e alcança propriedades de concreto equivalentes ou superiores. Os modelos ANN e de séries temporais preveem com precisão a PA de resíduos sólidos durante 3-90 d de cura, portanto, podem ser usados como uma ferramenta de triagem para materiais residuais considerados como potenciais pozolanas antes de realizar testes de resistência.

Estudos futuros devem desenvolver 1) um protocolo padronizado e imparcial para testar a AP de materiais residuais, contornando assim as disparidades que surgem de vários métodos de avaliação de AP, e 2) correlações robustas entre as propriedades da pozolana, idade de cura e AP, que fornecem dados preditivos modelos com dados mais confiáveis.

Agradecimentos

Esta pesquisa foi financiada pelo Conselho de Pesquisa em Ciências Naturais e Engenharia (NSERC) do Canadá através do número de concessão EGP 466286-14 e o Fundo de Desenvolvimento de Pesquisa Colaborativa McGill. Apreciamos o apoio industrial da Lafarge Cement North America. Também gostaríamos de agradecer ao Dr. Chun-Chieh Yang, do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, por revisar e fornecer comentários úteis sobre a metodologia, resultados e interpretação da RNA.

Apêndice A. Dados Suplementares

Dados complementares associados a este artigo podem ser encontrados, na versão online, em <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.031>.

Referências

- [1] D. Adesanya, A. Raheem, Desenvolvimento de cimento misturado com cinzas de sabugo de milho, Constr. Construir. Mater. 23 (1) (2009) 347-352.
- [2] D. Adesanya, A. Raheem, Um estudo da permeabilidade e ataque ácido de cimentos misturados com cinzas de sabugo de milho, Constr. Construir. Mater. 24 (3) (2010) 403-409.

- [3] D. Adesanya, A. Raheem, Um estudo das características de trabalhabilidade e resistência à compressão do concreto de cimento misturado com cinza de sabugo de milho, Constr. Construir. Mater. 23 (1) (2009) 311-317.
- [4] M. Aldahdooh, N. Muhamad Bunnori, M. Megat Johari, Desenvolvimento de concreto reforçado com fibra de alto desempenho verde contendo cinzas ultrafinas de óleo de palma, Constr. Construir. Mater. 48 (2013) 379-389.
- [5] Ampazis, N., Perantonis, S.J. Algoritmo de Levenberg-Marquardt com momento adaptativo para o treinamento eficiente de redes feedforward. Neural Networks, 2000. IJCNN 2000, Proceedings of the IEEE-INNS-ENNS International Joint Conference on IEEE., (2000) pp. 126–131.
- [6] ASTM, C618-12a: Especificação padrão para cinzas volantes de carvão e pozolana natural bruta ou calcinada para uso em concreto, 2012. West Conshohocken, PA.
- [7] FF Ataie, KA Riding, Pré-tratamentos termoquímicos para produção de cinzas de resíduos agrícolas para concreto, J. Mater. Engenheiro civil. 25 (11) (2012) 1703-1711.
- [8] FF Ataie, KA Riding, Uso de subproduto de bioetanol para produção de material cimentício suplementar, Constr. Construir. Mater. 51 (2014) 89-96.
- [9] U. Atici, Previsão da resistência do concreto de mistura mineral usando análise de regressão multivariável e uma rede neural artificial, Expert Syst. Aplic. 38 (8) (2011) 9609-9618.
- [10] A. Awal, I. Shehu, Avaliação do calor de hidratação de concreto contendo alta volume de cinzas de óleo de palma, Combustível 105 (2013) 728–731.
- [11] I. Basheer, M. Hajmeer, redes neurais artificiais: fundamentos, computação, design e aplicação, J. Microbiol. Métodos 43 (1) (2000) 3–31.
- [12] K. Behfarina, O. Farshadfar, Os efeitos de ligantes pozolânicos e fibras de polipropileno na durabilidade do SCC ao ataque de sulfato de magnésio, Constr. Construir. Mater. 38 (2013) 64-71.
- [13] DP Bentz, PE Stutzman, EJ Garboczi, Estudos experimentais e de simulação da zona interfacial em concreto, Cem. Concr. Res. 22 (5) (1992) 891-902.
- [14] H. Biricik, F. Aköz, F. Türker, I. Berkay, Resistência ao ataque de sulfato de magnésio e sulfato de sódio de argamassas contendo cinzas de palha de trigo, Cem. Concr. Res. 30 (8) (2000) 1189-1197.
- [15] R. Blissett, N. Rowson, Uma revisão da utilização de vários componentes de carvão fly Cinza, Combustível 97 (2012) 1–23.
- [16] BS-EN, BS EN 196-2:2013 Método de Teste de Cimento, Análise Química de Cimento, BSI, 2013.
- [17] JW Bullard, HM Jennings, RA Livingston, A. Nonat, GW Scherer, JS Schweitzer, KL Scrivener, JJ Thomas, Mecanismos de hidratação do cimento, Cem. Concr. Res. 41 (12) (2011) 1208-1223.
- [18] F. Canpolat, K. Yılmaz, M. Köse, M. Sümer, M. Yurdusev, Uso de zeólita, cinzas de carvão e cinzas volantes como materiais de substituição na produção de cimento, Cem. Concr. Coisas. 34 (5) (2004) 731-735.
- [19] W. Chalee, T. Sasakul, P. Suwanmaneechot, C. Jaturapitakkul, Utilização de cinzas de casca de arroz para melhorar a resistência à corrosão do concreto sob exposição de 5 anos em um ambiente marinho, Cem. Concr. Compos. 37 (2013) 47-53.
- [20] C. Chandara, KA Mohd Azizli, ZA Ahmad, SF Saiyid Hashim, E. Sakai, Calor de hidratação de cimento misturado contendo cinzas combustíveis de óleo de palma moídas tratadas, Constr. Construir. Mater. 27 (1) (2012) 78–81.
- [21] C. Chandara, E. Sakai, KAM Azizli, ZA Ahmad, SFS Hashim, O efeito do carbono não queimado em cinzas de óleo de palma na fluidez de pastas de cimento contendo superplastificante, Constr. Construir. Mater. 24 (9) (2010) 1590-1593.
- [22] S. Chandrasekhar, K. Satyanarayana, P. Pramada, P. Raghavan, T. Gupta, Processamento de revisão, propriedades e aplicações de sílica reativa de casca de arroz—uma visão geral, J. Mater. Sci. 38 (15) (2003) 3159-3168.
- [23] B. Chatveera, P. Lertwattanaruk, Durabilidade de concretos convencionais contendo cinzas de casca de arroz preto, J. Environ. Gerenciar. 92 (1) (2011) 59–66.
- [24] C.-G. Chen, C.-J. Sun, S.-H. Gau, C.-W. Wu, Y.-L. Chen, Os efeitos do processo de estabilização mecânico-química para cinzas volantes do incinerador de resíduos sólidos municipais nas reações químicas na pasta de cimento, Waste Manage. 33 (4) (2013) 858-865.
- [25] H.-J. Chen, S.-S. Huang, C.-W. Tang, M. Malek, L.-W. Ean, Efeito dos ambientes de cura na resistência, porosidade e resistência ao ingresso de cloretos de concretos de cimento de escória de alto forno: um estudo de canteiro de obras, Constr. Construir. Mater. 35 (2012) 1063-1070.
- [26] M. Cherif, JC Rocha, J. Pera, Propriedades pozolânicas de cinzas de fundo de combustão de carvão pulverizado, Cem. Concr. Res. 29 (9) (1999) 1387-1391.
- [27] M. Chi, R. Huang, mecanismo de ligação e propriedades de argamassas de cinzas / escórias ativadas por álcalis, Constr. Construir. Mater. 40 (2013) 291-298.
- [28] P. Chindaprasit, P. Kanchanda, A. Sathonsaowaphak, H. Cao, Resistência ao sulfato de cimentos misturados contendo cinzas volantes e cinzas de casca de arroz, Constr. Construir. Mater. 21 (6) (2007) 1356-1361.
- [29] P. Chindaprasit, S. Rukzon, V. Sirivivatnanon, Resistência à penetração de cloreto de argamassa de cimento Portland misturado contendo cinzas de óleo de palma, cinzas de casca de arroz e cinzas volantes, Constr. Construir. Mater. 22 (5) (2008) 932-938.
- [30] N. Chusilp, C. Jaturapitakkul, K. Kiattikomol, Utilização de cinzas de bagaço como material pozolânico em concreto, Constr. Construir. Mater. 23 (11) (2009) 3352-3358.
- [31] G. Cordeiro, R. Toledo Filho, L. Tavares, E. Fairbairn, Atividade pozolânica e efeito de carga da cinza do bagaço de cana-de-açúcar em cimento Portland e argamassas de cal, Cem. Concr. Compos. 30 (5) (2008) 410-418.
- [32] MW Craven, JW Shavlik, Usando redes neurais para mineração de dados, Futuro Gerador. Comp. Sy. 13 (2) (1997) 211-229.
- [33] J. Cuenca, J. Rodríguez, M. Martín-Morales, Z. Sánchez-Roldán, M. Zamorano, Efeitos de cinzas volantes de biomassa de resíduo de azeitona como enchimento em concreto auto-adensável, Constr. Construir. Mãe. 40 (2013) 702-709.

- [34] M. Cyr, R. Idir, G. Escadellais, Uso de metacaulim para estabilizar cinzas de lodo de esgoto e cinzas volantes de incineração de resíduos sólidos municipais em materiais à base de cimento, J. Perigo. Mater. 243 (2012) 193-203.
- [35] ATA Dantas, M. Batista Leite, K. de Jesus Nagahama, Previsão da resistência à compressão de concreto contendo resíduos de construção e demolição usando redes neurais artificiais, Constr. Construir. Mater. 38 (2013) 717–722.
- [36] S. Donatello, A. Freeman-Pask, M. Tyrer, C. Cheeseman, Efeito da moagem e lavagem ácida na atividade pozzolânica de cinzas de lodo de esgoto de incinerador, Cem. Concr. Compos. 32 (1) (2010) 54–61.
- [37] Z. Duan, S. Kou, C. Poon, Previsão da resistência à compressão de concreto agregado reciclado usando redes neurais artificiais, Constr. Construir. Mater. 40 (2013) 1200-1206.
- [38] AU Elinwa, YA Mahmood, Cinzas de resíduos de madeira como substituição de cimento material, Cem. Concr. Compos. 24 (2) (2002) 219-222.
- [39] J. Escalante-García, J. Sharp, A microestrutura e propriedades mecânicas de cimentos misturados hidratados em várias temperaturas, Cem. Concr. Res. 31 (5) (2001) 695-702.
- [40] K. Ezziâne, A. Bougara, A. Kadri, H. Khelafi, E. Kadri, Resistência à compressão de argamassa contendo pozolana natural sob várias temperaturas de cura, Cem. Concr. Compos. 29 (8) (2007) 587-593.
- [41] Q. Feng, H. Yamamichi, M. Shoya, S. Sugita, Estudo sobre as propriedades pozzolânicas de cinzas de casca de arroz por pré-tratamento com ácido clorídrico, Cem. Concr. Res. 34 (3) (2004) 521-526.
- [42] A. Fraay, J. Bijen, Y. De Haan, A reação de cinzas volantes em concreto um crítico exame, Cem. Concr. Res. 19 (2) (1989) 235-246.
- [43] M. Frías, R. García, RV de la Villa, E. Villar, O efeito da mistura de pozolana binária sobre as mudanças mineralógicas no ternário de papel ativado lodo-mosca cinza-Ca (OH)₂ sistema, Constr. Construir. Mater. 38 (2013) 48–53.
- [44] M. Frías, R. Vigil de la Villa, R. García, I. de Soto, C. Medina, M. Sánchez de Rojas, Aspectos científicos e técnicos de matrizes de cimento misturado contendo resíduos de ardósia ativadas, Cem. Concr. Composições. 48 (2014) 19–25.
- [45] M. Frías, E. Villar-Cocina, MI Sánchez de Rojas, E. Valencia-Morales, O efeito que diferentes métodos de atividade pozzolânica têm sobre as constantes cinéticas da reação pozzolânica em sistemas palha-argila de cana-de-açúcar/cal. : Aplicação de um modelo cinético-difusivo, Cem. Concr. Res. 35 (11) (2005) 2137-2142.
- [46] M. Frías, E. Villar-Cociña, E. Valencia-Morales, Caracterização de resíduos de palha de cana-de-açúcar como material pozzolânico para construção: temperatura de calcinação e parâmetros cinéticos, Gestão de Resíduos. 27 (4) (2007) 533-538.
- [47] K. Ganesan, K. Rajagopal, K. Thangavel, Cimento misturado com cinza de casca de arroz: avaliação do nível ótimo de substituição para propriedades de resistência e permeabilidade do concreto, Constr. Construir. Mater. 22 (8) (2008) 1675-1683.
- [48] R. García, R. Vigil de la Villa, I. Vegas, M. Frías, MI Sánchez de Rojas, As propriedades pozzolânicas dos resíduos de lodo de papel, Constr. Construir. Mãe. 22(7) (2008) 1484-1490.
- [49] A. Gastaldini, G. Isaia, N. Gomes, J. Sperl, Penetração de cloreto e carbonatação em concreto com cinza de casca de arroz e ativadores químicos, Cem. Concr. Compos. 29 (3) (2007) 176-180.
- [50] A. Gastaldini, G. Isaia, T. Hoppe, F. Missau, A. Sacilotto, Influência do uso da cinza da casca de arroz na resistividade elétrica do concreto: um estudo de viabilidade técnica e econômica, Constr. Construir. Mater. 23 (11) (2009) 3411-3419.
- [51] AN Givi, SA Rashid, FNA Aziz, MAM Salleh, Avaliação dos efeitos do tamanho das partículas de cinza de casca de arroz na resistência, permeabilidade à água e trabalhabilidade do concreto misto binário, Constr. Construir. Mater. 24 (11) (2010) 2145-2150.
- [52] AN Givi, SA Rashid, FNA Aziz, MAM Salleh, Contribuição da cinza da casca de arroz para as propriedades da argamassa e do concreto: uma revisão, J. Am. Sci. 6 (3) (2010) 157–165.
- [53] S. Goñi, M. Frías, I. Vegas, R. García, Efeito do sulfato de sódio na mineralogia de cimentos de mistura ternária elaborados com lodo de papel ativado e cinzas volantes, Constr. Construir. Mater. 54 (2014) 313-319.
- [54] ER Grist, KA Paine, A. Heath, J. Norman, H. Pinder, Desenvolvimento de resistência à compressão de argamassas binárias e ternárias de cal-pozolana, Mater. Projeto 52 (2013) 514-523.
- [55] J. Guru Jawahar, C. Sashidhar, I. Ramana Reddy, J. Annie Peter, Propriedades de micro e macronível do concreto auto-compactável misturado com cinzas volantes, Mater. Projeto 46 (2013) 696-705.
- [56] S. Hanehara, F. Tomosawa, M. Kobayakawa, K. Hwang, Efeitos da razão água/pó, razão de mistura de cinzas volantes e temperatura de cura na reação pozzolânica de cinzas volantes em pasta de cimento, Cem. Concr. Res. 31 (1) (2001) 31–39.
- [57] H. Hasan, F. Aköz, IL Berktaş, AN Tulgar, Estudo das propriedades pozzolânicas de cinzas de palha de trigo, Cem. Concr. Res. 29 (5) (1999) 637-643.
- [58] AA Hassan, AA Abouhussen, J. Mayo, O uso de sílica-brecha como material de cimento suplementar em argamassa e concreto, Constr. Construir. Mater. 51 (2014) 321-328.
- [59] J. Havlica, J. Brandstetr, I. Odler, Possibilidades de utilização de resíduos sólidos da combustão de carvão em leito fluidizado pressurizado (PSBC) para a produção de cimentos misturados, Cem. Concr. Res. 28 (2) (1998) 299-307.
- [60] R. Hecht-Nielsen, Teoria da rede neural de retropropagação, em: Redes Neurais. IJCNN., Conferência Conjunta Internacional, IEEE, 1989, pp. 593-605.
- [61] Pvd Heede, M. Maes, E. Gruyaert, ND Belie, Previsão probabilística completa da vida útil e avaliação do ciclo de vida do concreto com cinzas volantes e escória de alto-forno em um ambiente marinho submerso: um estudo de parâmetros, Int. J. Ambiente. Sustentar. Dev. 11 (1) (2012) 32–49.
- [62] V. Horsakulthai, S. Phiuanna, W. Kaenbud, Investigação sobre a resistência à corrosão do betão de cimento misturado com bagaço de arroz e cinzas de madeira por tensão impressa, Constr. Construir. Mater. 25 (1) (2011) 54–60.
- [63] KMA Hossain, cinza vulcânica e pedra-pomes como aditivos de cimento: características pozzolânicas, reação alcalino-silica e expansão em autoclave, Cem. Concr. Res. 35 (6) (2005) 1141-1144.
- [64] KMA Hossain, M. Lachemi, Resistência, durabilidade e aspectos micro-estruturais do concreto de cinzas vulcânicas de alto desempenho, Cem. Concr. Res. 37 (5) (2007) 759-766.
- [65] P.-K. Hou, S. Kawashima, K.-J. Wang, DJ Corr, J.-S. Qian, SP Shah, Efeitos da nanossilica coloidal nas propriedades reológicas e mecânicas de argamassa de cimento de cinzas volantes, Cem. Concr. Compos. 35 (1) (2013) 12–22.
- [66] DN Huntzinger, TD Eatmon, Uma avaliação do ciclo de vida da fabricação de cimento Portland: comparando o processo tradicional com tecnologias alternativas, J. Clean. Prod. 17 (7) (2009) 668-675.
- [67] GM Idorn, Concrete Progress: From Antiquity to Third Millenium, Thomas Telford, 1997.
- [68] B. Is ykdagý, IB Topçu, O efeito da escória de alto-forno granulada moída nas propriedades da argamassa Horasan, Constr. Construir. Mater. 40 (2013) 448-454.
- [69] R. Iyer, J. Scott, Cinzas volantes da estação de energia – uma revisão da utilização de valor agregado fora da indústria da construção, Resource. Conserv. Rec. 31 (3) (2001) 217-228.
- [70] AK Jain, J. Mao, K. Mohiuddin, Redes neurais artificiais: um tutorial, Computador 29 (3) (1996) 31-44.
- [71] M. Johari, A. Zeyad, N. Muhamad Bunnori, K. Ariffin, Propriedades de engenharia e transporte de concreto verde de alta resistência contendo alto volume de cinzas ultrafinas de óleo de palma, Constr. Construir. Mater. 30 (2012) 281-288.
- [72] C. Jolicoeur, M.-A. Simard, Interações química-cimento: fenomenologia e conceitos físico-químicos, Cem. Concr. Compos. 20 (2) (1998) 87-101.
- [73] R.C. Kanning, K.F. Portella, M.O. Bragança, M.M. Bonato, J. dos Santos, Banana leaves ashes as pozzolan for concrete and mortar of Portland cement, Constr. Construir. Mater. 54 (2014) 460-465.
- [74] C. Karakurt, IB Topçu, Efeito de cimentos misturados com zeólita natural e subprodutos industriais na corrosão de vergalhões e resistência a altas temperaturas do concreto, Constr. Construir. Mater. 35 (2012) 906-911.
- [75] I. Kula, A. Olgun, V. Sevinc, Y. Erdogan, Uma investigação sobre o uso de resíduos de minério de estanho, cinzas volantes e cinzas de fundo de carvão como materiais de substituição de cimento Portland, Cem. Concr. Res. 32 (2) (2002) 227-232.
- [76] H. Kurama, M. Kaya, Uso de cinzas de fundo de combustão de carvão em mistura de concreto , Constr. Construir. Mater. 22 (9) (2008) 1922-1928.
- [77] K.-L. Lin, D.-F. Lin, W.-J. Wang, C.ÿC. Chang, T.ÿC. Lee, Reação pozzolânica de uma argamassa feita com cimento e escória vitrificada a partir de uma mistura de cinzas MSWI e lodo de LED, Constr. Construir. Mater. 64 (2014) 277-287.
- [78] KL Lin, CL Hwang, JL Shie, YM Chang, A. Cheng, características de hidratação de catalisadores de resíduos usados como materiais pozzolânicos, Environ. Prog. Sustentar. Energia 33 (2) (2014) 353–358.
- [79] M. Lorenzo, S. Goni, A. Guerrero, Papel do componente aluminoso de cinzas volantes na durabilidade de pastas de cinzas volantes de cimento Portland em ambiente marinho, Waste Manage. 23 (8) (2003) 785-792.
- [80] M. Madani Hosseini, Y. Shao, JK Whalen, Produção de biocimento a partir de resíduos vegetais ricos em cimento: perspectivas e potencial futuro no Canadá, Biosyst. Eng. 110 (4) (2011) 351-362.
- [81] Y. Maltais, J. Marchand, Influência da temperatura de cura na hidratação do cimento e no desenvolvimento da resistência mecânica de argamassas de cinzas volantes, Cem. Concr. Res. 27 (7) (1997) 1009-1020.
- [82] BK Marsh, RL Day, Reações pozzolânicas e cimentícias de cinzas volantes em pastas de cimento misturadas, Cem. Concr. Res. 18 (2) (1988) 301-310.
- [83] C. Medina, P. Banfill, M. Sánchez de Rojas, M. Frías, Comportamento reológico e calorimétrico de cimentos misturados com louças sanitárias contendo cerâmica e resíduos de construção/demolição, Constr. Construir. Mater. 40 (2013) 822-831.
- [84] PK Mehta, Subprodutos Pozzolânicos e Cimentícios como Aditivos Minerais para Concreto – Uma Revisão Crítica, Publicação Especial ACI, 1983, p. 79.
- [85] K. Montakamtivong, N. Chusilp, W. Tangchirapat, C. Jaturapitakkul, Resistência e evolução térmica de concretos contendo cinzas de bagaço de usinas termelétricas na indústria açucareira, Mater. Projeto 49 (2013) 414-420.
- [86] Y. Morozov, A. Castela, A. Dias, M. Montemor, Comportamento de corrosão induzida por cloreto de aço de reforço em argamassas modificadas por catalisador de craqueamento fluido, Cem. Concr. Res. 47 (2013) 1–7.
- [87] DG Nair, A. Fraaij, AA Klaassen, AP Kentgens, Uma investigação estrutural relativa à atividade pozzolânica das cinzas de casca de arroz, ÿÿÿCem. Concr. Res. 38 (6) (2008) 861-869.
- [88] M. Narmluk, T. Nawa, Efeito da temperatura de cura na reação pozzolânica de cinzas volantes em pasta de cimento misturado, Int. J. Chem. Eng. Aplic. 5 (1) (2014) 31–35.
- [89] R.-U.-D. Nassar, P. Soroushian, T. Ghebrab, Investigação de campo de concreto de pavimento de cinzas volantes de alto volume, Resource. Conserv. Recycle. 73 (2013) 78–85.
- [90] M. Nehdi, J. Duquette, A. El Damatty, Desempenho de cinzas de casca de arroz produzidas usando uma nova tecnologia como aditivo mineral em concreto, Cem. Concr. Res. 33 (8) (2003) 1203-1210.
- [91] C. Ogden, K. Illeleji, K. Johnson, Q. Wang, Mudanças nas propriedades do combustível de combustão direta em campo de switchgrass colhidas do verão ao outono, Processo de Combustível. Tecnol. 91 (3) (2010) 266-271.
- [92] HM Owaid, R. Hamid, M. Taha, Influência de cinzas de lodo de alúmen termicamente ativado nas propriedades de engenharia de concretos ligantes de mistura múltipla, Constr. Construir. Mater. 61 (2014) 216-229.

[93] M. Pala, E. Özbay, A. Öztas , M. Yuce, Avaliação dos efeitos a longo prazo de cinzas volantes e sílica ativa na resistência à compressão do concreto por redes neurais, *Constr. Construir. Mater.* 21 (2) (2007) 384-394.

[94] S.-C. Pan, D.-H. Tseng, C.-Y.C. Lee, C. Lee, Influência da finura das cinzas de lodo de esgoto nas propriedades da argamassa, *Cem. Concr. Res.* 33 (11) (2003) 1749–1754.

[95] N. Panwar, S. Kaushik, S. Kothari, Papel das fontes de energia renovável na proteção ambiental: uma revisão, *Renew. Sustentar. Energia Rev.* 15 (3) (2011) 1513–1524.

[96] V. Papadakis, S. Tsimas, Materiais de cimentação suplementares em betão: Parte I: eficiência e design, *Cem. Concr. Res.* 32 (10) (2002) 1525-1532.

[97] VG Papadakis, Efeito de cinzas volantes em sistemas de cimento Portland: Parte I. Cinzas volantes com baixo teor de cálcio, *Cem. Concr. Res.* 29 (11) (1999) 1727-1736.

[98] R. Parichatprecha, P. Nimityongskul, Análise de durabilidade de concreto de alto desempenho usando redes neurais artificiais, *Constr. Construir. Mater.* 23 (2) (2009) 910-917.

[99] J. Payá, J. Monzó, M. Borrachero, Resíduo de catalisador de craqueamento catalítico fluido (FC3R): um excelente subproduto mineral para melhorar o desenvolvimento de resistência inicial de misturas de cimento, *Cem. Concr. Res.* 29 (11) (1999) 1773-1779 .

[100] J. Payá, J. Monzo, M. Borrachero, E. Peris-Mora, F. Amahjour, Tratamento mecânico de cinzas volantes: Parte IV. Desenvolvimento de resistência de argamassas de cimento de cinzas volantes moídas curadas a diferentes temperaturas, *Cem. Concr. Res.* 30 (4) (2000) 543-551.

[101] J. Payá, J. Monzó, M. Borrachero, S. Velázquez, Avaliação do fator de equivalência de cimento para resíduo de catalisador de craqueamento catalítico fluido, *Cem. Concr. Compos.* 39 (2013) 12–17.

[102] J. Payá, J. Monzó, M. Borrachero, S. Velázquez, Avaliação da atividade pozzolânica do resíduo de catalisador de craqueamento catalítico fluido (FC3R). **Estudos de análise** termogravimétrica em pastas de cimento FC3R-Portland, *Cem. Concr. Res.* 33 (4) (2003) 603-609.

[103] J. Payá, JM Monzó, MV Borrachero, S. Velázquez, Taxa de reação pozzolânica de resíduo de catalisador de craqueamento catalítico fluido (FC3R) em pastas de cimento, *Adv. Cem. Res.* 25 (2) (2013) 112–118.

[104] C. Poon, X. Qiao, Z. Lin, propriedades pozzolânicas de cinzas volantes rejeitadas em pastas de cimento misturadas, *Cem. Concr. Res.* 33 (11) (2003) 1857-1865.

[105] CS Poon, SC Kou, L. Lam, ZS Lin, Ativação de sistemas de cinzas volantes/cimento usando sulfato de cálcio anidrita (CaSO₄), *Cem. Concr. Res.* 31 (6) (2001) 873-881.

[106] A. Pourkhorshidi, M. Najimi, T. Parhizkar, F. Jafarpour, B. Hillemeier, Aplicabilidade das especificações padrão de ASTM C618 para avaliação de pozolanas naturais, *Cem. Concr. Compos.* 32 (10) (2010) 794-800.

[107] B. Prasad, H. Eskandari, B. Reddy, Previsão da resistência à compressão de SCC e HPC com alto volume de cinzas volantes usando ANN, *Constr. Construir. Mater.* 23 (1) (2009) 117–128.

[108] R. Rajamma, RJ Ball, LA Tarelho, GC Allen, JA Labrincha, VM Ferreira, Caracterização e uso de cinzas volantes de biomassa em materiais à base de cimento, J. Perigo. *Mater.* 172 (2) (2009) 1049-1060.

[109] C. Rattanashotinunt, P. Thairit, W. Tangchirapat, C. Jaturapitakkul, Uso de resíduos de carboneto de cálcio e misturas de cinzas de bagaço como um novo material cimentício em concreto, *Mater. Projeto* 46 (2013) 106-111.

[110] I. Richardson, A natureza do CSH em cimentos endurecidos, *Cem. Concr. Res.* 29 (8) (1999) 1131-1147.

[111] G. Rodríguez de Sensal, Desenvolvimento de resistência do concreto com casca de arroz cinzas, *Cem. Concr. Composições.* 28(2) (2006) 158-160.

[112] MFA Rojas, MI Sánchez de Rojas, O efeito da alta temperatura de cura na cinética da reação em matrizes de cimento MK/cal e MK-blended a 60 C, *Cem. Concr. Res.* 33 (5) (2003) 643-649.

[113] E. Rubio, V. Rodríguez, S. Alcocer, V. Castaño, Rice husks as source for nanomateriais pozolanas, *Mater. Res. Inovação* 15 (4) (2011) 268-270.

[114] S. Rukzon, P. Chindaprasit, R. Mahachai, Efeito da moagem nas propriedades químicas e físicas de cinzas de casca de arroz, *Int. J. Min. Conheceu. Mater.* 16 (2) (2009) 242-247.

[115] MI Sánchez de Rojas, M. Frías, O. Rodríguez, J. Rivera, Durabilidade de pastas de cimento misturadas contendo resíduos cerâmicos como adição pozzolânica, *J. Am. Ceram. Soc.* 97 (5) (2014) 1543-1551.

[116] M. Sarýdemir, Previsão da resistência à compressão de concretos contendo metacaulim e sílica ativa por redes neurais artificiais, *Adv. Eng. Softw.* 40 (5) (2009) 350-355.

[117] V. Sata, C. Jaturapitakkul, K. Kiattikomol, Influência da pozolana de vários materiais de subprodutos nas propriedades mecânicas do concreto de alta resistência, *Constr. Construir. Mater.* 21 (7) (2007) 1589-1598.

[118] V. Sata, C. Jaturapitakkul, C. Rattanashotinunt, resistência à compressão e evolução de calor de concretos contendo cinzas de combustível de óleo de palma, *J. Mater. Engenheiro civil.* 22 (10) (2010) 1033-1038.

[119] V. Sata, J. Tangpagasit, C. Jaturapitakkul, P. Chindaprasit, Efeito das razões W / B na reação pozzolânica de cinzas de biomassa em matriz de cimento Portland, *Cem. Concr. Compos.* 34 (1), 94-100.

[120] Y. Shao, T. Lefort, S. Moras, D. Rodriguez, Estudos sobre concreto contendo vidro moído, *Cem. Concr. Res.* 30 (1) (2000) 91–100.

[121] C. Shi, RL Day, Aceleração do ganho de resistência de cimentos de cal-pozolana por ativação térmica, *Cem. Concr. Res.* 23 (4) (1993) 824-832.

[122] C. Shi, RL Day, Comparação de diferentes métodos para aumentar a reatividade de pozolanas, *Cem. Concr. Res.* 31 (5) (2001) 813-818.

[123] C. Shi, RL Day, Reação pozzolânica na presença de ativadores químicos: Parte I. Cinética da reação, *Cem. Concr. Res.* 30 (1) (2000) 51–58.

[124] C. Shi, RL Day, Reação pozzolânica na presença de ativadores químicos: Parte II – Produtos e mecanismo de reação, *Cem. Concr. Res.* 30 (4) (2000) 607-613.

[125] H.-S. Cúmplice. Kan, Comportamento de lixiviação de metais pesados da incineração de resíduos sólidos municipais (MSWI) cinzas volantes usadas em concreto, *J. Hazard. Mater.* 164 (2) (2009) 750-754.

[126] R. Siddique, Características de desempenho do concreto de cinzas volantes Classe F de alto volume , *Cem. Concr. Res.* 34 (3) (2004) 487-493.

[127] N. Singh, S. Rai, Efeito do álcool polivinílico na hidratação do cimento com cinzas de casca de arroz, *Cem. Concr. Res.* 31 (2) (2001) 239-243.

[128] T. Sinsiri, W. Kroehong, C. Jaturapitakkul, P. Chindaprasit, Avaliando o efeito de cinzas de biomassa com diferentes finuras na resistência à compressão de pasta de cimento misturado, *Mater. Projeto* 42 (2012) 424-433.

[129] R. Somna, C. Jaturapitakkul, P. Rattanachu, W. Chalee, Efeito da cinza do bagaço moído nas propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto agregado reciclado, *Mater. Projeto* 36 (2012) 597-603.

[130] S. Swaddiwudhipong, H. Wu, M. Zhang, Simulação numérica do aumento de temperatura de concreto de alta resistência incorporando sílica ativa e superplastificante, *Adv. Cem. Res.* 15 (4) (2003) 161-169.

[131] W. Tangchirapat, S. Khamklai, C. Jaturapitakkul, Uso de cinzas de óleo de palma moída para melhorar a resistência, a resistência ao sulfato e a permeabilidade à água do concreto contendo alta quantidade de agregados de concreto reciclados, *Mater. Projeto* 41 (2012) 150–157.

[132] M. Thomas, O efeito de materiais de cimentação suplementares em sílica alcalina reação: uma revisão, *Cem. Concr. Res.* 41 (12) (2011) 1224-1231.

[133] IB Topcu, M. Sarýdemir, Previsão da resistência à compressão de concreto contendo cinzas volantes usando redes neurais artificiais e lógica difusa, *Comp. Mater. Sci.* 41 (3) (2008) 305-311.

[134] C.-J. Tsai, R. Huang, W.-T. Lin, H.-N. Wang, Características mecânicas e cimentícias de escória de alto-forno granulada moída e argamassa misturada de escória de forno de oxigênio básico, *Mater. Projeto* 60 (2014) 267-273.

[135] N. Ukrainczyk, EA Koenders, Kv Breugel, Simulação de hidratação de cimento misturado com pozolana, em: *Anais da Primeira Conferência Internacional sobre Sustentabilidade do Concreto*, 2013, pp. 27–29.

[136] N. Van Tuan, G. Ye, K. Van Breugel, AL Fraaij, DD Bui, O estudo do uso de cinzas de casca de arroz para produzir concreto de alto desempenho, *Constr. construir. mãe.* 25 (4) (2011) 2030-2035.

[137] V.-T.-A. Van, C. Roßler, D.-D. Bui, H.-M. Ludwig, Estrutura mesoporosa e reatividade pozzolânica de cinzas de casca de arroz em sistema cimentício, *Constr. Construir. Mater.* 43 (2013) 208-216.

[138] SV Vassilev, CG Vassileva, Uma nova abordagem para a classificação de cinzas volantes de carvão com base em sua origem, composição, propriedades e comportamento, *Combustível* 86 (10) (2007) 1490–1512.

[139] V. Vasugi, K. Ramamurthy, Identificação de parâmetros de projeto que influenciam a fabricação e propriedades de agregados de cinzas de lagoas a frio, *Mater. Projeto* 54 (2014) 264-278.

[140] AG Vayghan, A. Khaloo, S. Nasiri, F. Rajabipour, Estudos sobre o efeito do tempo de retenção da combustão da casca de arroz nas propriedades químico-físicas das cinzas e desempenho em misturas de cimento, *J. Mater. Engenheiro civil.* 24 (6) (2011) 691-697.

[141] E. Villar-Cociña, EV Morales, SF Santos, H. Savastano Jr, M. Frías, Comportamento pozzolânico de cinzas de folhas de bambu: caracterização e determinação dos parâmetros cinéticos, *Cement Concrete Comp.* 33 (1) (2011) 68–73.

[142] E. Villar-Cociña, E. Valencia-Morales, R. Gonzalez-Rodríguez, J. Hernandez Ruíz, Cinética da reação pozzolânica entre cal e cinzas de palha de cana-de-açúcar por medição de condutividade elétrica: um modelo cinético-difusivo, *Cem . Concr. Coisas.* 33 (4) (2003) 517-524.

[143] S. Wang, L. Baxter, estudo abrangente de cinzas volantes de biomassa em concreto: resistência, microscopia, cinética e durabilidade, *Processo de Combustível. Tecnol.* 88 (11) (2007) 1165-1170.

[144] S. Wang, A. Miller, E. Llamazos, F. Fonseca, L. Baxter, Cinzas volantes de biomassa em concreto: proporção de mistura e propriedades mecânicas, *Combustível* 87 (3) (2008) 365–371.

[145] X.-Y. Wang, H.-S. Lee, K.-B. Park, Simulação de hidratação de cimento misturado com cinzas volantes com baixo teor de cálcio , *ACI Mater. J.* 106 (2) (2009).

[146] X. Wang, H. Lee, S.-W. Shin, J. Golden, Simulação de um aumento de temperatura em concreto incorporando sílica ativa, *Mag. Concreto Res.* 62 (9) (2010) 637-646 .

[147] Y. Wang, Y. Shao, MD Matovic, JK Whalen, Reciclagem de cinzas de combustão switchgrass em cimento: características e atividade pozzolânica com aceleradores químicos, *Constr. Construir. Mater.* 73 (2014) 472-478.

[148] S. Wansom, S. Janjaturaphan, S. Sinthupinyo, Caracterizando atividade pozzolânica de cinzas de casca de arroz por espectroscopia de impedância, *Cem. Concr. Res.* 40 (12) (2010) 1714-1722.

[149] I. Wilińska, B. Pacewska, estudos de análise calorimétrica e térmica sobre a influência do catalisador de aluminossilicato residual na hidratação da pasta de cimento de cinzas volantes, *J. Therm. Anal. Calorim.* 116 (2) (2014) 689-697.

[150] A. Williams, J. Jones, L. Ma, M. Pourkashanian, Poluentes da combustão de combustíveis de biomassa sólida, *Prog. Combustão de Energia.* 38 (2) (2012) 113-137.

[151] W. Xu, TY Lo, SA Memon, Microestrutura e reatividade de cinzas ricas de casca, *Constr. Construir. Mater.* 29 (2012) 541-547.

[152] J. Yajun, J. Cahyadi, Simulação de hidratação de cimento misturado com sílica ativa, *Mater. Estrutura.* 37 (6) (2004) 397-404.

[153] MO Yusuf, MA Megat Johari, ZA Ahmad, M. Maslehuiddin, Força e microestrutura de ligante combinado binário ativado por álcali contendo óleo de palma

- cinzas combustíveis e escórias moidas de alto forno, *Constr. Construir. Mater.* 52 (2014) 504-510 .
- [154] M. Zain, M. Islam, F. Mahmud, M. Jamil, Produção de cinza de casca de arroz para uso em concreto como material cimentício suplementar, *Constr. Construir. Mater.* 25 (2) (2011) 798-805.
- [155] G. Zhang, B. Eddy Patuwo, Y. Hu, Previsão com redes neurais artificiais: o estado da arte, *Inter. J. Previsão* 14 (1) (1998) 35–62.
- [156] YM Zhang, W. Sun, HD Yan, Hidratação de pastas de cimento de cinzas volantes de alto volume , *Cem. Concr. Compos.* 22 (6) (2000) 445-452.
- [157] S. Zhou, XA Zhang, X. Chen, atividade pozolânica de cinzas de biomassa de confinamento (esterco de gado), *Constr. Construir. Mater.* 28 (1) (2012) 493-498.
- [158] E. Zornoza, P. Garcés, J. Monzó, M. Borrachero, J. Payá, Compatibilidade de residuo de catalisador de craqueamento catalítico fluido (FC3R) com vários tipos de cimento, *Adv. Cem. Nada.* 19 (3) (2007) 117–124.