

Aplicação de resíduos na fabricação de concreto: como técnicas analíticas de caracterização podem auxiliar na escolha preliminar do material mais adequado?

Application of waste in concrete manufacturing: how analytical characterization techniques can support the preliminary choice of the most suitable material?

Lucimara Bragagnolo ¹, Eduardo Pavan Korf ¹

¹ Programa de Pós Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental – Universidade Federal da Fronteira Sul – Rodovia ERS 135, km 72, nº 200 – CEP: 99700970 – CP: 764, Erechim, RS, Brasil.
e-mail: lucimarabragagnolo@hotmail.com, eduardo.korf@uffs.edu.br

RESUMO

A preocupação frente aos impactos negativos resultantes da obtenção e produção de agregados naturais e do cimento na produção do concreto, bem como a possibilidade de escassez desses, acabaram alavancando a busca por materiais alternativos. Dentre esses materiais, diversos estudos já avaliaram a aplicação de subprodutos de diferentes setores industriais para a fabricação do concreto. Contudo, considerando a gama de resíduos existentes, sem ainda possuir algum valor agregado, torna-se interessante avaliá-los para essa finalidade. Para tanto, a avaliação do potencial desses materiais exige a aplicação de diferentes técnicas para análise de diversas propriedades que são desejáveis ou requeridas. Nesse sentido, essa revisão bibliográfica buscou reunir as principais técnicas e metodologias que são aplicadas para a identificação das principais características que possibilitem sua aplicação como substitutos parciais de agregados ou cimento, em misturas para a fabricação do concreto.

Palavras-chave: Agregados naturais, Cimento, Metodologias, Resíduos.

ABSTRACT

The concern about negative impacts resulting from the production of natural aggregates and cement in the production of concrete, as well as the possibility of shortage of these materials, motivates for the search for alternative materials. Among these materials, several studies have evaluated the application of by-products from different industrial sectors for concrete manufacture. However, considering the variety of existing waste, without still having some high added value, it is interesting to evaluate them. Therefore, the evaluation of the potential of these materials requires the application of different techniques for the analysis of several properties that are desirable or required. In this sense, this bibliographic review aimed to discuss about main techniques and methodologies that are applied to the identification of the main characteristics that allow its application as partial replacements of aggregates or cement, in mixtures for concrete manufacture.

Keywords: Natural aggregates, Cement, Methodologies, Waste.

1. INTRODUÇÃO

A produção de concreto não é um processo ecologicamente amigável, uma vez que a fabricação e obtenção de seus materiais constituintes exercem impactos negativos sobre o meio ambiente [1], especialmente quando se trata das atividades de mineração realizadas para a extração desses produtos, que podem resultar em danos à paisagem, interrupção do ecossistema, contaminação da água, solo e ar [2]. Também, os processos de produção do próprio cimento despendem uma quantidade muito grande de energia, além de promover a emissão

de gases de efeito estufa [3].

Diante desse cenário, tem-se buscado materiais alternativos que sejam capazes de substituir parcela dos materiais comumente utilizados na fabricação do concreto, além de serem capazes de reproduzir as características exigidas conforme as normas técnicas vigentes. Dentre esses materiais alternativos, destacam-se os subprodutos originários de diferentes setores produtivos, como resíduos industriais, da construção civil e da atividade agrícola. Diferentes estudos já avaliaram a aplicação desses resíduos como substituintes, tanto dos agregados miúdos e graúdos quanto de parcela do cimento. Como exemplo, podem-se citar resíduos de areia de fundição [4–8], resíduos de vidro e pó de vidro [9–12], resíduos da própria construção civil [13–16], resíduos cerâmicos [1, 17–19] e, também, resíduos agroindustriais [3, 20–24], dentre inúmeros outros.

Embora já se venha agregando valor a alguns resíduos através da reciclagem pela construção civil, como anteriormente apresentado, ainda existe uma variedade de subprodutos que podem ser avaliados e aproveitados para essa finalidade. Para tanto, torna-se necessária a realização de alguns testes e técnicas preliminares para que se possa verificar se o material em estudo apresenta características desejáveis, e que essas sejam condizentes com as propriedades dos materiais naturais comumente utilizados na produção do concreto, de forma a se obter um produto final com qualidade. Segundo RAMACHANDRAN e BEAUDOIN [25], uma diversidade de técnicas físicas, químicas e mecânicas pode ser aplicada na pesquisa e caracterização de materiais que compõem a estrutura final do concreto (agregados e cimento). Tais técnicas fornecem informações importantes, que incluem desde a caracterização de matérias-primas, controle de qualidade, estimativa quantitativa de produtos até previsão do desempenho [25].

Diante do exposto, considerando que há uma escassez de trabalhos que reúnem e apresentam uma discussão acerca de como técnicas e metodologias de análise podem auxiliar na escolha preliminar de materiais, essa revisão objetivou apresentar e discutir diferentes técnicas que podem ser utilizadas para a identificação de possíveis resíduos para serem aplicados como substitutos parciais de cimento ou de agregados miúdos ou graúdos na produção do concreto. Além disso, buscou-se apresentar as principais características que devem ser consideradas no momento da avaliação do potencial de aplicação dos materiais em estudo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Este estudo constitui-se por uma revisão bibliográfica referente à utilização de técnicas analíticas de caracterização de materiais para auxiliar na escolha preliminar de possíveis resíduos a serem aplicados nas misturas para produção de concreto. O levantamento literário foi realizado mediante pesquisas nos bancos de dados Scielo, ScienceDirect, Scopus e Web of Science. Foram selecionados os estudos que aplicaram e avaliaram diferentes tipos de resíduos como substitutos tanto de agregados, quanto do cimento e que utilizaram técnicas analíticas para caracterizá-los. A partir disso, as principais técnicas foram compiladas e apresentadas no presente artigo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Características desejáveis e técnicas analíticas

Nas subseções a seguir, são apresentadas algumas das principais técnicas analíticas ou metodologias certificadas por normas técnicas que podem ser utilizadas para a identificação das características desejáveis no momento da definição do potencial de utilização de resíduos como substitutos do cimento ou de agregados.

3.1.1 Substituição ou adição ao cimento

Uma das principais características a serem consideradas no momento da avaliação do potencial de aplicação de um resíduo para a adição ou substituição de parcela de cimento para a produção de concreto refere-se à sua capacidade de promover reações pozolânicas. Materiais com propriedades pozolânicas apresentam significativo percentual de sílica e alumínio amorfos em sua composição, esses reagem com o hidróxido de cálcio na presença de água, de forma a produzir hidratos de silicato de cálcio (CSH) e hidratos de silicato de alumínio e cálcio (CASH). Essa reatividade possibilita que materiais cimentícios tenham uma boa performance [1, 18]. Além da presença de sílica e alumina, as propriedades pozolânicas também estão relacionadas com a área superficial específica do material, tamanho de partícula, grau de desidroxilação e qualidade das matérias-primas [26]. Também, a maior reatividade dá-se pela presença de quantidades consideráveis de minerais amorfos, enquanto que, materiais com alto teor de minerais cristalinos apresentam baixa reatividade pozolânica [27].

A determinação da atividade pozolônica de materiais pode ser realizada por diferentes métodos, seja a partir de análise química, físico-química, mineralógica ou de propriedades mecânicas, a partir de testes com corpos de prova, em que há a substituição de parcelas do composto em estudo pelo cimento. As análises químicas normalmente são baseadas na avaliação da reação de pozolanas com hidróxido de cálcio ou resultante da hidratação do cimento, como é o caso do método Chappelle [18, 28, 29], método Frattini [30–32], entre outros [22]. Métodos físico-químicos e mineralógicos também podem ser utilizados, e abrangem a difratometria de raios X (DRX) [33], que possibilita a identificação de fases cristalinas das amostras; termogravimetria e análise térmica diferencial (TG/DSC) [26, 33], microscopia eletrônica de varredura (MEV) [33], permitindo uma avaliação morfológica das amostras submetidas às reações de verificação de pozolanidade; medição de condutividade associado aos testes de reação de pozolanas [31, 32] e determinação da área superficial específica, que permite inferir a intensidade de ocorrência das reações. Maiores áreas específicas proporcionam reações mais eficazes. Como método mecânico, pode-se citar o índice de resistência à compressão (IRC) [31–33].

De acordo com NAVRÁTILOVÁ e ROVNANÍKOVÁ [18], que levantaram o estado da arte acerca das propriedades pozolônicas de pós de tijolos, verificou-se que a atividade pozolônica desse tipo de material depende, principalmente, dos seus constituintes em fase amorfa, da distribuição do tamanho de partícula e da área superficial específica. A reação do pó de tijolos com hidróxido de cálcio ocorre em áreas maiores à medida que a superfície específica aumenta. A maioria das partículas mais finas reage, enquanto que, no caso de partículas maiores, a reação é desacelerada gradualmente, em que a parte interna do grão acaba não reagindo. As fases amorfas podem ser inferidas a partir de técnicas de caracterização química e mineralógica, como é o caso da fluorescência de raios X (FRX), que identifica fases de óxidos dos elementos que constituem as amostras, associada à técnica de difratometria de raios X (DRX), que identifica as fases cristalinas do material [17]. A distribuição do tamanho das partículas pode ser dada a partir da análise granulométrica via peneiramento e sedimentação [34], ou via granulometria a laser, que é capaz de fornecer resultados mais confiáveis para partículas mais finas.

EL-DIEB e KANAAN [17], por sua vez, analisaram as principais características e propriedades de pó de resíduos de cerâmica de forma a avaliar a possibilidade de utilizá-lo como substituinte parcial ao cimento para a fabricação de concreto. Para tanto, os autores realizaram ensaios para obtenção da área superficial específica, distribuição do tamanho de partículas, teor de umidade, morfologia e principais óxidos. Foram utilizadas as técnicas de difração de raios X e fluorescência de raios X para avaliação mineralógica e química do material, enquanto que utilizou-se a microscopia eletrônica de varredura (MEV) com espectroscopia e energia dispersiva (EDS) para avaliação morfológica e elementos químicos constituintes. O potencial de atividade pozolônica do pó foi avaliado por meio do índice de atividade de força (Strength Activity Index – SAI), conforme a norma ASTM C311 [35]. A partir das análises preliminares realizadas pelos autores, os resultados mostraram que o material é rico em sílica e alumina, com algumas fases amorfas. O teste de pozolanidade confirmou que o pó de cerâmica é pozolânico até certo ponto. A partir disso, foi possível concluir que o material possui potencial de ser um material alternativo em misturas de concreto para substituir o cimento.

Outro exemplo inclui a utilização de FRX para identificação da composição química para avaliar a capacidade pozolônica de ostras queimadas para serem aplicadas como substituintes parciais do cimento na produção do concreto. O percentual relativamente alto de sílica presente nesses compostos é indicativo de seu potencial pozolânico [36].

3.1.2 Agregados miúdos e graúdos

O elevado consumo de agregados e decorrente aumento da escassez vem resultando em uma busca por materiais alternativos, que sejam capazes de atender a grande demanda da construção civil [12, 37]. Para tanto, uma avaliação preliminar do potencial de aplicabilidade de agregados alternativos, como é o caso de alguns resíduos, torna-se necessária.

Diante disso, para a seleção de materiais que possuem potencial para servirem como substitutos aos agregados, devem-se observar, essencialmente, sua distribuição granulométrica e outros índices físicos, como gravidade específica, módulo de finura, densidade em massa, absorção de água, umidade, conteúdo de silte, flacidez, índice de alongamento e distribuição granulométrica. Por exemplo, densidades muito baixas, quando comparadas com a de agregados naturais (1428-1744 kg/m³) indicam que os resíduos possuem muitos vazios, podendo afetar, assim, na trabalhabilidade, resistência e durabilidade do concreto. Já valores de absorção de água baixos indicam uma boa propriedade de resistência à água [23].

Além de índices físicos, a avaliação química de resíduos para avaliação de possíveis aplicações como substitutos do agregado natural pode ser útil para prever se o material também poderá servir como auxiliar nos processos de hidratação a partir da presença de propriedades pozolânicas [23], que são detectadas com o auxílio de algumas das técnicas e metodologias, como o método de Chappelle, Frattini, DRX, TG/DSC e MEV, descritas na seção anterior (2.1)..

A aplicação de determinados testes químicos é interessante uma vez que eles permitem avaliar o potencial de reatividade álcali-sílica dos agregados. Um aumento de substâncias alcalinas no concreto poroso, ao longo do tempo, deve ser levado em consideração, principalmente em estruturas que possuam uma expectativa de vida elevada. Agregados que contêm elevado percentual de álcalis ou sílica amorfa podem conferir à eles características reativas para com os demais componentes da mistura, podendo resultar na expansão e fissuração do concreto [25]. Além de testes químicos, pode-se citar a difratometria de raios X, que pode ainda ser aplicável para a identificação de minerais potencialmente reativos à sílica-alcális, como opala, calcedônia, cristobalita, tridimita, alguns tipos de vidros naturais e artificiais e quartzo [38], quando esses não são facilmente identificáveis sob a utilização de um microscópio petrográfico [25]. Outras técnicas incluem: espectrometria de infravermelho e calorimetria diferencial de varredura (DSC).

Outros aspectos que devem ser avaliados para verificar o potencial de aplicabilidade de resíduos como agregados referem-se à mineralogia e morfologia de suas partículas. Isso porque essas propriedades são consideradas fatores críticos que irão influenciar nas características finais do concreto [39]. Por exemplo, AN *et al.* [39] avaliaram o efeito da mineralogia dos agregados sobre as propriedades do concreto. Dentre outras técnicas utilizadas, os autores utilizaram microscopia eletrônica de varredura (MEV) para avaliação morfológica, e energia dispersiva de raios-X (EDS) para a identificação da composição química dos agregados avaliados no estudo. BAHORIA *et al.* [40] utilizaram a técnica de difração de raios X para avaliar a mineralogia de diferentes materiais para serem usados como substitutos do agregado miúdo no concreto. De acordo com os autores, a técnica de DRX pode ser utilizada para a identificação de compostos e minerais presentes em amostras de pó, além de permitir a identificação da presença ou não de argila. De modo alternativo, a microscopia eletrônica de varredura (MEV) acoplada à espectroscopia de energia dispersiva (EDS) permite a identificação de alta resolução de elementos e compostos presentes em seções transversais de amostras.

De acordo com KAYYALI [41], avaliar a distribuição do tamanho dos poros de possíveis agregados para a produção do concreto permite dar uma indicação de que o material que garantirá as melhores propriedades finais, dependendo das proporções utilizadas. O autor prevê, também, que a inclusão de agregados que possuem uma proporção significativa de poros cujo diâmetro é maior que 100 μm poderá resultar em um concreto mais fraco e menos durável. Além disso, as características de distribuição do tamanho dos poros podem ter um efeito significativo na permeabilidade do concreto frente à percolação de água, íons agressivos e gases. Diferentes técnicas podem ser utilizadas para a análise dessa propriedade, conforme demonstrado na Figura 1.

De modo geral, os agregados devem estar em conformidade com certos padrões ótimos para o uso em engenharia: eles devem ser limpos, duros, fortes, duráveis, livres de substâncias químicas absorvidas, revestimentos de argila ou de outros materiais finos, que poderiam afetar a hidratação e a aderência da pasta cimentante. Agregados contendo certa quantidade de xisto ou outras rochas, materiais moles e porosos devem ser evitados [43].

Por fim, considerando as características importantes de serem avaliadas quando se objetiva a utilização de resíduos como substitutos de materiais que compõem o concreto, apresenta-se, no Quadro 1, um resumo de algumas das técnicas e metodologias utilizadas para avaliação e análise de tais características, que podem servir como apoio para a tomada de decisão de qual material possui potencial de ser substituinte de agregados naturais.

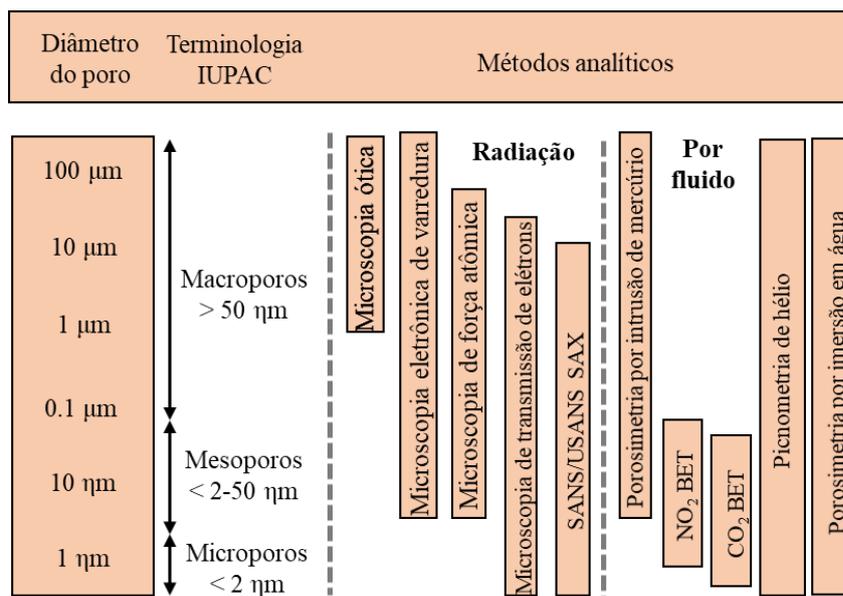


Figura 1: Métodos utilizados para a determinação da porosidade e distribuição do tamanho dos poros. Adaptado de: ANOVITZ e COLE [42]. Legenda: IUPAC – *International Union of Pure and Applied Chemistry*; SANS SAX – *Small-angle neutron scattering* (Espalhamento raios-X a baixo ângulo); USANS SAX – *Ultra-small-angle neutron scattering* (Espalhamento raios-X a ultra-baixo ângulo); BET – Método Brunauer-Emmett-Teller.

Quadro 1: Principais técnicas e metodologias utilizadas para avaliação de algumas das propriedades dos agregados.

| PROPRIEDADE | TÉCNICA | REFERÊNCIAS |
|---|--|--------------|
| Potencial de reatividade álcali-sílica | Testes químicos | [44] |
| | Análise DRX | [45, 46] |
| | Espectrometria de infravermelho (Contudo DRX possui melhores resultados) | [45, 47, 48] |
| | DSC (Calorimetria diferencial de varredura) | [45] |
| Composição Química e Mineralógica | FRX | [11] |
| | DRX | [40, 49] |
| | MEV/EDS | [39, 49] |
| Porosidade e absorção de água dos agregados | Medida indireta a partir da absorção de água – não fornece informações sobre a distribuição de tamanho dos poros | [50, 51] |
| | Porosimetria por intrusão de mercúrio | [41, 52] |
| | Imagem retrofundida em MEV | [52, 53] |
| | Microscopia óptica de seções finas combinadas com análise de imagem | [52, 54] |
| Forma e textura superficial dos agregados | MEV | [46, 49] |
| Outras propriedades físicas (granulometria, umidade, densidade aparente, densidade) | Ensaio físicos | [55–58] |

Legenda: DRX: Difratomia de raios-X; DSC: Calorimetria diferencial de varredura; FRX: Fluorescência de raios-X; MEV: Microscopia eletrônica de varredura; EDS: espectroscopia de energia dispersiva.

3.2 Resíduos na produção do concreto

Diferentes estudos avaliaram a aplicação de diversos resíduos como substitutos parciais do cimento ou de agregados miúdos e graúdos para a fabricação do concreto. Exemplos incluem resíduos agroindustriais, de vidro, fundição, de concreto reciclado, dentre outros. Nesse sentido, a seguir são apresentados alguns exemplos de resultados que possibilitaram a identificação e confirmação do potencial de diferentes tipos de resíduos na produção desse tipo de estrutura, a partir de algumas das técnicas analíticas e metodologias de caracterização, que incluem testes químicos, análises físicas, químicas, mineralógicas e morfológicas.

A Figura 2 apresenta as características granulométricas de diferentes resíduos que apresentaram potencial de serem utilizados na fabricação de concreto em comparação com os limites superiores e inferiores para substituição parcial de agregados, conforme a norma ASTM C33/C33M [59].

Segundo EZIEFULA *et al.* [20], no caso de conchas de ostras, tamanhos mais finos de partículas tendem a apresentar uma maior absorção de água, maior gravidade específica, maior densidade de partículas e menor módulo de finura do que partículas mais grosseiras. Quando comparadas com agregados naturais, a maioria das conchas possuem densidades específicas ligeiramente menores ou similares. Normalmente, elas ainda apresentam maior absorção de água do que os agregados normais, em decorrência de sua natureza porosa e de sua forma irregular. Os autores também indicam que esse tipo de material pode ser substituído em até 20% do agregado fino na produção do concreto, de forma a se obter densidades e resistências adequadas. Contudo, determinadas características desse tipo de sedimento marinho, como a presença de sais e impurezas orgânicas, restringem sua aplicação em concreto de desempenho, como no caso de concreto protendido ou concretos que são expostos a ambientes agressivos. Tais impurezas resultam em uma redução na trabalhabilidade e em menores resistências. Por conta disso, qualquer aplicação futura de sedimentos marinhos em concreto de alto desempenho provavelmente exigirá a adição de aditivos redutores de água ou superplastificantes, bem como demandará de uma limpeza e tratamento adequados desses materiais [20]. A presença desses compostos e impurezas pode ser realizada a partir de métodos de identificação de compostos químicos, como FRX, por exemplo.

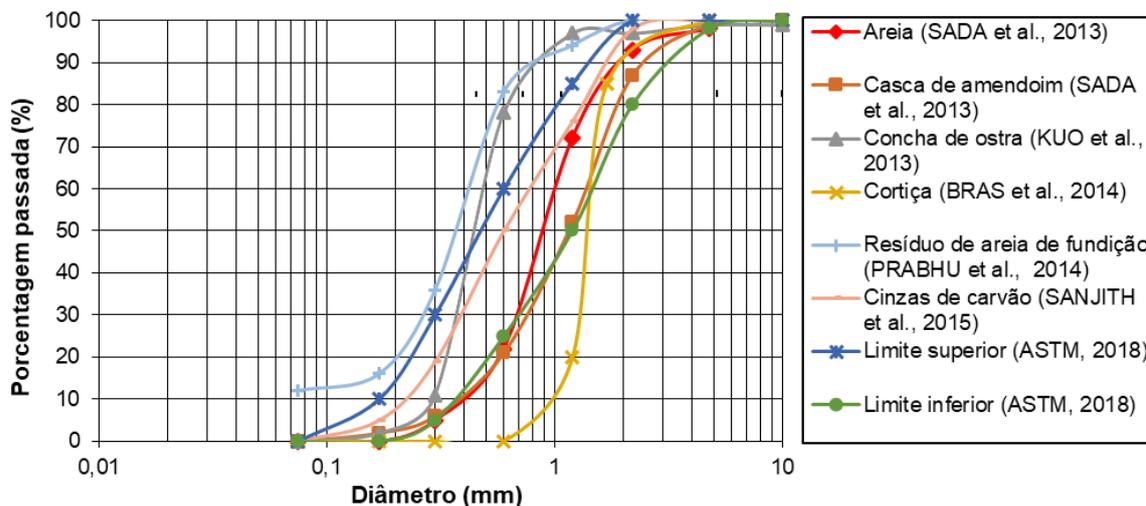


Figura 2: Granulometria de alguns dos resíduos utilizados na fabricação do concreto. Fonte: Adaptado de BHARDWAJ e KUMAR [5] e PRUSTY *et al.* [23].

Em se tratando de cinzas de carvão, SINGH *et al.* [60] relatam que o desempenho global do concreto final depende indiretamente da distribuição do tamanho de partículas desse resíduo. Devido as semelhanças nos tamanhos de partículas com agregados naturais, cinzas de carvão foram substituídas com sucesso por agregados miúdos na fabricação de concreto nos últimos anos. De acordo com os autores, normalmente o tamanho das partículas de cinzas assemelha-se ao tamanho dos agregados miúdos com baixa porcentagem de silte-argila, apresentando maior percentual de areia fina e menor porcentagem de areia média a grossa, em comparação aos agregados miúdos.

De modo geral, embora alguns materiais possam não apresentar distribuições granulométricas dentro dos

limites de normas técnicas, como a areia de fundição, considerada muito fina, recomenda-se que sejam avaliadas misturas desses resíduos com os agregados naturais, de forma a se obter uma proporção de substituição adequada, que resulte em uma curva granulométrica que enquadre-se nas regulamentações [5].

Com relação à distribuição granulométrica, MENG *et al.* [61] concluem que as propriedades finais do concreto, como a resistência à compressão, podem ser aprimoradas com a utilização de resíduos que possuem uma quantidade razoável de partículas finas, como é o caso de resíduos cerâmicos, de concreto, vidro de soda-cal (< 0,6 mm), bem como resíduos de sedimentos marinhos, quando substituídos ao agregado natural.

Assim como a avaliação da distribuição das partículas dos materiais avaliados, outras características físicas também necessitam ser analisadas. As principais propriedades físicas (gravidade específica, módulo de finura, densidade aparente e absorção de água) de diferentes resíduos aplicados como substituintes parciais de agregados miúdos ou graúdos estão apresentadas na Tabela 1.

A partir das informações apresentadas na Tabela 1, pode-se verificar que os resíduos avaliados em diferentes estudos apresentam propriedades físicas que se assemelham aos valores típicos de agregados naturais comumente utilizados. A partir disso, nota-se a importância da comparação de valores com as normas técnicas vigentes, de forma a possibilitar uma avaliação mais acurada da potencialidade de uso de diferentes resíduos para essa finalidade.

A Tabela 2 apresenta alguns exemplos de propriedades físicas de alguns resíduos que foram utilizados como substitutos parciais do cimento. Assim como no caso dos resíduos aplicados como agregados, esses materiais apresentam características semelhantes ao cimento Portland.

A composição química de diferentes tipos de resíduos utilizados tanto como agregados miúdos e graúdos está apresentada na Tabela 3. É possível verificar a presença majoritária de óxido de silício (SiO_2), óxido de cálcio (CaO), óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3).

Tabela 1: Propriedades físicas de alguns resíduos utilizados como substituintes parciais de agregados para a fabricação de concreto.

| | AGROINDUSTRIAIS | | VIDRO | RESÍDUOS DE FUNDIÇÃO | RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL | VALORES TÍPICOS |
|--|-----------------|-----------|-------|----------------------|------------------------------|------------------------------|
| PROPRIEDADES FÍSICAS | [23] | [3] | [62] | [5] | [16] | ACI Committe |
| Gravidade específica | 1,25-2,54 | 1,97-2,97 | 2,6 | 1,97-2,79 | 2,48 | 2,30-2,90 |
| Módulo de finura | 1,42-2,8 | - | - | 1,32-2,32 | 3,38 | 2,0-3,3 |
| Densidade aparente (kg/m^3) | 112,4-2040 | - | - | 1538-1784 | 1409 | 1280-1920 |
| Absorção de água (%) | 0,1-7,66 | - | 0,3 | 0,42-5 | 4,46 | 0,5-4 |
| Umidade (%) | - | - | - | 0,11-3,25 | - | 0-2 (graúdo) 0-10 (miúdo) |

Tabela 2: Propriedades físicas de alguns resíduos utilizados como substituintes parciais do cimento para a fabricação de concreto.

| | AREIA DE FUNDIÇÃO | ESCÓRIA DE ALTO FORNO | CIMENTO PORTLAND |
|--|-------------------|-----------------------|------------------|
| PROPRIEDADES FÍSICAS | [8] | [63] | [8] |
| Gravidade específica | 2.33 ± 0.01 | 2.91 | 3.15 ± 0.01 |
| Finura (retido em peneira de 90 μm) | 39.66 ± 1.51 | - | 0.22 ± 0.02 |
| Umidade | 0.15 ± 0.07 | - | 0.18 ± 0.05 |
| Área superficial específica (cm^2/g) | 4055 ± 314 | 4050 | 3315 ± 132 |
| Tamanho médio de partícula | 23.56 ± 0.88 | - | 13.47 ± 0.44 |

Tabela 3: Composição química de alguns resíduos utilizados como substituintes parciais de agregados para a fabricação de concreto.

| | AGROINDUSTRIAIS | | VIDRO | RESÍDUOS DE FUNDIÇÃO | RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL |
|--------------------------------|-----------------|----------|-------|----------------------|------------------------------|
| COMPOSIÇÃO QUÍMICA | [23] | [3] | [10] | [5] | [14] |
| SiO ₂ | 2-90,0 | 4,9-87,9 | 68,36 | 76,0-87,91 | 63,61-65,37 |
| CaO | 0,49-77,81 | 0-54,8 | 10,93 | 0,14-3,56 | 11,19-16,86 |
| Al ₂ O ₃ | 0,14-4,28 | 0,1-23,1 | 1,67 | 0,021-10,41 | 5,57-5,49 |
| Fe ₂ O ₃ | 0,2-6,98 | 0,1-6,1 | 0,64 | 0,94-5,39 | 0,05-0,06 |
| Na ₂ O | 0,07-0,58 | 0,1-0,5 | 11,52 | 0,19-0,87 | 0,87-1,19 |
| MgO | 0,07-5,8 | 0,6-7,4 | 0,7 | 0,18-1,98 | 1,91-2,84 |
| K ₂ O | 0,06-3,53 | 0,3-38 | 0,41 | 0,25-1,20 | 0,51-0,62 |
| Perda ao fogo | 1,86-44,16 | 1,1-29,0 | 5,42 | 2,19-6,93 | 7,56-9,19 |

Diferentes estudos já avaliaram a aplicação de resíduos agroindustriais tanto para a substituição parcial do cimento, como para substituição parcial de agregados miúdos (Tabela 3) sendo, alguns deles: cinzas de folhas de bambu, cinzas de palha de trigo, cinzas de palha de cevada, cinzas de espiga de milho, cinzas de resíduos de azeitona, cinzas de folhas de bananeira, cinzas de capim-elefante, cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, casca de ostra, pó de serra, cinzas de casca de arroz e resíduos de tabaco. De modo geral, tais materiais passam por um tratamento térmico, onde são queimados ou calcinados a elevadas temperaturas, de modo que sua parcela biodegradável é consumida durante esse processo. Também, levando em consideração que os resíduos agroindustriais apresentam uma alta variabilidade na sua composição em decorrência do tipo de material, bem como de sua origem – um mesmo tipo de resíduo pode ter características diferentes por conta da forma em que é cultivado, local de cultivo, clima regional, etc –, é imprescindível que os estudos de aplicação desses produtos para a produção de materiais cimentícios sejam realizados em caráter individual e local.

Segundo PRUSTY *et al.* [23], alguns dos resíduos agroindustriais avaliados apresentaram composições superiores a 70% na soma dos percentuais de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃, indicando que eles também podem servir como pozolanas naturais, de acordo com a ASTM C618 [64]. Dessa forma, além de serem adequados para serem utilizados como substituintes de agregados miúdos, tais resíduos poderiam ainda favorecer o processo de hidratação do concreto. Nesse contexto, outros materiais apresentados na Tabela 3 também podem apresentar propriedades de pozolanicidade. Com relação aos valores de perda ao fogo, a norma ASTM C618 [64] e a norma brasileira NBR 12653 [65], limitam o conteúdo de perda ao fogo em 6%.

Exemplos de composição química obtida por análise FRX de resíduos que foram utilizados como substituintes parciais do cimento para a produção de concreto estão apresentados na Tabela 4. Embora ocorram variações das composições de diferentes resíduos, a maior concentração refere-se ao SiO₂, seguida pelas concentrações de CaO ou Al₂O₃, dependendo do tipo de material.

Como exemplo, ISLAM *et al.* [11] verificaram que amostras de pó de vidro atendem o requisito mínimo para uma pozolana padrão (SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ > 70%). Além disso, atendem os limites máximos de SO₃, perda ao fogo e teor de umidade de, 4%, 10% e 3%, respectivamente. Diante disso, os autores colocam que é esperado que tais amostras apresentem comportamento pozolânico no sistema cimentício. Após ensaios com diferentes percentuais de substituição, verificou-se uma concentração ótima de 20%, em que se observou uma resistência a compressão ligeiramente maior que a amostra de controle (2%). Além disso, os autores também concluem que a elevada área superficial dos resíduos de vidro moídos altera a cinética da reação química em direção à reação pozolânica considerada benéfica, possibilitando a utilização de álcalis disponíveis antes da produção de um potencial gel oriundo da reação álcalis-sílicas, considerado prejudicial.

Tabela 4: Composição química de alguns resíduos utilizados como substituintes parciais do cimento.

| | TBM | PV | EAF | RTV | PC | PT | PVT | CP |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|--------------|
| COMPOSIÇÃO QUÍMICA | [66] | [9] | [27] | | [17] | [18] | [11] | [9, 17, 66] |
| Al ₂ O ₃ | 17.29 | 1.81 | 11.58 | 9.27 | 17 | 15.61 | 0.9 | 5.29 ± 0.70 |
| CaO | 0.51 | 18.55 | 36.22 | 2.89 | 1.7 | 13.79 | 14.5 | 63.34 ± 3.3 |
| Fe ₂ O ₃ | 6.4 | 1.97 | 0.16 | 3.9 | 0.8 | 3.52 | 0.6 | 3.50 ± 0.43 |
| FeO | - | - | - | 0.1 | - | - | - | - |
| K ₂ O | - | - | 0.95 | 2.26 | - | 2.81 | 0.8 | - |
| KO ₂ | - | 0.44 | - | - | - | - | - | - |
| LOI | 0.17 | - | - | 0.91 | 1.78 | - | - | - |
| MgO | 1.14 | 3.12 | 8.61 | 1.36 | 2.5 | 2.07 | 1.8 | 2.43 ± 1.67 |
| MnO | - | - | 0.5 | 0.06 | - | 0.03 | - | - |
| Na ₂ O | 1.72 | 9.16 | 0.68 | 0.8 | 0 | 0.38 | 12.2 | 0.49 ± 0.45 |
| P ₂ O ₃ | - | - | 0.01 | 0.1 | - | - | - | - |
| P ₂ O ₅ | - | 0 | - | - | - | 0.15 | - | - |
| SiO ₂ | 69.43 | 64.94 | 37.49 | 77.43 | 68.6 | 58.5 | 68.1 | 19.66 ± 1.24 |
| SO ₃ | 2.54 | 0 | 2 | 0.11 | 0.12 | 2.04 | 0.4 | 3.4 ± 0.95 |
| TiO ₂ | - | - | 1.8 | 0.62 | - | 0.46 | - | - |

Legenda: TBM – Tijolo de barro moído; PV – Pó de vidro; EAF – Escória de alto forno; RTV – Resíduos de tijolos vermelhos; PC – Pós cerâmicos; PT – Pós e tijolos; PVT – Pó de vidro transparente; CP – Cimento Portland.

Outro estudo indicou o potencial da aplicação de resíduos de areia de fundição como substituto do cimento, além da substituição de agregados, como anteriormente apresentado, visto que o teor total de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ atingiu 93,95% [8]. A avaliação com diferentes teores do resíduo demonstrou boa resistência ao ataque de sulfatos e ácido sulfúrico, uma vez que as amostras que sofreram maior ataque foram as que não possuíam substituição pela areia de fundição.

Quanto à avaliação morfológica, a Figura 3 apresenta um exemplo de utilização de MEV para avaliação da morfologia das partículas de pó de vidro, que, no referido estudo, foi testado tanto para a substituição do cimento, quanto do agregado miúdo. Além disso, os resíduos mais grosseiros (Figura 3a) foram avaliados para a substituição do agregado graúdo.

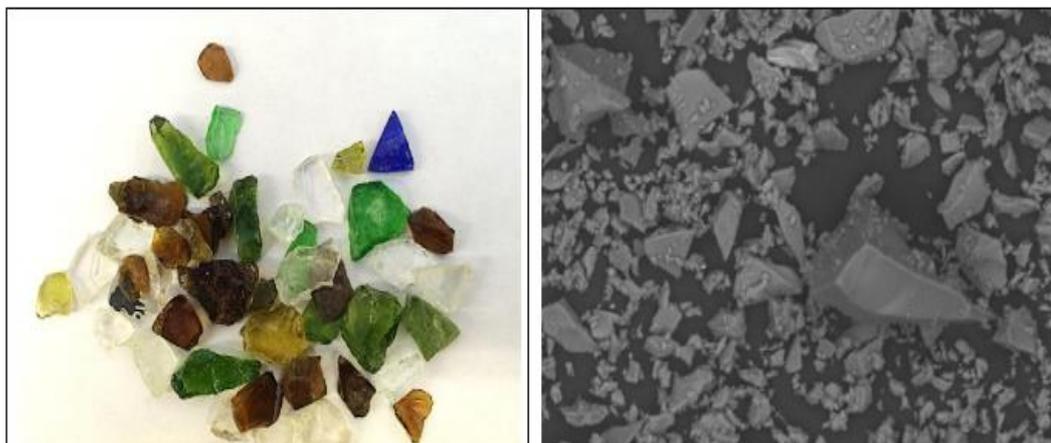


Figura 3: Resíduos utilizados como substituintes de materiais que constituem o concreto (a) Resíduos grosseiros de vidro e (b) Imagem MEV do pó de vidro. Fonte: AFSHINNIA e RANGARAJU [62].

Os autores discutem que as questões relacionadas à geometria não exercem influências muito expressivas sobre a trabalhabilidade da mistura de concreto no caso das partículas do pó de vidro quando substituintes do cimento (Figura 3b). Fato contrário foi observado quando os resíduos grosseiros de vidro foram aplicados como agregados graúdos. Por sua vez, quando o pó de vidro foi utilizado como materiais de substituição de agregados, o conteúdo dos materiais em pó (isto é, cimento e pó de vidro) aumentou; portanto, devido à maior área de superfície, uma maior demanda de água foi observada [62].

SALES e LIMA [24] também utilizaram imagens de microscopia eletrônica de varredura para realizar a ca-

racterização de cinzas de bagaço de cana, avaliadas para servirem como substituintes do agregado fino na produção do concreto. A análise MEV (Figura 4) revelou que as amostras desse material são compostas, basicamente, por grãos de formatos e tamanhos variados de até 150 μm . As partículas de cinzas têm um aspecto lamelar de camadas sobrepostas com pequenas partículas aderindo à superfície. Fragmentos de bagaço não queimado também eram visíveis nas imagens, indicando a presença de material orgânico e resultando em valores de perda ao fogo elevados, o que acaba sendo prejudicial à estrutura final.

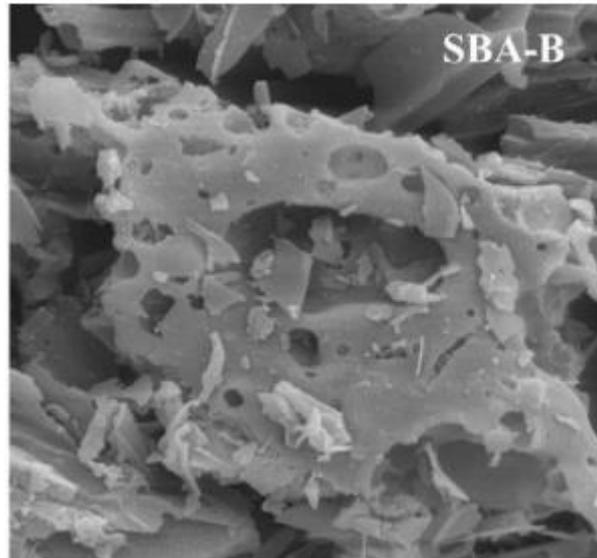


Figura 4: Imagem MEV de amostra de cinzas de bagaço de cana, avaliadas para servirem de substituinte aos agregados miúdos. Fragmentos de bagaço não queimado podem ser visualizados. Fonte: SALES e LIMA [24].

A Figura 5 apresenta uma micrografia eletrônica de varredura das partículas de cinzas de resíduos de oliva. A maioria das partículas desse material são irregulares, com algumas delas arredondadas [67]. Por conta dessas irregularidades, alguns autores reportaram a redução da trabalhabilidade da mistura quando esse tipo de resíduo foi utilizado para a produção de concreto [68].

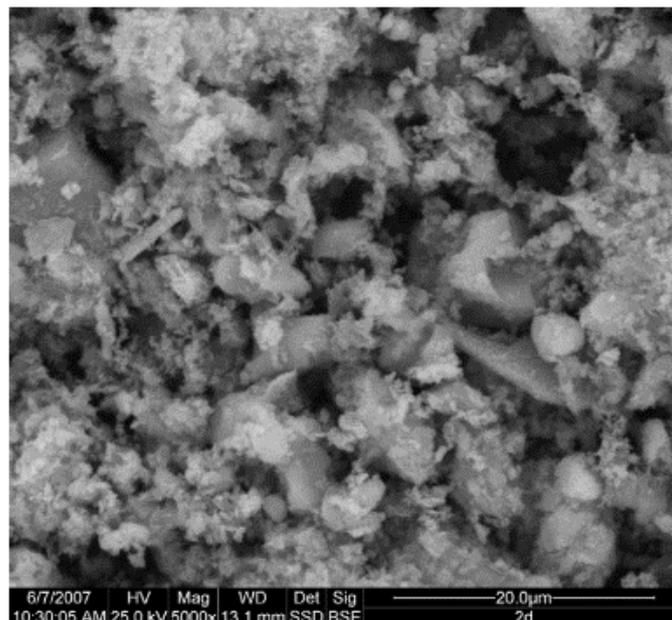


Figura 5: Imagem MEV de cinzas de resíduos de oliva. Fonte: AL-AKHRAS *et al.* [67].

No que se refere à análise mineralógica, a técnica de DRX, por exemplo, possibilita identificar as fases cristalinas do material. Materiais com fases cristalinas são adequados para a utilização como agregados, visto que são mais inertes, ao contrário de materiais com fases predominantemente amorfas, que podem, então, apresentar características de pozolanicidade, sendo úteis como substitutos do cimento.

Como exemplo de aplicação da técnica, SALES e LIMA [24] utilizaram a técnica de difratometria de raios X para determinar elementos cristalinos nas amostras de cinzas de bagaço de cana. Um exemplo de difratograma do referido material é apresentado na Figura 6. O resultado do teste de difratometria de raios X revelou a ausência de um halo amorfo nos difratogramas. Dessa forma, de acordo com os autores, esse fato reforça a hipótese de utilizar esse material como substituto do agregado miúdo - um material inerte, e não do cimento Portland, que possui propriedades de ligação. O quartzo apareceu como o principal elemento das cinzas.

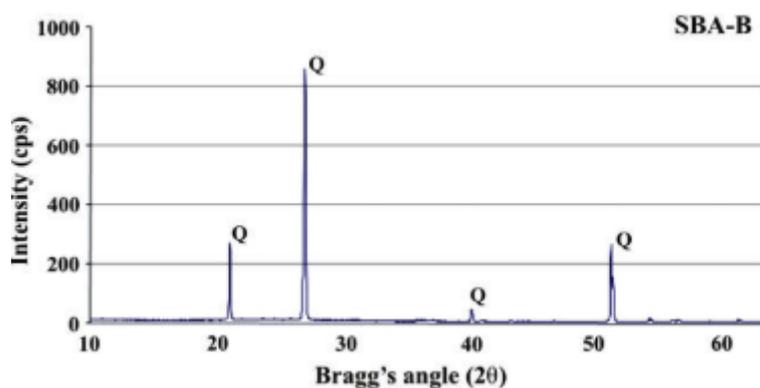


Figura 6: Exemplo de difratograma de amostra de cinza de bagaço de cana, avaliada como substituinte parcial de agregados miúdos. Fonte: adaptado de SALES e LIMA [24].

A Figura 7 apresenta a composição mineralógica obtida por DRX de pó de resíduos cerâmicos, avaliado para ser aplicado como substituto ao cimento [17]. A análise revelou que os picos predominantes foram observados entre 20° e 30°, revelando a presença do quartzo (SiO_2). De acordo com os autores, o desalinhamento do gráfico verificado entre os valores de 0° a 40° pode ser um indicativo de fase amorfa na amostra.

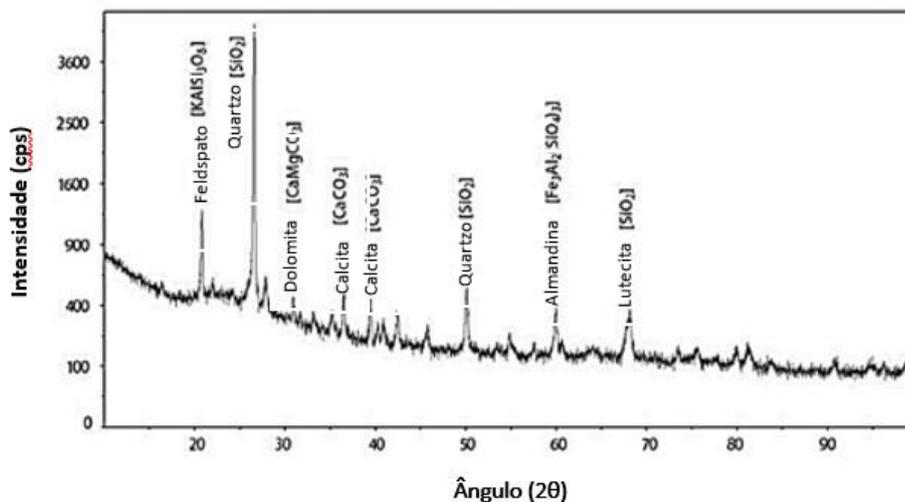


Figura 7: Difratograma de pó de resíduos cerâmicos avaliado para ser aplicado como substituto ao cimento. Fonte: adaptado de EL-DIEB e KANAAN [17].

A partir do levantamento dos estudos de aplicações, verificou-se que uma diversidade de resíduos já foi avaliada com a finalidade de incorporação no processo de produção do concreto. Apesar de tudo, as aplica-

ções de concretos produzidos a partir da incorporação parcial de seus componentes principais por resíduos restringe-se, ainda, a estruturas que não exijam materiais de alta resistência. Portanto, a adição de resíduos para, por exemplo, produção de concreto protendido ou resistentes à ambientes agressivos, não é recomendada, uma vez que critérios mais restritivos de resistência e durabilidade devem ser atendidos. Portanto, estudos mais criteriosos e de longo tempo devem ser considerados de forma a identificar, por exemplo, problemas de lixiviação de compostos, durabilidade e resistência a intempéries.

Embora ainda exista restrições de aplicabilidade desse tipo de compósito, o aproveitamento de resíduos dentro desse processo produtivo possibilita uma redução de volumes de resíduos depositados em aterros, promovendo, assim, processos mais sustentáveis. Dessa forma, o conhecimento de técnicas analíticas de caracterização e da forma em que elas podem ser úteis para identificar propriedades dos mais diferentes resíduos que possibilitam a aplicação desses na cadeia produtiva do concreto é imprescindível. Desse modo, nessa revisão, foram apresentadas as principais técnicas utilizadas nos trabalhos que envolveram essa temática, bem como a forma em que elas foram aplicadas para diferentes resíduos de modo a identificar tais características, tanto para incorporação como agregados, como para substituição parcial do cimento.

Em geral, resíduos que contenham altas concentrações de sílica amorfa são materiais potenciais para serem aplicados como substitutos do cimento, por conta das reações pozolânicas. Além disso, menores específicas são mais adequadas, uma vez que essa é uma das principais propriedades que regem o alcance das reações. Em se tratando da granulometria dos materiais a serem incorporados, essa pode ser ajustada a partir de diferentes proporções de misturas, não sendo considerada um limitante para esse tipo de aplicação. Para resíduos em que se busca sua incorporação como agregados miúdos ou graúdos, tem-se o interesse em compostos que não apresentam reatividade, ou seja, materiais que são compostos por minerais cristalinos, como o quartzo.

4. CONCLUSÕES

Esse artigo apresentou uma revisão e discutiu sobre as principais técnicas que podem ser utilizadas para identificar e avaliar o potencial de diferentes tipos de resíduos para serem aplicados como substitutos parciais do cimento ou de agregados na produção do concreto. Além disso, apresentou-se as principais características que devem ser levadas em consideração no momento dessa avaliação preliminar.

No caso da substituição dos materiais cimentantes, a principal característica avaliada entre os trabalhos refere-se ao potencial de pozolanicidade, que pode ser determinado a partir de diferentes técnicas, seja de forma direta, como por meio do índice de atividade pozolânica, ou inferida de forma indireta, como a partir da determinação química (principalmente FRX) e mineralógica (principalmente DRX) das amostras, com a avaliação das fases amorfas e cristalinas. Alguns índices físicos também acabam sendo avaliados, como a área superficial específica, que pode indicar o alcance das reações de hidratação.

No caso dos agregados, as principais pré-análises realizadas incluem avaliações físicas, como a distribuição do tamanho de partículas e demais índices físicos comumente utilizados (absorção de água, módulo de finura, umidade, densidade, etc). Assim como no caso da avaliação dos materiais para substituição ao cimento, análises químicas via FRX e mineralógicas via DRX são utilizadas. Também, a análise MEV, para avaliação morfológica, torna-se interessante, visto que ela permite identificar certas características, como a forma das partículas, que acaba exercendo influência sobre a estrutura final do concreto.

A partir do levantamento bibliográfico, constatou-se, também, que análises mais específicas, como o caso de porosimetrias ou termogravimetrias, embora sejam interessantes para uma avaliação e entendimento mais aprofundado das características dos materiais, acabam sendo pouco utilizadas em testes preliminares, sendo aplicadas de forma mais ampla para estudo do produto final.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] WONG, C.L., MO, K.H., YAP, S.P., *et al.*, “Potential use of brick waste as alternate concrete-making materials : A review”, *Journal of Cleaner Production*, v. 195, pp. 226–239, 2018.
- [2] BLANKENDAAL, T., SCHUUR, P., VOORDIJK, H., “Reducing the environmental impact of concrete and asphalt: A scenario approach”, *Journal of Cleaner Production*, v. 66, n. 1, pp. 27–36, 2014.
- [3] MO, K.H., ALENGARAM, U.J., JUMAAT, M.Z., *et al.*, “Green concrete partially comprised of farming waste residues: A review”, *Journal of Cleaner Production*, v. 117, pp. 122–138, 2016.

- [4] AGGARWAL, Y., SIDDIQUE, R., “Microstructure and properties of concrete using bottom ash and waste foundry sand as partial replacement of fine aggregates”, *Construction and Building Materials*, v. 54, pp. 210–223, 2014.
- [5] BHARDWAJ, B., KUMAR, P., “Waste foundry sand in concrete: A review”, *Construction and Building Materials*, v. 156, pp. 661–674, 2017.
- [6] OLUTOGE, F.A., OLAWALE, S.O.A., GBADAMOSI, M.A., “Strength Behavior of Concrete Produced with Foundry Sand as Fine Aggregate Replacement”, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, v. 5, n. 11, pp. 35–38, 2015.
- [7] SIDDIQUE, R., AGGARWAL, Y., AGGARWAL, P., *et al.*, “Strength, durability, and micro-structural properties of concrete made with used-foundry sand (UFS)”, *Construction and Building Materials*, v. 25, n. 4, pp. 1916–1925, 2011.
- [8] SUA-IAM, G., MAKUL, N., “Innovative utilization of foundry sand waste obtained from the manufacture of automobile engine parts as a cement replacement material in concrete production”, *Journal of Cleaner Production*, v. 199, pp. 305–320, 2018.
- [9] ELAQRA, H., RUSTOM, R., “Effect of using glass powder as cement replacement on rheological and mechanical properties of cement paste”, *Construction and Building Materials*, v. 179, pp. 326–335, 2018.
- [10] HAJIMOHAMMADI, A., NGO, T., KASHANI, A., “Glass waste versus sand as aggregates: The characteristics of the evolving geopolymer binders”, *Journal of Cleaner Production*, v. 193, pp. 593–603, 2018.
- [11] ISLAM, G.M.S., RAHMAN, M.H., KAZI, N., “Waste glass powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice”, *International Journal of Sustainable Built Environment*, v. 6, n. 1, pp. 37–44, 2017.
- [12] KIM, I.S., CHOI, S.Y., YANG, E.I., “Evaluation of durability of concrete substituted heavyweight waste glass as fine aggregate”, *Construction and Building Materials*, v. 184, pp. 269–277, 2018.
- [13] GANJIAN, E., JALULL, G., SADEGHI-POUYA, H., “Using waste materials and by-products to produce concrete paving blocks”, *Construction and Building Materials*, v. 77, pp. 270–275, 2015.
- [14] LIMBACHIYA, M.C., MARROCCHINO, E., KOULOURIS, A., “Chemical-mineralogical characterisation of coarse recycled concrete aggregate”, *Waste Management*, v. 27, n. 2, pp. 201–208, 2007.
- [15] QASRAWI, H., “The use of steel slag aggregate to enhance the mechanical properties of recycled aggregate concrete and retain the environment”, *Construction and Building Materials*, v. 54, pp. 298–304, 2014.
- [16] SAHOO, K.K., ARAKHA, M., SARKAR, P., P, R.D., JHA, S., “Enhancement of properties of recycled coarse aggregate concrete using bacteria”, *International Journal of Smart and Nano Materials*, v. 7, n. 1, pp. 22–38, 2016.
- [17] EL-DIEB, A.S., KANAAN, D.M., “Ceramic waste powder an alternative cement replacement – Characterization and evaluation”, *Sustainable Materials and Technologies*, v. 17, p. e00063, 2018.
- [18] NAVRÁTILOVÁ, E., ROVNANÍKOVÁ, P., “Pozzolanic properties of brick powders and their effect on the properties of modified lime mortars”, *Construction and Building Materials*, v. 120, pp. 530–539, 2016.
- [19] SIDDIQUE, S., SHRIVASTAVA, S., CHAUDHARY, S., “Durability properties of bone china ceramic fine aggregate concrete”, *Construction and Building Materials*, v. 173, pp. 323–331, 2018.
- [20] EZIEFULA, U.G., EZEH, J.C., EZIEFULA, B.I., “Properties of seashell aggregate concrete: A review”, *Construction and Building Materials*, v. 192, pp. 287–300, 2018.
- [21] KARADE, S.R., “Cement-bonded composites from lignocellulosic wastes”, *Construction and Building Materials*, v. 24, n. 8, pp. 1323–1330, 2010.
- [22] PAYÁ, J., MONZÓ, J., BORRACHERO, M. V., *et al.*, “Determination of amorphous silica in rice husk ash by a rapid analytical method”, *Cement and Concrete Research*, v. 31, n. 2, pp. 227–231, 2001.
- [23] PRUSTY, J.K., KUMAR, S.K., BASARKAR, S.S., “Development Concrete using agro-waste as fine aggregate for sustainable built environment – A review”, *International Journal of Sustainable Built Environment*, v. 5, n. 2, pp. 312–333, 2016.
- [24] SALES, A., LIMA, S.A., “Use of Brazilian sugarcane bagasse ash in concrete as sand replacement”, *Waste Management*, v. 30, n. 6, pp. 1114–1122, 2010.
- [25] RAMACHANDRAN, V.S., BEAUDOIN, J.J., *Handbook of Analytical Techniques in Concrete: Principles, Techniques, and Applications*, William Andrew Publishing, LLC, New York, 2001.

- [26] MOROPOULOU, A., BAKOLAS, A., AGGELAKOPOULOU, E., “Evaluation of pozzolanic activity of natural and artificial pozzolans by thermal analysis”, *Thermochimica Acta*, v. 420, pp. 135–140, 2004.
- [27] RAKHIMOVA, N.R., RAKHIMOV, R.Z., “Alkali-activated cements and mortars based on blast furnace slag and red clay brick waste”, *Materials and Design*, v. 85, pp. 324–331, 2015.
- [28] QUARCIONI, V.A., CHOTOLI, F. F., COELHO, A. C. V., *et al.*, “Indirect and direct Chapelle’s methods for the determination of lime consumption in pozzolanic materials”, *IBRACON Structures and Materials Journal*, v. 8, n. 1, pp. 1–7, 2015.
- [29] PONTES, J., SANTOS SILVA, A., FARIA, P., “Evaluation of Pozzolanic Reactivity of Artificial Pozzolans”, *Materials Science Forum*, v. 730–732, pp. 433–438, 2013.
- [30] DONATELLO, S., TYRER, M., CHEESEMAN, C.R., “Comparison of test methods to assess pozzolanic activity”, *Cement and Concrete Composites*, v. 32, n. 2, pp. 121–127, 2010.
- [31] TIRONI, A., TREZZA, M.A., SCIAN, A.N., IRASSAR, E.F., “Assessment of pozzolanic activity of different calcined clays”, *Cement and Concrete Composites*, v. 37, n. 1, pp. 319–327, 2013.
- [32] TIRONI, A., CRAVERO, F., SCIAN, A.N., *et al.*, “Pozzolanic activity of calcined halloysite-rich kaolinitic clays”, *Applied Clay Science*, v. 147, n. March, pp. 11–18, 2017.
- [33] ASKARINEJAD, A., POURKHORSHIDI, A.R., PARHIZKAR, T., “Evaluation the pozzolanic reactivity of sonochemically fabricated nano natural pozzolan”, *Ultrasonics Sonochemistry*, v. 19, n. 1, pp. 119–124, 2012.
- [34] ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, “ABNT NBR 7181- Solo - Análise Granulométrica”, (1984).
- [35] ASTM, AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, “ASTM C311 / C311M - 17 - Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete”, (2017).
- [36] TAYEH, B.A., HASANIYAH, M.W., ZEYAD, A.M., *et al.*, “Properties of concrete containing recycled seashells as cement partial replacement : A review”, *Journal of Cleaner Production*, 2019.
- [37] RASHAD, A., “Cementitious materials and agricultural wastes as natural fine aggregate replacement in conventional mortar and concrete”, *Journal of Building Engineering*, v. 5, pp. 119–141, 2016.
- [38] LIMA, R.B. S., DA SILVA, A.S.R., COSTA, F.N., “Reação álcali agregado e seus efeitos na construção de edifícios”, (2016).
- [39] AN, J., KIM, S., NAM, B., DURHAM, S., “Effect of Aggregate Mineralogy and Concrete Microstructure on Thermal Expansion and Strength Properties of Concrete”, *Applied Sciences*, v. 7, n. 12, p. 1307, 2017.
- [40] BAHORIA, B. V, PARBAT, D.K., NAGARNAIK, P.B., “XRD Analysis of Natural sand, Quarry dust, waste plastic (LDPE) to be used as a fine aggregate in concrete”, *Materials Today: Proceedings*, v. 5, n. 1, pp. 1432–1438, 2018.
- [41] KAYYALI, O.A., “Mercury intrusion porosimetry of concrete aggregates”, *Materials and Structures*, v. 18, n. 4, pp. 259–262, 1985.
- [42] ANOVITZ, L.M., COLE, D.R., “Characterization and Analysis of Porosity and Pore Structures”, *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, v. 80, pp. 61–164, 2015.
- [43] BROWN, B., “Aggregates for concrete”, *Concrete (London)*, v. 32, n. 5, pp. 12–14, 1998.
- [44] ASTM, “C-289-16 Standard Test Method for Potential Alkali-Silica Reactivity of Aggregates (Chemical Method)”, (2016).
- [45] GRATAN-BELLEW, P.E., “A Critical Review of Ultra-accelerated Alkali-silica Reactivity”, *Cement and Concrete Composites*, v. 19, pp. 403–414, 1997.
- [46] MO, X., JING, Y., HAN, T., *et al.*, “Alkali-silica reactivity of different aggregates from mineral and textural characteristics”, *Journal Wuhan University of Technology*, Materials Science Edition, v. 23, n. 6, pp. 901–906, 2008.
- [47] BERRA, M., MANGIALARDI, T., PAOLINI, A.E., “Alkali-silica reactivity criteria for concrete aggregates”, *Materials and Str.*, v. 38, pp. 373–380, 2005.
- [48] BACHIORRINI, A., “A method to test the alkali reactivity of siliceous aggregates: infrared spectroscopy”, In: *Concrete Durability, Proceedings of the K. and B. Mather International Conference, Atlanta.*, pp.

1821–1832. , USA (1987).

[49] WU, J., WANG, L., MENG, L., “Analysis of mineral composition and microstructure of gravel aggregate based on XRD and SEM”, *Road Materials and Pavement Design*, pp. 1–10, 2017.

[50] ASTM, “C-128-15. Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate”, (2015).

[51] ASTM, “C-127-15. Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate”, (2015).

[52] LAWRENCE, M., JIANG, Y., *Bio-aggregates Based Building Materials*, 2017.

[53] DIAMOND, S., LEEMAN, M.E., “Estimating Capillary Porosity of Cement Paste by Fluorescence Microscopy and Image Analysis”, *Materials Research Society (MRS)*, v. 370, pp. 217–26, 1995.

[54] MARTÍNEZ, C.Á., RUBIERA, N.P., “Análisis Microestructural de Granitos, por Técnicas de Proceso Digital de Imágenes, para su Utilización como Áridos en Hormignones”, *Ingeniería Civil*, v. 99, pp. 5–13, 1995.

[55] ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, “NBR NM 45:2006 - Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios”, (2006).

[56] ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, “NBR NM 248 Agregados - Determinação da composição granulométrica”, (2007).

[57] ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, “NBR 9775:2011 - Agregado miúdo – Determinação do teor de umidade superficial por meio do frasco de Chapman – Método de ensaio”, (2011).

[58] ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, “NBR 9939:2011 - Agregado graúdo – Determinação do teor de umidade total – Método de ensaio”, (2011).

[59] ASTM, ASTM C33/C33M - Standard Specification for Concrete Aggregates, 2018.

[60] SINGH, N., MITHULRAJ, M., ARYA, S., “Influence of coal bottom ash as fine aggregates replacement on various properties of concretes: A review”, *Resources, Conservation & Recycling*, v. 138, n. 1, pp. 257–271, 2018.

[61] MENG, Y., LING, T., HUNG, K., “Recycling of wastes for value-added applications in concrete blocks: An overview”, *Resources, Conservation & Recycling*, v. 138, n. 1, pp. 298–312, 2018.

[62] AFSHINIA, K., RANGARAJU, P.R., “Impact of combined use of ground glass powder and crushed glass aggregate on selected properties of Portland cement concrete”, *Construction and Building Materials*. v. 117, pp. 263–272, 2016.

[63] KIM, Y., HANIF, A., USMAN, M., *et al.*, “Slag waste incorporation in high early strength concrete as cement replacement: Environmental impact and influence on hydration & durability attributes”, *Journal of Cleaner Production*, v. 172, pp. 3056–3065, 2018.

[64] ASTM, “ASTM C618 - 17a. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete”, (2017).

[65] ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, “ABNT NBR 12653. Materiais pozolânicos – Requisitos”, (2014).

[66] AFSHINIA, K., POURSAEE, A., “The potential of ground clay brick to mitigate Alkali-Silica Reaction in mortar prepared with highly reactive aggregate”, *Construction and Building Materials*, v. 95, pp. 164–170, 2015.

[67] AL-AKHRAS, N.M., AL-AKHRAS, K., ATTOM, M.F., “Performance of olive waste ash concrete exposed to alkali-silica reaction”, *Structural Concrete*, v. 13, n. 4, pp. 221–226, 2012.

[68] CUENCA, J., RODRÍGUEZ, J., MARTÍN-MORALES, M., *et al.*, “Effects of olive residue biomass fly ash as filler in self-compacting concrete”, *Construction and Building Materials*, v. 40, pp. 702–709, 2013.

ORCID

Eduardo Pavan Korf <https://orcid.org/0000-0003-2041-0173>

Lucimara Bragagnolo <https://orcid.org/0000-0001-6143-525X>