

Avaliação das propriedades físicas, químicas e mineralógicas da fração fina (<150 µm) do agregado reciclado de RCD

(Evaluation of the physical, chemical and mineralogical properties of the fine fraction (<150 µm) of the recycled CDW aggregate)

R. L. S. Ferreira^{1*}, M. A. S. Anjos², J. E. S. Pereira³, N. J. M. Fonseca¹, A. K. C. Nóbrega⁴

¹Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, R. das Engenharias, S/N, 59078-900, Natal, RN, Brasil

²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Departamento de Construção Civil, João Pessoa, PB, Brasil

³Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Natal, RN, Brasil

⁴Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Departamento de Engenharias, Angicos, RN, Brasil

Resumo

Fatores como o alto consumo de recursos naturais e os elevados volumes de resíduos produzidos pela indústria da construção civil alertam sobre a importância de reutilizar e reciclar os materiais. Assim, este trabalho objetivou determinar e avaliar as características físicas, químicas e mineralógicas dos finos do agregado reciclado (FAR), comparando-os com finos dos agregados naturais (FAN). Para tanto, determinaram-se a distribuição granulométrica, área específica, formato e textura superficial, índice de atividade pozolânica, óxidos presentes, teor de argamassa aderida e fases minerais. Os resultados mostraram que os FAR apresentam características que se destacam em relação aos FAN, dentre elas o formato mais irregular e superfície porosa. Entretanto, os FAR possuem melhor distribuição granulométrica, o que pode favorecer a compactidade das misturas. Em termos de desempenho pozolânico, os FAR não podem ser considerados como materiais pozolânicos, embora se faça necessário avaliá-los em finura requerida por norma.

Palavras-chave: reciclagem, atividade pozolânica, construção civil, fração fina do agregado reciclado.

Abstract

Factors such as high consumption of natural resources and high volumes of waste produced by the construction industry warn the importance of reusing and recycling materials. Thus, this work aimed to determine and evaluate the physical, chemical and mineralogical characteristics of the fines of recycled aggregate (FRA), comparing them with fine natural aggregates (FNA). For that, particle size, specific area, shape and surface texture, pozzolanic activity index, oxides present, content of adhered mortar and mineral phases were determined. The results showed that the FRA have characteristics that stand out in relation to the FNA, among them the more irregular shape and porous surface. However, the FRA has a better particle size distribution, which may favor the compactness of the blends. In terms of pozzolanic performance, the FRA can not be considered as pozzolanic material, although it is necessary to evaluate them in the fineness required by standard.

Keywords: recycling, pozzolanic activity, civil construction, fine fraction of the recycled aggregate.

INTRODUÇÃO

Diante da atual conjuntura em que vive a sociedade contemporânea, seria impossível viver sem os materiais de Engenharia. Desde a Revolução Industrial, tem-se processado esses materiais em uma indústria que opera principalmente como um sistema aberto, transformando recursos em produtos que são habitualmente descartados [1]. Deve-se notar que cerca de 40% de todos os recursos

disponíveis são utilizados pela indústria de construção [2]. Face ao grande consumo e conseqüentemente ao elevado índice de desperdício dessa indústria, grandes quantidades de resíduos são geradas. Anualmente muitas atividades referentes a construções e demolições de obras são realizadas no mundo, especialmente em países desenvolvidos da Europa, Ásia e América. Em consequência geram-se grandes quantidades de resíduos de construção e demolição (RCD), sobretudo nos centros urbanos. A indústria da construção gera na União Europeia cerca de 900 milhões de toneladas de resíduos por ano [3]. No Brasil estima-se que a produção de RCD, apesar de variável e de estar relacionada ao índice

*ruan_landolfo@hotmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-6744-5395>

de desenvolvimento humano (IDH), é superior a 70 milhões de toneladas por ano (cerca de 500 kg/habitante a cada ano), representando mais de 50% em massa dos resíduos sólidos urbanos [4, 5]. Atualmente apenas 6,14% desse volume produzido são reciclados [6] e a maior parte é destinada a aterros inertes ou ilegalmente por outros meios, tais como terrenos abandonados e/ou às margens de estradas. Em consequência, o meio ambiente sofre diversos impactos ambientais como o assoreamento de rios e lagos, obstrução de sistemas de drenagem urbana, degradação das paisagens urbanas, proliferação de vetores nocivos à saúde humana, etc. [7, 8]. Nesse sentido, cresce a necessidade de reutilizar e reciclar os materiais. A reciclagem de RCD é de suma importância, pois reduz o impacto ambiental, diminui a necessidade de áreas de destino (aterros sanitários), impede a exploração de matérias-primas não renováveis e minimiza os danos ambientais causados pela sua extração, incluindo o extenso desflorestamento, poluição do ar e da água [9].

O uso de agregados reciclados (AR) provenientes de RCD tem sido amplamente investigado, tanto na produção de concretos como de argamassas. A utilização do agregado graúdo reciclado (AGR) em concreto é aceita pela indústria da construção, embora existam restrições. No entanto, os agregados miúdos reciclados (AMR) são utilizados em escala demasiadamente menor, sobretudo os constituídos de fração mista, isto é, concretos, argamassas, materiais cerâmicos, etc. Os motivos são claros: i) possuem alta heterogeneidade; ii) alta capacidade de absorção de água; iii) contêm maior quantidade de contaminantes [10] e finos [11, 12] e, portanto, afetam diretamente as propriedades de concretos [13-17] e argamassas [18-21]. Como resultado, a reciclagem dos AMR e consequentemente da fração de finos (<150 µm) acontece de forma lenta, contribuindo ainda mais para a problemática que envolve a geração e destinação desses resíduos devido à grande quantidade de AMR que é armazenada em usinas de reciclagem sem alternativas que potencializem sua recuperação. Por outro lado, os finos dos AMR podem melhorar as propriedades de argamassas e concretos por meio de dois efeitos: químico, devido à leve reatividade dos materiais cerâmicos ou hidraulicidade dos materiais cimentícios (concreto argamassa) presentes [22, 23]; e físico, em consequência do efeito de microenchimento dos vazios maiores por partículas menores [19, 21, 24-26]. Tais efeitos, isoladamente ou em conjunto, contribuem para obtenção de argamassas e concretos mais coesos e, portanto, mais resistentes.

Alguns autores mostraram que ao incorporar os finos obtidos de AR é possível produzir argamassas [27-30] e concretos autoadensáveis [31] com bom desempenho em termos de resistência mecânica. Entretanto, em [11] foi mostrado que o uso da fração de finos (75 µm) de AR misto em argamassas, embora não afete as propriedades mecânicas, contribui para um maior surgimento de fissuras, sendo indicado que o conteúdo desses finos deve ser limitado em 25%. Em outro estudo [24], observou-se que a incorporação de finos (<150 µm), obtidos a partir de resíduos de concreto, aumenta a retração das argamassas em 44% quando

comparada com a argamassa de referência. Nota-se, no entanto, que estudos que avaliam as características da fração de finos do AMR isoladamente são incipientes nas literaturas brasileira e internacional. Nesse contexto e em função do importante papel que a fração fina do agregado miúdo exerce sobre as propriedades dos materiais cimentícios [32], este trabalho tem como objetivo principal determinar e avaliar as características físicas, químicas e mineralógicas de finos de agregados reciclado (FAR) de RCD e relacioná-las aos finos de agregados naturais (FAN) a fim de que os resultados aqui apresentados possam nortear futuras pesquisas e, principalmente, contribuam para identificação de quais são as principais características desses materiais que exercem influência sobre as propriedades dos materiais cimentícios. É importante destacar ainda que este artigo discute o uso de técnicas de avaliação dos finos levando em consideração as diferentes características do RCD que ainda não foram totalmente elucidadas para o seu uso e aplicação em obras de construção civil. Os efeitos de sua utilização em materiais cimentícios, com vistas à literatura especializada, também são brevemente discutidos.

MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizados dois tipos de finos: finos de areia natural (FAN) e finos de areia reciclada (FAR). Os FAN foram obtidos a partir de uma areia oriunda de leito de rio, comumente utilizada nas obras de construção civil. Os FAR foram obtidos a partir do beneficiamento de AMR de RCD promovido por uma usina de reciclagem de resíduos de construção civil, localizada no município de São José de Mipibu/RN, microrregião de Macaíba, distante cerca de 40 km de Natal/RN. O AMR foi constituído basicamente de materiais cimentícios (concreto e argamassa), materiais cerâmicos e rochas. Para a obtenção dos FAR, a fração obtida da britagem do RCD foi submetida a um peneiramento manual, no qual os grãos retidos na peneira de 150 µm foram descartados e os passantes armazenados. Em seguida, foram secos em estufa a 105±5 °C por 48 h para posterior caracterização física, química e mineralógica. Os parâmetros de ensaios e as técnicas utilizadas para a caracterização dos finos são descritos a seguir.

Distribuição granulométrica a laser: o ensaio de granulometria dos finos dos agregados foi realizado por meio de um granulômetro de difração a laser (Cilas, 920L). A água foi utilizada como fluido de circulação e não se utilizou nenhum tipo de agente dispersante. A faixa granulométrica adotada no equipamento foi de 0,3-400 µm (30 classes, ultrassom 60 s). *Área específica por BET:* a superfície específica dos finos dos agregados foi determinada a partir da adsorção física do nitrogênio sobre os materiais pelo método de Brunauer-Emmett-Teller (BET). As análises foram realizadas em um equipamento da Bel Japan (Belsorp-mini II). O BET é um dos métodos mais usuais para a caracterização de pós e consiste na medida da adsorção física de um gás inerte (geralmente N₂), na qual, por intermédio da isoterma de BET, obtém-se a área específica do material.

Análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV): as micrografias foram obtidas com o objetivo de avaliar a forma e a textura superficial dos agregados naturais e reciclados por meio do equipamento da Hitachi (TM-3000). *Análise química por espectroscopia de fluorescência de raios X (FRX):* as análises químicas dos finos dos agregados foram realizadas por FRX pelo método semiquantitativo em vácuo. Para tanto, utilizou-se o equipamento da Shimadzu (EDX-720). *Análise mineralógica por difração de raios X (DRX):* para a análise mineralógica por DRX utilizou-se o equipamento da Shimadzu (XRD-6000). As amostras foram submetidas às seguintes condições de análise: radiação $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda=1,54056 \text{ \AA}$), voltagem de 30 kV, corrente de 30 mA, ângulo de difração 2θ no intervalo de 5-55°, velocidade angular de 5 °/min e 0,02° de intervalo de amostragem.

Atividade pozolânica: com o intuito de avaliar a potencialidade da utilização dos finos do agregado reciclado (FAR) como materiais pozolânicos, foram realizados os ensaios de resistência à compressão de argamassas produzidas com os FAR, cimento e cal. Para tanto, foram utilizados cimento CP II F-32, cal hidratada do tipo CH-I, areia normal produzida conforme a NBR 7214:7215 e finos resultantes de areias recicladas de RCD produzidas em uma usina de reciclagem de resíduos de construção civil. Para a avaliação do potencial pozolânico dos finos do agregado reciclado, utilizou-se a determinação do índice de atividade pozolânica com a cal (NBR 5751:2015) e o índice de desempenho com o cimento (NBR 5752:2014). Para tanto foram produzidos três tipos de argamassas, conforme mostra a Tabela I. Após a mistura moldaram-se para cada argamassa seis corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura. A quantidade de água estabelecida para a ARGCAL-FAR correspondeu a um índice de consistência de 225±5 mm. Para manter a consistência da ARGCIM-FAR com uma variação de ±10 mm em relação à consistência da ARGCIM-REF, foi necessário utilizar um aditivo superplastificante devido à maior absorção de água dos FAR. A cura dos corpos de prova com a cal foi realizada no próprio molde, sendo realizado encamisamento com látex na parte superior, e envolvido com filme plástico transparente. Durante as primeiras 24 h os corpos de prova foram mantidos a 23±2 °C e contidos em recipiente plástico com água e envolvidos com filme plástico transparente. Durante as 144 h posteriores, os corpos de prova foram mantidos em cura úmida aquecida a 55 °C. Para os corpos de prova com cimento, a cura nas primeiras 24 h também se deu nos moldes com proteção em sua superfície. Após esse

período, os corpos de prova foram desmoldados e imersos em reservatório com água saturada de cal durante 28 dias.

Teor de argamassa: o ensaio para a determinação do teor de argamassa dos FAR teve como objetivo avaliar a presença de argamassa/pasta cimentícia na superfície dos grãos que são facilmente corroídos por ácido clorídrico (HCl). Devido à natureza alcalina dos ligantes, a utilização de ácidos proporciona facilmente sua remoção dos agregados, técnica amplamente utilizada para o tratamento de AR de concreto [33]. O procedimento foi realizado da seguinte forma: i) secou-se a fração dos finos resultantes do peneiramento da AR por 24 h; ii) determinou-se uma massa inicial (m_i) de 5,0 g de cada fração para reagir com uma concentração de 1:3 de HCl:água deionizada (solução com 500 mL, sendo 125 mL de HCL e 375 mL de água deionizada); iii) em seguida, 5 g de FAR foram cobertos por 20 mL da solução de HCl, isto é, 4 mL/g de amostra e agitada mecanicamente por 35 min; iv) após esse processo as amostras foram filtradas com o auxílio de bomba a vácuo e secas em estufa por 48 h, e sua massa final determinada (m_f); v) com as massas inicial e final, o teor de argamassa foi calculado por meio de:

$$\text{Teor de argamassa (\%)} = \left(\frac{m_i - m_f}{m_i} \right) \cdot 100 \quad (\text{A})$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análises físicas: com o objetivo de avaliar o tamanho das partículas inferiores a 150 μm , realizou-se o ensaio de granulometria a laser, cujos resultados estão indicados na Tabela II e na Fig. 1. Constatou-se que os FAR possuíam menor granulometria, sendo seu diâmetro médio cerca de 47% inferior ao dos FAN. Ao analisar a Fig. 1, observa-se que os FAR possuíam curva com comportamento contínuo, justificando os resultados do $D_{\text{médio}}$, D10 e D50, cujos valores foram significativamente inferiores aos dos FAN. Portanto, os FAR possuíam partículas com diâmetros menores do que os FAN, bem como melhor distribuição de partículas, o que corroborou os resultados obtidos em outro estudo [12]. Essa última observação é uma característica apreciável, pois pode resultar em misturas com maior compacidade e, por conseguinte, contribuir para o melhor desempenho dos materiais cimentícios. A presença de material ultrafino em FAR tende a aumentar com a diminuição do tamanho das partículas, mostrando valores altos para as frações abaixo de 500 μm [10], justificando os resultados obtidos nesta pesquisa.

Tabela I - Quantidade em massa (g) dos materiais utilizados para confecção das argamassas.

[Table I - Mass quantity (g) of the materials used to make the mortars.]

| Material | Cimento | Cal | Areia normal | FAR | Água | Aditivo superplastificante* |
|------------|---------|-----|--------------|-----|-------|-----------------------------|
| ARGCAL-FAR | - | 208 | 1872 | 426 | 430,8 | - |
| ARGCIM-REF | 628 | - | 1872 | - | 302,0 | - |
| ARGCIM-FAR | 472 | - | 1872 | 158 | 302,0 | 4,4 |

ARGCIM-REF - argamassa de cimento de referência (sem FAR); ARGCAL-FAR - argamassa de cal com FAR; ARGCIM-FAR - argamassa de cimento com FAR;

*Sikament PF 171.

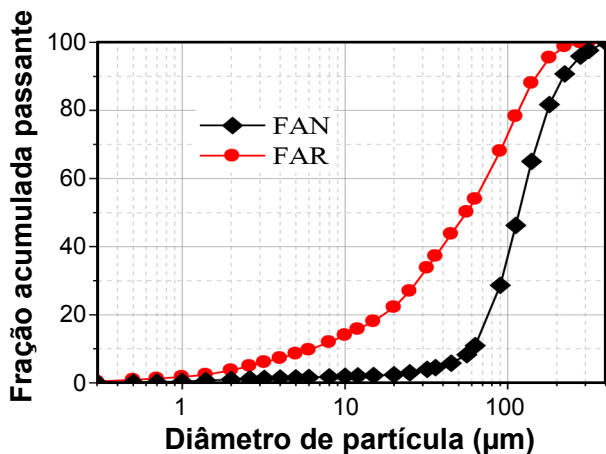


Figura 1: Curvas granulométricas dos FAN e FAR.
[Figure 1: Particle size distribution curves of FNA and FRA.]

Os resultados obtidos a partir do ensaio de BET para os FAN e os FAR são apresentados na Tabela II. Os FAR apresentaram maior área específica, o que era esperado tendo em vista os resultados obtidos no ensaio de granulometria a laser e os obtidos em outras pesquisas [7, 21, 25, 34]. O formato irregular dos FAR justifica a maior superfície específica, pois quanto menos esférica é a forma da partícula, maior é a sua área superficial [35]. A maior superfície específica dos FAR justifica a maior absorção de água apresentada por AR [14, 20, 36-39] e por consequência resulta em uma maior demanda de água em misturas de concretos e argamassas para manter a mesma trabalhabilidade. É importante ainda frisar que a absorção de água do AR é maior quanto menor é o tamanho das partículas. Por outro lado, a maior área específica dos FAR, embora reflita uma maior porosidade, proporciona uma melhor ligação entre o AR e a pasta de cimento, preenchendo assim alguns poros que, sem a adição de finos, seriam preenchidos por água, resultando em aumento da resistência de argamassas [7, 21, 25, 34, 40] e concretos [41, 42].

Com as imagens obtidas em microscópio eletrônico de varredura (MEV) dos FAN e FAR (Fig. 2), foi possível avaliar o formato e textura superficial desses agregados, parâmetros que influenciam diretamente as propriedades de argamassas e concretos. Quanto à forma das partículas, notou-se que ambos os finos apresentaram formato semelhante. Os FAN apresentaram morfologia irregular, porém com arestas e vértices arredondados (Fig. 2a). Esses resultados foram semelhantes aos obtidos em [10]. Os FAR por sua vez possuíam arestas e vértices mais definidos do que os FAN e, portanto, apresentaram formato angular, o

que se justifica em função do processo de britagem. Esses resultados também foram observados em outras pesquisas [36, 43]. A textura superficial e a variação de tamanho das partículas foram os grandes diferenciais desses finos. Essas diferenças foram atribuídas ao processo de britagem dos antigos materiais (concretos, argamassas, materiais cerâmicos). Os FAN apresentaram textura lisa e seguiram, em geral, uma distribuição contínua de tamanho, conforme pode-se observar nas Figs. 2a e 2b. Já os FAR possuíam diversos tamanhos e formas de partículas dispersas, além de apresentarem superfície porosa com textura rugosa e áspera (Fig. 2d), corroborando as micrografias apresentadas em outras pesquisas [10, 44]. Essa variação no tamanho das partículas dos FAR (Fig. 2c) explica a maior quantidade de materiais pulverulentos presentes em AR quando comparada com AN.

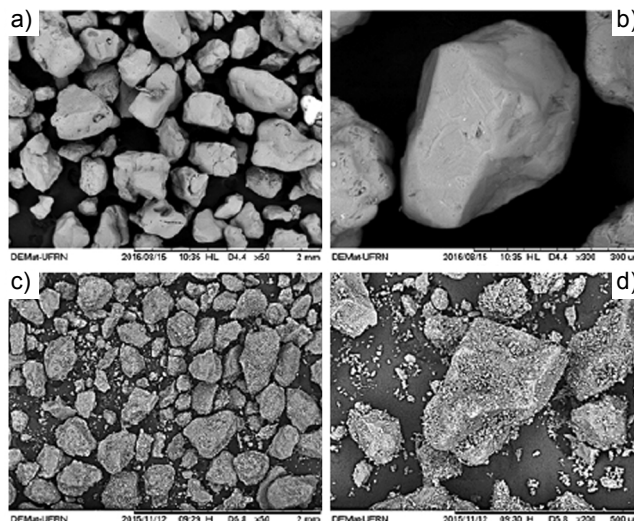


Figura 2: Micrografias de MEV mostrando formato e textura superficial dos FAN (a,b) e FAR (c,d).

[Figure 2: SEM micrographs showing shape and surface texture of FNA (a,b) and FRA (c,d).]

Verificou-se ainda por meio de imagens de MEV a presença de argamassa aderida aos grãos dos FAR (Fig. 3a). Essas observações foram consistentes com as feitas por outros autores [10, 43, 45-48] e explicam o fato dos FAR possuírem textura superficial porosa e áspera e consequentemente elevada absorção de água. Em [10] verificou-se, por microscopia realizada em partículas de 125 μm , que o principal constituinte era argamassa, embora pequenas quantidades de agregados naturais tenham sido

Tabela II - Resultados do ensaio de granulometria a laser e área específica dos finos FAN e FAR.

[Table II - Results of the laser granulometric test and surface area of fines FNA and FRA.]

| Finos | D10 (μm) | D50 (μm) | D90 (μm) | $D_{\text{médio}}$ (μm) | Área específica (m^2/g) |
|-------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------------------|---|
| FAN | 60,47 | 117,12 | 220,16 | 130,64 | 1,227 |
| FAR | 6,24 | 55,73 | 149,68 | 69,31 | 3,547 |

D10, D50 e D90 - tamanho de partícula na fração passante de 10%, 50% e 90%, respectivamente; $D_{\text{médio}}$ - diâmetro médio da amostra.

identificadas; observou-se ainda que a zona de transição entre a argamassa e o agregado em questão foi aparentemente fraca, apresentando microfissuras em toda sua microestrutura. As observações feitas no estudo citado [10], assim como o teor de argamassa nos finos dos agregados reciclados (22%, conforme discutido posteriormente) e os resultados ilustrados na Fig. 3, foram confirmadas na identificação qualitativa dos elementos presentes nos FAR por intermédio da espectroscopia de energia dispersiva (EDS). Na região indicada na Fig. 3b foram encontrados cálcio (43,28%) e silício (26,56%) como principais elementos presentes e, em menor quantidade, a presença de alumínio (14,05%), ferro (9,76%) e enxofre (6,35%) foi evidenciada. O cálcio, o silício e o enxofre foram associados à presença de materiais que constituem a argamassa aderida (cimento e agregados) à superfície dos grãos, e o alumínio e o ferro foram relacionados possivelmente à presença de materiais cerâmicos. O alumínio pode ainda estar associado ao sulfoaluminato de cálcio presente em compostos cimentícios hidratados. A argamassa e o material cerâmico que aderem aos grãos de FAR afetam diretamente suas propriedades físico-mecânicas, como a densidade das partículas e a absorção de água [36], como discutido anteriormente. Em geral, a menor resistência à compressão de concretos [49] e argamassas [20] com AR deve-se à presença de argamassa antiga aderida aos grãos, constituindo uma nova zona de transição interfacial que, nesse caso, é frágil e consequentemente piora as propriedades desses materiais.

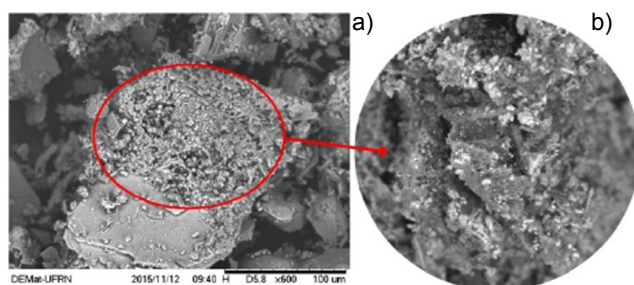


Figura 3: Micrografias de MEV mostrando grãos com argamassa aderida à superfície (a) e ampliação da região onde foi realizada a análise por EDS (b).

[Figure 3: SEM micrographs showing grains with mortar adhered to the surface (a), and enlargement of the region where EDS analysis was performed (b).]

A atividade pozolânica foi realizada com o objetivo de avaliar a pozolanicidade dos finos (<150 μm) presentes nos finos dos agregados reciclados. A Tabela III mostra os resultados da resistência à compressão das argamassas com cimento e a cal. A resistência à compressão média obtida pela argamassa de referência (ARGCIM-REF) foi de 25,6 MPa e a argamassa com FAR (ARGCIM-FAR) obteve 19,7 MPa. Dessa forma, obteve-se um índice de desempenho com o cimento (IDC) de 76,8%, sendo inferior ao requerido pela NBR 12653:2015, que é de no mínimo 90%. No entanto, foi acima do valor requerido na norma publicada em 2012 e pela ASTM C618-12:2018, que é de 75%. A

argamassa de cal com o FAR (ARGCAL-FAR) apresentou resistência à compressão média aos 7 dias de 0,67 MPa, sendo significativamente inferior a 6,0 MPa, requisito da NBR 12653:2015 para que o material analisado seja considerado como pozolânico com a cal. A argamassa de cal produzida com os FAR necessitou de elevada quantidade de água (430 g) para atingir o espalhamento requerido por norma (220-225 mm), sendo esse fator, portanto, determinante para a diminuição da resistência mecânica. Dessa maneira, os FAR analisados neste trabalho não podem ser considerados materiais pozolânicos, confirmando resultados de estudos anteriores [11, 27, 50]. No entanto, são necessários outros estudos que possam desenvolver métodos eficazes de aprimoramento da reatividade desses resíduos, como a diminuição do tamanho das partículas objetivando aumentar a superfície específica [51] e/ou a sua calcinação a elevadas temperaturas [52]. Nos casos em que o tratamento dos FAR não for viável, é interessante que outras formas de utilização, como a produção de agregados leves [53], argamassas [27-30] ou concretos/argamassas autoadensáveis [31], sejam adotadas visando o não descarte dessa fração.

Tabela III - Resistência à compressão das argamassas de cimento e cal.

[Table III - Compressive strength of cement and lime mortars.]

| Argamassa | fc (MPa) | DP (MPa) | CV (%) |
|------------|----------|----------|--------|
| ARGCIM-REF | 25,6 | 0,5 | 2,0 |
| ARGCIM-FAR | 19,7 | 0,4 | 2,0 |
| ARGCAL-FAR | 0,67 | 0,02 | 3,0 |

fc - resistência à compressão média; DP - desvio-padrão; CV - coeficiente de variação; ARGCIM-REF - argamassa de cimento de referência (sem FAR); ARGCAL-FAR - argamassa de cal com FAR; ARGCIM-FAR - argamassa de cimento com FAR.

Análise química: a Tabela IV mostra a composição química por FRX dos finos dos agregados naturais e reciclados, resultados semiquantitativos em porcentagem de óxidos. Os resultados indicaram a presença em comum de alguns óxidos, contudo em teores distintos. Diferentemente dos FAN, os FAR apresentaram uma maior variedade de componentes químicos devido às diferentes composições dos materiais que os originaram. Para os FAR, os maiores teores encontrados foram de dióxido de silício (SiO_2), óxido de cálcio (CaO), óxido de alumínio (Al_2O_3) e óxido de ferro (Fe_2O_3), reforçando os resultados de outras pesquisas [54, 55]. Assim, quanto à composição química essas amostras podem ser caracterizadas como sílico-aluminosas. Com relação aos FAN, seu elevado teor de sílica (>95%) evidencia sua natureza exclusivamente quartzosa. A origem desses óxidos em AR de RCD está associada a diversos tipos de silicatos que são derivados da pasta de cimento endurecida e de agregados naturais, rochas naturais, cerâmica vermelha, etc. [54]. Os SiO_2 e CaO presentes na composição desses resíduos devem-se provavelmente à presença de compostos cimentícios hidratados (concretos, argamassas). Já a presença dos óxidos de ferro e de alumínio, bem como o

Tabela IV - Composição química (% em massa) por FRX dos agregados.
 [Table IV - Chemical composition (wt%) by FRX of the aggregates.]

| Finos | SiO ₂ | CaO | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | SO ₃ | K ₂ O | SrO | ZrO ₂ | TiO ₂ | Outros |
|-------|------------------|-------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------|------------------|------|------------------|------------------|--------|
| FAN | 95,81 | - | 2,38 | - | 0,13 | - | - | - | 0,94 | 0,74 |
| FAR | 40,40 | 29,83 | 10,18 | 8,91 | 5,03 | 1,57 | 1,13 | 0,99 | 0,76 | 1,20 |

óxido de cálcio, pode ser justificada devido à presença de produtos cerâmicos. Tais resultados apoiam os obtidos em outras pesquisas [55], visto que o teor de SiO₂ foi maior para os AR de concreto e que os teores de CaO, Al₂O₃ e Fe₂O₃ foram maiores para os AR de origem cerâmica. As diferenças de composição química dos FAR podem afetar as propriedades mecânicas e de durabilidade de argamassas e concretos. Apesar do baixo teor de SO₃ presente nos FAR, cabe ressaltar que esse composto químico pode causar a perda gradual da resistência mecânica e afetar a durabilidade de argamassas e concretos produzidos com esses agregados [55, 56], devido à formação de etringita secundária [21].

Após identificar a quantidade de material solúvel em ácido, inferiu-se que o teor de argamassa aderida aos grãos dos agregados reciclados estudados foi cerca de 22%. Esse resultado encontra-se fora da faixa de 25 a 65% [45] que, segundo os autores, se aplica ao AR de concreto, abrangendo todas as suas frações, e não ao AR misto e sua fração fina, objeto de estudo desta pesquisa. É importante destacar ainda que a quantidade de argamassa aderida aos grãos aumenta com a diminuição do tamanho do AR [10, 45, 46, 48] e, portanto, sugere-se que na fração de finos do AR se encontrem os maiores teores de argamassa aderida quando comparados com outras frações. Outra característica importante é que à medida que esse teor aumenta a absorção do AR também aumenta [45, 47]. Estudos demonstram que o teor de argamassa aderida aos grãos aumenta a absorção de água dos AR e, por conseguinte, contribui para a redução da resistência à compressão de argamassas [20] e aumento da porosidade dos concretos [57]. Podem ainda afetar a durabilidade desses materiais de construção devido à presença de sulfatos derivados da argamassa aderida aos grãos [45]. A fim de melhorar as propriedades do AR e consequentemente dos FAR, é de fundamental importância elaborar um método de tratamento de baixo custo que seja capaz de remover a argamassa aderida em níveis aceitáveis de modo a diminuir os efeitos negativos às propriedades físicas e mecânicas dos AR, sobretudo a elevada porosidade e a menor massa específica que são características diretamente relacionadas à quantidade de argamassa aderida [10, 42, 49, 58, 59]. A simples lavagem dos AR com água pode reduzir o teor de argamassa aderida em 15%, produzindo agregados de melhor qualidade, isto é, com menor quantidade de argamassa e ligeiramente mais redondos e mais rijos [49].

Análise mineralógica: os difratogramas de raios X dos FAN e dos FAR estão mostrados na Fig. 4. Os resultados indicaram que os FAN possuíam composição mineralógica composta apenas por fase quartzo (SiO₂), confirmando os resultados obtidos na FRX. Já a composição mineralógica

dos FAR foi complexa devido à grande variedade de fases cristalinas e amorfas de seus componentes (concreto, argamassa, cerâmica) [4]. Todavia, a análise de DRX confirmou a presença de quartzo (SiO₂) e calcita (CaCO₃) como fases altamente cristalinas. O quartzo deriva da presença de rochas naturais, já a calcita pode ter diferentes origens, como por exemplo a partir de agregados naturais [60] e de componentes carbonatados [10, 47, 54, 59] utilizados em concretos e argamassas, como a cal e o cimento. A presença de compostos de cimento anidros não foi identificada dentro do limite de detecção da análise, o que sugeriu que os FAR não apresentam capacidade hidráulica. Esses resultados contrariam a teoria de que a hidráulica em AR resulte principalmente da potencial reatividade química das partículas de cimento não hidratadas presentes nos AR [10]. Assim, ao se utilizar os FAR com características iguais ou similares ao deste estudo, estes não devem reagir com o cimento e a cal em função de sua não hidráulica, o que confirma os resultados do índice de atividade pozolânica. As presenças majoritárias desses minerais condizem com o observado por outros autores [4, 10, 19, 60, 61] e reforçam os resultados obtidos em outro estudo [55], no qual se verificou que para os três tipos de agregados reciclados analisados (concreto, cerâmica e misto) a presença de quartzo e calcita foi preponderante. Outros minerais, como a muscovita, gipsita, caulinita, microclínio e albita, foram identificados em menor intensidade nos FAR. A presença de gipsita (gesso) também foi observada em outras pesquisas [19, 55] e reafirma os resultados obtidos na composição química dos FAR por meio da FRX. A origem da muscovita e da mica pode estar relacionada com as rochas de granito

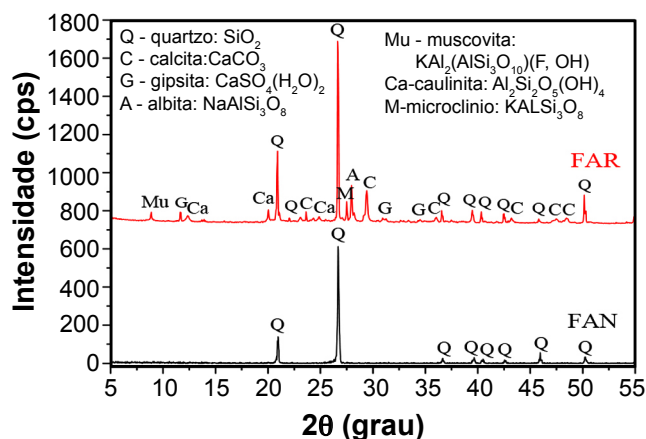


Figura 4: Difratogramas de raios X da fração fina (<150 μm) dos FAN e FAR.

[Figure 4: XRD patterns of the fine fraction (<150 μm) of FAN and FAR.]

e componentes de cerâmica vermelha. O microclínio e a albita são minerais encontrados em feldspatos, que estão presentes em rochas naturais. A presença de caulinita deve-se possivelmente à presença de componentes de argila, conforme também observado em [54].

CONCLUSÕES

Neste trabalho foram determinadas as características físicas, químicas e mineralógicas dos finos do agregado reciclado (FAR) e comparadas com as dos finos do agregado natural (FAN). A partir dos resultados experimentais e das discussões, as seguintes conclusões podem ser extraídas: i) os finos do agregado reciclado, em comparação com os dos AN, possuíram menor granulometria e maior área específica, assim como formato mais irregular/angular e superfície porosa com textura rugosa e áspera; a textura do AR deve-se à presença de argamassa aderida aos grãos e justifica a maior absorção de água dos AR de RCD e o menor desempenho mecânico e de durabilidade de argamassas e concretos; ii) os difratogramas de raios X dos FAR confirmaram os resultados obtidos na espectroscopia por FRX, visto que essa análise comprovou a presença de quartzo e calcita como principais fases cristalinas; outros minerais em menor intensidade foram encontrados e foram originados de rochas e materiais cerâmicos (muscovita, gipsita, caulinita, microclínio e albita); iii) os finos do agregado reciclado não apresentaram índices de atividade pozolânica; no entanto, faz-se necessário avaliar a atividade pozolânica desses materiais com a finura requerida por norma ($<45 \mu\text{m}$). De todo modo, os FAR podem ser utilizados como fíler para a produção de argamassas convencionais, argamassas autonivelantes e/ou concretos autoadensáveis, desde que isentos de materiais deletérios que possam prejudicar a hidratação dos ligantes ou originar produtos expansivos. Embora os resultados apresentados sejam uma análise do comportamento dos finos presentes no RCD estudado quando utilizados em materiais cimentícios, faz-se necessária a realização de outros estudos a fim de melhorar a qualidade dos finos dos agregados reciclados, desde a coleta, seleção e britagem do RCD, e ainda promover a busca por novas tecnologias que visem sua adequação na produção de novos materiais. Isso pode evitar descarte e promover o aumento da vida útil do material original, gerando importantes benefícios ao meio ambiente.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Materiais de Construção do IFRN e ao Laboratório de Construção Civil e de Caracterização Estrutural de Materiais da UFRN pelo apoio durante a realização deste trabalho e ao CNPq pelo apoio financeiro por meio da Chamada CNPq/SETEC/MEC Nº 17/2014 Linha 1: PD&I.

REFERÊNCIAS

[1] J.M. Allwood, M.F. Ashby, T.G. Gutowski, E. Worrell,

- Mater. Resour. Conserv. Recycl. **55**, 3 (2011) 362.
 [2] U. Kulatunga, D. Amaratunga, R. Haigh, R. Rameezdeen, Manag. Environ. Qual. Int. J. **17**, 1 (2006) 57.
 [3] EUROSTAT, “Waste generation and management: European Commission 2010” (2010).
 [4] M. Contreras, S.R. Teixeira, M.C. Lucas, L.C.N. Lima, D.S.L. Cardoso, G.A.C. Silva, G.C. Gregório, A.E. De Souza, A. Santos, Constr. Build. Mater. **123** (2016) 594.
 [5] D.H.F. Paz, K.P.V. Lafayette, Waste Manag. Res. **34**, 8 (2016) 708.
 [6] V.W.Y. Tam, M. Soomro, A.C.J. Evangelista, Constr. Build. Mater. **172** (2018) 272.
 [7] A.E.B. Cabral, V. Schalch, D.C.C.D. Molin, J.L.D. Ribeiro, Constr. Build. Mater. **24**, 4 (2010) 421.
 [8] J.P. Moretti, A. Sales, F.C.R. Almeida, M.A.M. Rezende, P.P. Gromboni, Constr. Build. Mater. **113** (2016) 317.
 [9] F. Pacheco-Torgal, in: Handb. Recycl. Concr. Demo. Waste, Woodhead Publ. (2013) 1.
 [10] L. Evangelista, M. Guedes, J. De Brito, A.C. Ferro, M.F. Pereira, Constr. Build. Mater. **86** (2015) 178.
 [11] L.F.R. Miranda, S.M.S. Selmo, Constr. Build. Mater. **20**, 9 (2006) 625.
 [12] H. Carasek, A.C.C. Girardi, R.C. Araújo, R. Angelim, O. Cascudo, Cerâmica **64**, 370 (2018) 288.
 [13] C. Thomas, J. Setién, J.A. Polanco, P. Alaejos, M. Sánchez De Juan, Constr. Build. Mater. **40** (2013) 1054.
 [14] P. Pereira, L. Evangelista, J. De Brito, Cem. Concr. Compos. **34**, 9 (2012) 1044.
 [15] A.E.B. Cabral, V. Schalch, D.C.C.D. Molin, J.L.D. Ribeiro, Mater. Res. **15**, 6 (2012) 1037.
 [16] M. Bravo, J. De Brito, J. Pontes, L. Evangelista, Constr. Build. Mater. **77** (2015) 357.
 [17] M. Bravo, J. De Brito, J. Pontes, L. Evangelista, J. Clean. Prod. **99** (2015) 59.
 [18] P.R.L. Lima, M.B. Leite, Open J. Civ. Eng. **2**, 2 (2012) 53.
 [19] J.R. Jiménez, J. Ayuso, M. López, J.M. Fernández, J. De Brito, Constr. Build. Mater. **40** (2013) 679.
 [20] G.A. Ferro, C. Spoto, J.M. Tulliani, L. Restuccia, Procedia Eng. **109** (2015) 240.
 [21] R.V. Silva, J. De Brito, R.K. Dhir, Constr. Build. Mater. **105** (2016) 400.
 [22] K.L. Lin, H.H. Wu, J.L. Shie, C.L. Hwang, A. Cheng, Waste Manag. Res. **28**, 7 (2010) 653.
 [23] I. Vegas, J.A. Ibañez, A. Lisbona, A. Sáez De Cortazar, M. Frías, Constr. Build. Mater. **25**, 5 (2011) 2674.
 [24] M. Braga, J. De Brito, R. Veiga, Constr. Build. Mater. **36** (2012) 960.
 [25] C. Neno, J. de Brito, R. Veiga, Mater. Res. **17**, 1 (2014) 168.
 [26] R. Raeis Samiei, B. Daniotti, R. Pelosato, G. Dotelli, Constr. Build. Mater. **84** (2015) 84.
 [27] L.F.R. Miranda, S.M.S. Selmo, Constr. Build. Mater. **20**, 9 (2006) 615.
 [28] V. Corinaldesi, M. Giuggiolini, G. Moriconi, Waste Manage. **22**, 8 (2002) 893.
 [29] E.F. Ledesma, A.I. Torres Gómez, M. López, J. Ayuso,

- J.R. Jiménez, Eur. J. Environ. Civ. Eng. **20** (2016) s1.
- [30] V. Corinaldesi, G. Moriconi, T.R. Naik, Constr. Build. Mater. **24**, 1 (2010) 113.
- [31] V. Corinaldesi, G. Orlandi, G. Moriconi, in: Innov. Dev. Concr. Mater. Constr. (2002) 9.
- [32] B. Benabed, E.H. Kadri, L. Azzouz, S. Kenai, Cem. Concr. Compos. **34**, 10 (2012) 1167.
- [33] A. Akbarnezhad, K.C.G. Ong, in: Handb. Recycl. Concr. Demo. Waste, Woodhead Publ. (2013) 246.
- [34] G.M. Cuenca-Moyano, M. Martín-Morales, I. Valverde-Palacios, I. Valverde-Espinosa, M. Zamorano, Constr. Build. Mater. **70** (2014) 71.
- [35] J.B. Dixon, S.B. Weed, *Minerals in soil environments*, 2nd ed., Soil Sci. Soc. Am., USA (1989).
- [36] R.V. Silva, J. De Brito, R.K. Dhir, Constr. Build. Mater. **65** (2014) 201.
- [37] Z. Zhao, S. Remond, D. Damidot, W. Xu, Constr. Build. Mater. **81** (2015) 179.
- [38] C. Muñoz-Ruipérez, A. Rodríguez, S. Gutiérrez-González, V. Calderón, Constr. Build. Mater. **118** (2016) 139.
- [39] M. Martín-Morales, M. Zamorano, I. Valverde-Palacios, G.M. Cuenca-Moyano, Z. Sánchez-Roldán, in: Handb. Recycl. Concr. Demo. Waste, Woodhead Publ. (2013) 270.
- [40] V. Corinaldesi, G. Moriconi. Constr. Build. Mater. **23**, 1 (2009) 289.
- [41] G.L. Vieira, D.C.C. Dal Molin, F.B. Lima, Eng. Civ. **19** (2004) 5.
- [42] C.S. Poon, Z.H. Shui, L. Lam. Constr. Build. Mater. **18**, 6 (2004) 461.
- [43] M. Behera, S.K. Bhattacharyya, A.K. Minocha, R. Deoliya, S. Maiti, Constr. Build. Mater. **68** (2014) 501.
- [44] J. Li, E.H. Yang, Cem. Concr. Compos. **78** (2017) 33.
- [45] M.S. de Juan, P.A. Gutiérrez, Constr. Build. Mater. **23**, 2 (2009) 872.
- [46] M. Martín-Morales, M. Zamorano, A. Ruiz-Moyano, I. Valverde-Espinosa, Constr. Build. Mater. **25**, 2 (2011) 742.
- [47] C. Ulsen, H. Kahn, G. Hawlitschek, E.A. Masini, S.C. Angulo, Waste Manage. **33**, 3 (2013) 656.
- [48] T. Le, S. Rémond, G. Le Saout, E. Garcia-Diaz, Constr. Build. Mater. **106** (2016) 35.
- [49] G. Dimitriou, P. Savva, M.F. Petrou. Constr. Build. Mater. **158** (2018) 228.
- [50] S. Levy, P. Helene, in: Anais VIII Enc. Nac. Tec. Ambient. Constr., S. Paulo (2004) 13.
- [51] S. Rocha, J. Sousa-Coutinho, Adv. Cem. Res. (2018) 1.
- [52] R.F.E. Pedrozo, J.C. Rocha, M. Cheriaf, in: Anais XII Enc. Nac. Tec. Ambient. Constr., Fortaleza (2008) 10.
- [53] A. Mueller, A. Schnell, K. Ruebner, Constr. Build. Mater. **98** (2015) 376.
- [54] S.C. Angulo, C. Ulsen, V.M. John, H. Kahn, M.A. Cincotto, Waste Manage. **29**, 2 (2009) 721.
- [55] P. Saiz Martínez, M. González Cortina, F. Fernández Martínez, A. Rodríguez Sánchez, J. Clean. Prod. **118** (2016) 162.
- [56] F. Agrela, P. Alaejos, M.S. De Juan, in: Handb. Recycl. Concr. Demol. Waste, Woodhead Publ. (2013) 304.
- [57] A. Coelho, J. De Brito, in: Handb. Recycl. Concr. Demo. Waste, Woodhead Publ. (2013) 210.
- [58] A. Ben Fraj, R. Idir, Constr. Build. Mater. **157** (2017) 952.
- [59] C. Alexandridou, G.N. Angelopoulos, F.A. Coutelieris, J. Clean. Prod. **176** (2018) 745.
- [60] L. Restuccia, C. Spoto, G.A. Ferro, J.M. Tulliani, Procedia Struct. Integr. **2** (2016) 2896.
- [61] F. Rodrigues, M. Teresa, L. Evangelista, J. De Brito, J. Clean. Prod. **52** (2013) 438.
- (Rec. 25/02/2018, Rev. 01/07/2018, 29/09/2018, 25/10/2018, Ac. 26/10/2018)