Traduzido do "?" para o Português - www.onlinedoctranslator.com

Materials Science

AIMS Materials Science, 8(6): 990–1004.
DOI: 10.3934/matersci.2021060
Recebido: 27 de outubro de 2021
Aceito: 16 de dezembro de 2021
Publicado: 23 de dezembro de 2021

http://www.aimspress.com/journal/Materials

Artigo de Pesquisa

Estudo de caso sobre a produção de blocos de concreto de alvenaria com CDW e resíduos de mineração de caulim

Felipe Bastos[1,2,*], Adeildo Cabral[2], Perboyre Alcântara[2] e Lino Maia[1,3,*]

[1] CONSTRUCT-LABEST, Faculty of Engineering (FEUP), University of Porto, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal
[2] Federal institute of education, science and technology of Ceará-IFCE, Avenue 13 de Maio, Ceará, Brazil
[3] Faculty of Exact Sciences and Engineering, University of Madeira, Campus da Penteada, 9020-105 Funchal, Portugal

*** Correspondência:**E-mail: fellipe.fbastos@gmail.com , linomaia@fe.up.pt.

Abstrato:A geração mundial de resíduos de construção e demolição é de cerca de 30% a 35% do total de resíduos sólidos produzidos anualmente. Além disso, a extração de minerais deixa um passivo ambiental de alto grau com rejeitos, como a argila caulim, sendo o Brasil um dos países com maiores depósitos e produção desse mineral no mundo. A extração da argila de caulim atende a diversas indústrias como cerâmica, louças, papel, entre outras. O objetivo deste trabalho é inserir esses dois resíduos como matéria-prima de elementos construtivos, especificamente blocos de concreto de alvenaria, dando fim aos resíduos, demonstrando seu potencial de reaproveitamento. Aqui, foram fabricados blocos com substituição de agregados naturais, pó de pedra e areia, por resíduos de construção e demolição e de resíduos de argila de caulim. Os percentuais de reposição foram de até 34% e 16%, respectivamente. Os blocos confeccionados com o procedimento de compactação por vibração pneumática apresentaram resistência além do estabelecido pela norma, dando assim uma perspectiva favorável de utilização desses resíduos como elementos construtivos.

Palavras-chave:CDW; bloco de concreto; construção; argila de caulim; resíduo

1. Introdução

A partir das primeiras décadas do século passado, muitos centros urbanos cresceram desordenadamente, devido à

promessa de empregos, melhorias nas condições de vida e migração da população de outras áreas em busca de oportunidades. E principalmente áreas periféricas e áreas pouco povoadas tornaram-se muito densas e, consequentemente, com infraestruturas inadequadas [1].

A necessidade de atender às demandas decorrentes do crescimento desordenado dos centros urbanos fez da construção civil uma das atividades de maior demanda de materiais. Tornando este setor uma das indústrias que mais impacta o meio ambiente. Construções sem o devido planejamento e fiscalização causam impactos ambientais consideráveis ao meio ambiente devido à geração excessiva de resíduos sólidos.

O Brasil é um país essencialmente urbano, com mais de 80% da população e a maioria das atividades econômicas instaladas em áreas urbanas. As cidades concentram grande parte da problemática das questões de gestão governamental. O poder público em todos os níveis de governo não tem conseguido intervir de forma eficiente na questão urbana. Apesar dessas dificuldades, a implementação de instrumentos, como o estatuto das cidades, tenta amenizar as dificuldades enfrentadas pelas grandes metrópoles. Apesar desses instrumentos e diretrizes serem aprovados por lei, o problema da gestão de resíduos ainda está longe de ser resolvido. Segundo Abrelpe [2], em 2019 a produção percapta brasileira de resíduos de construção e demolição (RCD) foi de 0,650 kg/habitante por dia.

A construção civil acaba acompanhando o ritmo de crescimento econômico e desenvolvimento das cidades e, consequentemente, gera altos índices de resíduos. Além de suprir o déficit habitacional, havia a necessidade de criar equipamentos urbanos como creches, escolas, hospitais, praças, além de áreas comerciais como shopping centers, para atender às necessidades cada vez mais exigentes da população.

Em outro cenário, não muito diferente, a extração de minerais e minérios para a fabricação de produtos industrializados utilizados como matéria-prima tem grande impacto no meio ambiente. As técnicas de extração acabam deixando resíduos que parte das vezes não são reaproveitados no processo que os gerou ou em qualquer outra indústria. Assim como o resíduo da extração do caulim, um dos principais minérios extraídos no mundo segundo o DNPM [3], o Brasil é um dos maiores produtores desse mineral com as principais jazidas localizadas nos estados da Paraíba, Rio Grande do Norte e Norte de Minas Gerais.

O caulim é um mineral associado ao pegmatito, que é uma variedade de rocha granítica em que há semelhança com a composição mineralógica, mas diferindo nos tamanhos dos minerais constituintes, que no pegmatito é anormalmente grande [4]. O caulim é um material argiloso com baixo teor de ferro, cor branca ou quase branca e granulometria fina. Chama-se feldspato os minerais constituídos por aluminossilicatos de potássio, sódio e cálcio, e o quartzo pode ser de origem primária (quartzitos) ou secundária (areias e arenitos) utilizados na cerâmica. As argilas, devido à sua plasticidade, influenciam na resistência mecânica das amostras quando passam de verde a seco. Na indústria de cerâmica branca e revestimentos, diversas formulações contendo matérias-primas são utilizadas para a obtenção de produtos como porcelanatos, louças sanitárias, azulejos e pisos cerâmicos.

O caulim é um produto que resulta do processo de transformação profunda de silicatos de alumínio, que podem ser feldspatos, plagioclásios e feldspatóides, que estão contidos nas rochas. Para que essa transformação ocorra, ocorre a hidrólise dos silicatos com solubilização de íons alcalinos e alcalino-terrosos na forma de carbonatos, permanecendo os silicatos de alumínio hidratados insolúveis, que cristalizam devido à alta temperatura e pressão [5]. O mineral caulinita, cuja fórmula é $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$, é o principal componente do caulim. Apresenta-se em uma massa compacta, terrosa, microcristalina, dureza 1,0 Mohr, peso específico 2,6 g/cm^{3}e baixo brilho.

De acordo com o resumo mineral [3], a mineração de caulim é processada manualmente sem

proteção coberta, ou seja, sem depósito coberto. O processamento passa pelas seguintes fases: primeiro peneiramento, depois passa por um processo de decantação e secagem, e depois é aquecido em forno a lenha. A lenha é retirada de árvores nativas do município, que são grandes e pequenas. Quando já processado, é transferido para o setor de qualificação, que é considerado bom, com baixo Fe_2O_3 conteúdo, e estes são destinados às indústrias cerâmicas. Quando não contém o mineral haloisita em sua composição, estes são destinados às indústrias de papel [3].

Como os métodos de exploração ainda são ineficientes, o caulim é extraído juntamente com materiais indesejáveis como quartzo, feldspato e mica moscovita. A separação do caulim desses materiais acaba deixando um alto índice de resíduos que muitas vezes são depositados próximo à própria planta de mineração.

Os resíduos gerados e descartados pelas indústrias processadoras de caulim localizadas nos municípios produtores entre os estados do Rio Grande do Norte e Paraíba (Brasil) afetam toda a comunidade do entorno. Normalmente, esses resíduos são retirados e colocados clandestinamente em terrenos baldios, nas margens dos rios e nas ruas dos bairros da periferia das cidades.

Resíduos de RCD e extração de caulim no Brasil são importantes passivos ambientais, pois são depositados em grandes volumes e muitas vezes estão sujeitos a disposição inadequada. Os impactos causados pela gestão inadequada de resíduos afetam o meio ambiente e a saúde das pessoas, comprometendo o bem-estar e, em longo prazo, até a sobrevivência da espécie humana [6].

Na busca por um produto que atendesse a necessidade simples e comum da construção civil, incorporamos o caulim e resíduos de RCD nos blocos de alvenaria, por se tratar de um elemento construtivo amplamente utilizado na construção de edificações.

Os diversos estudos sobre a utilização de resíduos no setor da construção civil vêm crescendo visivelmente nas últimas décadas, buscando aprimorar técnicas construtivas baratas e simples, sempre tendo uma visão sustentável para substituição de materiais convencionais [7]. Com essa expressiva expectativa, esses materiais propostos possuem alto potencial de uso para essa finalidade.

Resíduos de caulim têm sido utilizados em outras pesquisas [8] para substituir agregados na produção de tijolos cerâmicos e coberturas. Como o resíduo de caulim possui caulinita (um material pozolânico) em sua composição, os corpos de prova foram queimados em diferentes temperaturas. Os resultados mostraram que um resíduo composto por quartzo, caulinita e mica permite formulações com incorporação do resíduo em até 50% para a produção de tijolos e telhas cerâmicas. Outra pesquisa [9] mostrou que no caso da utilização do resíduo em substituição aos agregados miúdos do concreto, obtiveram-se resultados satisfatórios na proporção de 30%.

O uso de resíduos de caulim também é visto como substituto do cimento, pois há percentuais de caulinita na extração, que possui propriedades pozolânicas quando a caulinização é feita acima de 600 °C. Este fator encontra-se tanto na extração de resíduos mineiros como na escavação de infraestruturas marítimas em que os resíduos podem ser substitutos do cimento [10].

Agregados reciclados de entulhos de construção e resíduos de caulim possuem características físicas diferentes, como tamanho e formato do grão. Portanto, a introdução desses dois resíduos em substituição ao agregado convencional pode contribuir para a obtenção de misturas mais adequadas para a produção de blocos de concreto em máquinas pneumáticas.

Assim, a abordagem deste trabalho busca uma alternativa para a destinação técnica e ambientalmente adequada desses dois resíduos e, assim, colaborar para a redução desses impactos negativos. O ato de reciclar resíduos pode representar vantagens econômicas, sociais e ambientais, como economia na aquisição de matéria-prima, redução da poluição gerada pelos resíduos e preservação das reservas naturais de matéria-prima. O objetivo deste trabalho é produzir blocos de concreto de alvenaria com

agregados reciclados de RCD civil e resíduos de mineração de caulim para aplicação em elementos não estruturais. Aqui, analisamos comparativamente os aspectos físicos e mecânicos dos blocos obtidos com e sem a adição de agregados reciclados, observamos suas características de absorção de água, resistência à compressão, variação dimensional e de massa.

2. Materiais e métodos

2.1. Experimental program

A metodologia utilizada foi baseada no formato de pesquisa experimental comparativa, a fim de substituir os agregados naturais por resíduo de caulim na parte fina e ao mesmo tempo substituir a brita natural pelo CDW, em composições gerais de porcentagens de 15%, 25% e 35% fazendo assim uma análise comparativa dos índices físicos e resistência à compressão dos blocos.

O experimento foi realizado no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) do Instituto Federal do Ceará, campus Fortaleza, a produção dos blocos foi feita na empresa EcomatBrasil, que possui prensas pneumáticas de 6 bar e betoneira vertical de 320 L .

O cimento utilizado foi o comercial brasileiro tipo CPV-ARI com alta resistência inicial, pois apresenta alta reatividade e resistência em baixas idades dependendo do grau de moagem a que é submetido, proporcionando maior rendimento ao concreto, de acordo com a legislação brasileira. norma NBR 16697:2018 [11]. A água utilizada era potável fornecida pela Companhia de Abastecimento de Água e Esgoto (CAGACE).

O aditivo plastificante utilizado foi o Muraplast FK 320-MC. Ressalta-se que apenas no preparo do concreto foi utilizado aditivo na proporção de 0,25% em relação à massa de cimento, conforme recomendação do fabricante para uso em concreto e pré-moldados.

Os ensaios físicos e mecânicos dos materiais e dos blocos foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) do IFCE-Campus Fortaleza, Brasil.

Nos ensaios, foram seguidas as Normas Técnicas conforme descrito na Tabela 1. O processo de amostragem e redução de amostras de campo para ensaios, foram seguidas as recomendações das normas ABNT NM 26:2009 [12] e ABNT NBR NM 27:2001 [13] .

Tabela 1. Testes laboratoriais e as normas correspondentes.

Propriedade	Norma técnica	Testado em
Unidade de massa	NBR NM 45/2006	Agregados
Massa específica	NBR MN 52/2009	Agregados
absorção de água	NBR NM 30/2000	Agregados
Material em pó	NBR NM 46/2003	Agregados
Granulometria	NBR 7211/2009	Agregados
Estabilidade dimensional	NBR 6136/2014	blocos
Compressão de variação	NBR 6136/2014	blocos

Os equipamentos utilizados para a produção dos blocos consistiam basicamente em uma betoneira inclinada de 320 L, com eixo de concreto, uma máquina de vibroprensagem Modelo Atlantimaq E321 ACP Pneumática até 6 bar de pressão, máquina esta com motor de 2 hp para vibração da forma (Figura 1). O procedimento de fabricação dos blocos foi colocar o concreto na máquina a cada mistura

determinou, com auxílio de espátula e pá para preenchimento da fôrma, uma espera da vibração para compactação de 30 s por ciclo, para aplicar a prensagem pneumática, produzindo 3 blocos por ciclo. Este tempo é suficiente para dar uma boa compactação aos blocos produzidos, sendo o padrão utilizado pelas fábricas conforme determinado por Fernandes na Ref. [14].

Figura 1.Máquina pneumática utilizada na fabricação de blocos de concreto.

2.2. Formulação das misturas utilizadas

As composições de mistura projetadas foram planejadas de forma a atingir os parâmetros estabelecidos pela norma brasileira NBR 6136/2014 [15], em especial, o valor mínimo da resistência à compressão característica para os blocos Classe C para venda, que é de 3 MPa. Não existe um padrão comum de composição da mistura na literatura, mas o tipo de compactadora a ser utilizada influencia diretamente no consumo de cimento [14]. Uma correlação entre o teor de umidade do concreto seco e o uso de máquinas com alto poder de compactação (hidráulicas) com o mesmo teor de umidade é possível ter uma resistência maior do que em equipamentos manuais e pneumáticos, pois há redução de vazios. Assim, foi necessário observar aspectos relacionados à composição da mistura de agregados, teor de umidade e processo de fabricação e cura.

Mesa 2. Percentual de reposição agregada.

Composição	Substituição de agregados finos por resíduos de caulim	Substituição de agregado grosso por CDW
Mistura 0	0%	0%
Mistura 1	5%	10%
Mistura 2	8%	17%
Mistura 3	12%	23%

Foi utilizado o aditivo plastificante multifuncional de presa normal (Muraplast FK 320) do fabricante MC-Bauchemie Brasil, na proporção de 0,25%, respeitando a relação água/cimento adequada para a moldagem dos blocos. A relação cimento/agregado (1:6) em volume, sendo a relação 1:4:2 (1 cimento; 4 pó de pedra; 2 brita) foi a mesma da primeira etapa,

exceto para substituição de areia. A Tabela 3 mostra as proporções de mistura usadas com a máquina de vibração pneumática.

Tabela 3. Descrição das proporções da mistura por volume utilizada na fabricação dos blocos.

	Mistura 0	Mistura 1	Mistura 2	Mistura 3
Cimento	1	1	1	1
Pó de pedra	4	3.80	3.68	3.52
Resíduos de caulim	-	0.20	0.32	0.48
Cascalho triturado	2	1.80	1.66	1.54
Const.	-	0.20	0.34	0.46
Relação água c/c	0.55	0.55	0.55	0.55
Aditivo plastificante	50 mL	50 mL	50 mL	50 mL

Durante a cura do concreto, evitou-se a evaporação da água utilizada na mistura do concreto e, assim, garantiu-se a hidratação dos componentes do cimento. Esses cuidados são ainda mais importantes para a fabricação de materiais pré-moldados, como os blocos de concreto, cujos concretos possuem uma relação a/c inferior aos concretos convencionais. Para otimizar o processo de cura dos blocos nesta etapa, também foi utilizada a folha plástica preta para chuva para evitar a evaporação prematura da água, ficando os blocos molhados e cobertos por 7 d após a data de fabricação.

Durante a cura do concreto, evitou-se a evaporação da água utilizada na mistura do concreto e, assim, garantiu-se a hidratação dos componentes do cimento. Esses cuidados são ainda mais importantes para a fabricação de materiais pré-moldados, como os blocos de concreto, cujos concretos possuem uma relação a/c inferior aos concretos convencionais. Para otimizar o processo de cura dos blocos nesta etapa, também foi utilizada a folha plástica preta para chuva para evitar a evaporação prematura da água, ficando os blocos molhados e cobertos por 7 d após a data de fabricação.

3. Resultados

3.1. Resíduos de construção e demolição

Ao determinar a composição do resíduo, assumiu-se que este não poderia apresentar impurezas que pudessem afetar o desempenho dos blocos de concreto, como papel, papelão, madeira, metal, vidro e gesso. Essa triagem é feita dentro da planta quando o caminhão chega com os resíduos e preparado para a britagem. Portanto, esses materiais foram descartados no processo de separação e caracterização da amostra.

A composição da caracterização visual foi feita pelo método de quartel, seguindo o procedimento da NBR16915:2021 [12] e procedimento da NBR 27:2001 [13] para ensaios laboratoriais. No entanto, para a caracterização visual, foi considerado 1 kg de RDC e peneirado em peneira de 4,8 mm, sendo descartado o material de passagem. O material caracterizado foi apenas o material retido nesta granulometria, pois pela NBR NM248:2001 [14]—Agregado cujos grãos passam por uma peneira com abertura de malha de 75 mm e permanecem retidos na peneira com abertura de malha de 4,8 mm, eles são caracterizados como grosseiros. Neste trabalho, essa granulometria foi utilizada para substituir agregados graduados por agregados CDW. Conforme mostra a Figura 2, os materiais com maior percentual no agregado reciclado são o concreto e a argamassa.

Figura 2. Composição do CDW por caracterização visual.

3.2. Composição do resíduo de caulim

Na fabricação dos blocos, foram utilizados apenas resíduos de caulim da primeira etapa, o chamado material birra com granulometria do material retido da peneira de 4,8 mm, a ser ajustado para a fabricação dos blocos. Este material é composto principalmente por caulinita, muscovita e feldspato de acordo com a análise química já feita por Menezes na Ref. [16] para este material retirado da Mineradora Brasil Mineiro.

A composição dos minerais do resíduo de caulim, segundo a empresa de extração, cerca de 70% do minério extraído é resíduo que é separado em dois processos durante a extração do caulim. Para a caracterização visual, foi realizado o mesmo procedimento do CDW, referente ao estremecimento e separação de 1 kg do material. A Figura 3 apresenta a composição mineral do resíduo de caulim utilizado.

Figura 3. Composição visual do resíduo de caulim por caracterização visual.

Ressalta-se que, embora o resíduo de caulim possua caulinita em sua composição, no presente estudo não foi realizada a calcinação do resíduo para beneficiar as propriedades pozolânicas da caulinita.

Os autores decidiram não realizar o processo de calcinação porque este (sem calcinação) era apenas o objetivo desta pesquisa exploratória onde a adição deste resíduo foi incorporada com um máximo de 23%. Para futuros trabalhos de pesquisa e para a produção em larga escala de blocos com altos percentuais de resíduos de caulim, o processo de calcinação deve ser profundamente avaliado especialmente para as análises econômicas e de sustentabilidade.

3.3. Caracterização física de agregados

Os materiais foram ensaiados de acordo com a NBR 45/2006 [17] que tem por finalidade utilizar a transformação de massa para volume com vazios entre os grãos agregados. A massa unitária também serve como parâmetro para classificar o agregado em termos de densidade [18].

A massa específica dos agregados utilizados na fabricação dos blocos foi realizada conforme determinado pela NBR NM 52 [19], que define a massa específica como a razão entre a massa seca do agregado e seu volume, excluídos os poros permeáveis.

A absorção de água para agregados miúdos foi feita seguindo NM 30 [20]—Determinação da absorção de água para agregados miúdos. De acordo com a determinação da NBR NM 46 [21] e a determinação da quantidade de material pulverulento pela NBR 7211 [22] para materiais pulverulentos, estes são definidos como partículas minerais com dimensão inferior a 0,075 mm, incluindo materiais solúveis em água, presentes nos agregados. A Tabela 4 descreve a porcentagem de materiais pulverulentos utilizados e apresenta a determinação da absorção de água dos materiais utilizados.

Tabela 4. Caracterização física massa unitária, massa específica e absorção de agregados e porcentagem de finos dos materiais utilizados na fabricação dos blocos de concreto.

Agregar	Massa específica a granel (g/cm^3)	Massa específica (g/cm^3)	Absorção de água (%)	Porcentagem de multas (%)
Pó de pedra	1.43	2.62	0.97	10.5%
Cascalho	1.40	2.66	0.85	0.98%
Resíduos de Caulim	1.35	2.63	0.26	4.06%
CDW	1.41	2.37	4.68	7.05%

3.4. Correção granulométrica

As correções de tamanho de partícula podem ser feitas para diferentes finalidades, a fim de obter um produto final mais adequado para diferentes aplicações [23]. No caso em estudo, foi feito com o objetivo de corrigir a granulometria para se adequar aos limites das curvas sugeridas para blocos de concreto, propostas por Fernandes na Ref. [14]. Dessa forma, as linhas utilizadas no experimento foram ajustadas de acordo com as faixas granulométricas da Figura 4. A curva vermelha é a representação das pinceladas feitas de 1:2:4 para todas as pinceladas com porcentagem de reposição. Percebe-se que todas as curvas com os percentuais se sobrepõem com pequenas variações entre os percentuais de reposição. Assim, é possível verificar que a mistura de agregados, para todas as adições de resíduos, está dentro dos limites sugeridos por Fernandes na Ref. [14], para a fabricação de blocos de concreto.

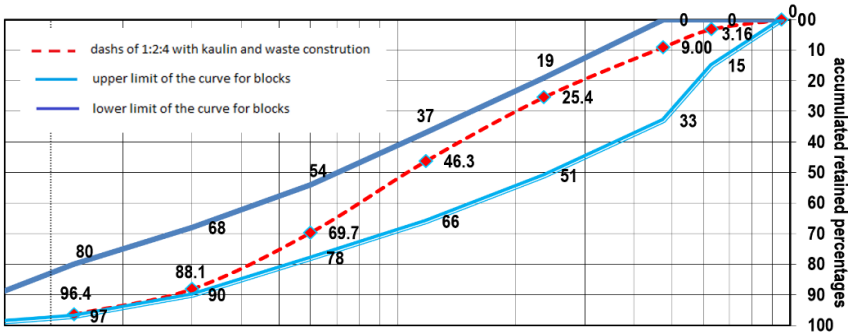

Figura 4. Distribuição do tamanho de partícula do agregado CDW.

3.5. Determinação da absorção de água dos blocos

Para determinar se houve variação na absorção de água dos blocos conforme determinado pela NBR 12118/2013 para blocos individuais de acordo com a NBR 6136/2014 [15], houve a separação das amostras para o ensaio de absorção, conforme determinado pelo procedimentos da NBR 61636/2014 [15], sendo os seguintes resultados de absorção obtidos na Tabela 5.

Tabela 5. Absorção de água dos blocos.

Tipo de bloco	Peso do bloco seco (kg)	Bloco úmido	Umidade (%)
Mistura 0	8.07	8.69	7.07
Mistura 1	8.5	9.09	6.50
Mistura 2	8.2	8.84	7.14
Mistura 3	8.01	8.64	7.34

3.6. Análise dimensional e aparência de blocos

As medidas, textura e aparência dos blocos foram medidas nominais e reais e verificadas dentro da padronização determinada pela norma brasileira NBR 6136/2014 [15], que estabelece as medidas padrão e classificação para blocos de alvenaria do tipo vedação 10 × 40. Em Na Figura 5 é possível verificar a textura e cor dos blocos com os resíduos.

Figura 5. Aparência de blocos de concreto.

As dimensões reais, textura e aparência dos blocos estavam dentro da padronização

determinado pela norma brasileira NBR 6136/2014 [15]. Em relação à análise dimensional, a Tabela 6 apresenta os dados médios de 9 amostras para largura, altura, comprimento, espessura de parede e espessura mínima equivalente dos blocos produzidos a partir de Mix 0, Mix 1, Mix 2 e Mix 3.

Tabela 6. Análise dimensional dos blocos.

Tipo de bloco	Largura (milímetros)	Altura (milímetros)	Comprimento (milímetros)	Área (mm^2)	Min. espessura das paredes (mm)	Min. equivalente espessura (mm/m)
Mistura 0	90.05	189.00	389.00	35029.45	18	135
Mistura 1	90.33	189.00	389.00	35139.67	18	135
Mistura 2	89.67	188.67	389.67	34940.11	18	135
Mistura 3	90.00	189.00	388.67	34980.00	18	134

As tolerâncias permitidas nas dimensões dos blocos são ±2,0 mm para a largura e ±3,0 mm para a altura e para o comprimento em relação à dimensão nominal padrão (90 × 190 × 390 mm). Com isso, os blocos abrangentes estão dentro dos limites dimensionais atualizados em padrão. Esta análise é importante para verificar se devido a incorporação de resíduos nos blocos foi alterada por uma eventual propriedade de dilatação ou retração excessiva dos agregados utilizados, ponto de alteração das dimensões padrão.

3.7. Resistência à compressão do bloco

O procedimento inicial de resistência à compressão dos blocos ocorreu após 14 dias de cura. Os blocos fabricados foram testados quanto à ruptura em prensa de compressão hidráulica Modelo EMIC série 23 (Figura 6).

Figura 6. Testando a resistência à compressão do bloco na máquina modelo EMIC série 23.

Foi aplicado um rejunte nivelador das imperfeições conforme determinado pelas normas da norma brasileira NBR 6136/2014 [15]. Os valores de resistência à compressão dos Blocos 1 a 6, testados aos 14 d, são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7. Resistência à compressão registrada nos blocos testados (MPa).

	Idade	Mistura 0	Mistura 1	Mistura 2	Mistura 3
Bloco 1	14 dias	3.5	7.1	3.3	4.2
Bloco 2		2.3	4.6	4.2	6.1
Bloco 3		3.5	6.9	2.3	4.7
Bloco 4		4.5	4.6	3.3	4.5
Bloco 5		3.0	5.6	4.2	4.4
Bloco 6		4.7	6.4	3.1	3.7
Bloco 7	28 dias	4.5	5.1	3.3	3.3
Bloco 8		4.2	7.3	4.2	4.2
Bloco 9		3.0	5.0	5.3	6.1
Bloco 10		4.5	6.9	5.3	4.7
Bloco 11		5.0	7.0	4.2	4.6
Bloco 12		5.5	6.7	3.3	4.3

Aos 28 d houve outro teste de resistência à compressão com o mesmo procedimento de capeamento. Os valores de resistência à compressão dos Blocos 7 a 12, testados aos 28 d, são apresentados na Tabela 7. A Figura 7 apresenta graficamente a resistência média à compressão nas idades de 14 e 28 d com as barras de erro de desvio padrão correspondentes para todas as misturas.

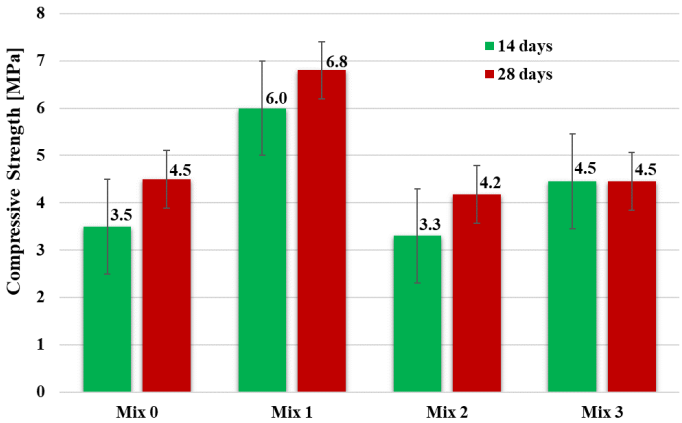

Figura 7. Resistência à compressão (média) nas idades de 14 e 28 d.

Conforme determinado pela norma brasileira NRR 6136/2014 [15], as médias da resistência à compressão dos blocos devem ser expressas pela resistência característica (f_{bk}). Determinação da resistência característica, que segundo Fernandes [14] é uma espécie de valor líquido, polido, onde são levados em conta possíveis erros no processo produtivo. Este procedimento é mais confiável do que a média de rompimentos de blocos. O cálculo dos valores de resistência característica dos blocos 14-d e 28-d são apresentados na Tabela 8, considerando os valores estabelecidos de Ψ da norma brasileira NBR 6136/2014 [15] para uma quantidade mínima de 6 blocos. Analisando a Tabela 8, é possível verificar que todos os tipos de blocos obtiveram resistência à compressão acima de 3 MPa os quais são classificados como blocos de vedação. Os blocos com 28 d de Mix 1 tiveram os maiores resultados, mas por questões econômicas e ambientais para esta finalidade de utilização dos blocos, podem ser aplicados os utilizados com maior percentual de Mix 3.

Tabela 8. Resistência característica do bloco em 14 e 28 d.

Bloquear	f_{bk14d}(MPa)	f_{bk28d}(MPa)
Mistura 0	3.04	4.08
Mistura 1	5.78	6.25
Mistura 2	3.02	3.98
Mistura 3	4.01	3.99

4. Discussão

4.1. Análise de blocos produzidos

As misturas percentuais desses dois resíduos mostram que é possível substituir o agregado convencional por agregado reciclado CDW e caulim mesmo com um percentual de 35%, sem perda significativa de resistência mecânica em relação à mistura com agregados convencionais e também mantendo adequada a características dimensionais e de absorção de água dos blocos. Esse percentual é bastante significativo, pois na produção em larga escala haveria um uso considerável desses materiais.

As misturas com maior teor de resíduo apresentaram valores característicos de resistência à compressão de aproximadamente 4,0 MPa na idade de 28 d, muito além do mínimo exigido pela norma para blocos Classe C para blocos de vedação, este tipo de resistência é classificado como Estrutural Classe C e no limite inferior da Classe B ($4,0 < f_{bk} < 8.0$) ou seja, bloco com função estrutural.

No entanto, o percentual mais adequado para as características analisadas, levando em consideração a resistência mecânica, foi de 15% do resíduo que atingiu a maior resistência característica ($f_{bk} = 6,2$). A incorporação de material e provavelmente um melhor arranjo das partículas na Mistura 1, fez com que ela tivesse maior peso em relação às demais misturas, demonstra que houve uma baixa taxa de absorção de água dos blocos e um alto índice de resistência à compressão. Esse melhor arranjo e acomodação das partículas compactadas no Mix 1 levam à diferença na porcentagem de absorção do bloco que é de 6,5%. Deve-se levar em consideração que o resíduo de caulim também possui muscovita que é um material de dureza muito baixa, em altas porcentagens pode prejudicar o concreto das misturas.

A média entre as misturas de Mistura 0, Mistura 2 e Mistura 3 demonstra que não houve variação na taxa de absorção de água, peso seco e resistência à compressão. Não houve dispersão significativa em termos relativos do valor médio entre as misturas propostas e a mistura de referência (Mix 0).

Assim, para todas as porcentagens analisadas, as misturas ainda puderam ser otimizadas, inclusive com a possibilidade de redução do consumo de cimento para a produção de blocos que atendam aos requisitos mínimos da Classe C. O estudo, de forma geral, indica que o resíduo analisado poderia ser reaproveitado como potencial matéria-prima, nos aspectos técnico, econômico e ambiental, dando uma perspectiva positiva para a utilização de agregados de RCD reciclados, misturados com resíduos de caulim para a produção de blocos de concreto sem função estrutural. No entanto, é fato que atualmente o reaproveitamento de materiais para construção civil na forma de agregados ainda está majoritariamente no campo da pesquisa e há pouca ousadia em fazer substituições em larga escala de materiais naturais. Apesar dos aspectos legais, há de certa forma uma aparente acomodação do setor,

Para dar continuidade e viabilizar o aproveitamento desses resíduos para outros fins da construção, seria necessário realizar estudos de aplicação desses materiais, ampliando assim o leque de opções para esses resíduos, como:

- Aplicação de resíduos em pisos intertravados para pavimentação.
- Utilização de outras proporções e percentagens de aplicação para os blocos de vedação.
- Concreto para nivelamento de pisos e contrapisos.
- Aplicação em elementos vazados e outros artefatos cimentícios como balaústres, meio-fio e parede de concreto pré-moldado.
- Utilização da mistura da peça com granulometria fina para argamassas.

As alternativas para aplicação desses resíduos são diversas, desde que sejam respeitadas as normas e procedimentos técnicos, visando tanto a responsabilidade técnica quanto questões de viabilidade de comercialização desses materiais. As alternativas sugeridas apontam para uma possibilidade de inovação tecnológica aliada à preocupação em estabelecer materiais sustentáveis com alternativas construtivas.

5. Conclusões

No levantamento bibliográfico constatou-se que diariamente são gerados grandes volumes de RCD e grande parte é descartada de forma irregular e a reciclagem não chega nem a 10% do volume gerado. Com base nas alternativas de reciclagem de resíduos na forma de agregados, a decisão de mesclar os dois materiais (resíduos de CDW e caulim) foi importante, pois há uma grande demanda pelo desenvolvimento de soluções ambientalmente adequadas para a disposição desses resíduos. Por outro lado, até o presente momento, não foram encontrados trabalhos na literatura pesquisada que desenvolvessem uma alternativa de reaproveitamento envolvendo o uso simultâneo dos dois resíduos analisados.

A composição gravimétrica dos agregados reciclados obtidos por meio de análise visual indicou que o agregado CDW possui 65% de concreto, 20% de argamassa, 7% de cerâmica, 5% de telhas e 3% de outros materiais. Enquanto o resíduo de caulim possui 83% de quartzo, 13% de moscovita e 4% de caulinita. Mesmo com a presença de mica e resíduos cerâmicos nas quantidades observadas, foi possível produzir os blocos dentro dos padrões da norma técnica de referência. Ressalta-se que este é um aspecto positivo, pois a separação desses materiais tornaria o processo mais caro e, em algumas situações, inviável devido à demanda dos materiais utilizados no processo de fabricação dos blocos.

No entanto, observou-se que o tipo de agregado reciclado de resíduos mistos da construção civil utilizado apresenta características e índices físicos diferentes dos agregados apenas do tipo cerâmico ou apenas do tipo cinza, contendo argamassa, concreto e blocos de concreto.

Em relação às propriedades físicas dos agregados reciclados, os índices analisados apresentaram valores adequados para a utilização de materiais na forma de agregados. A absorção relativamente alta observada no CDW de 4,68% não se mostrou um fator limitante para o preparo das dosagens e produção das amostras. Em relação à granulometria, foi possível, com a mistura de agregados, estabelecer curvas granulométricas dentro da faixa ideal para a produção de blocos. Isso se mostrou não ser um fator limitante na perda de plasticidade na produção de blocos.

A aplicação do caulim no setor da construção é de extrema importância, pois esta matéria-prima é utilizada em diversos setores. O processo de extração do caulim deixa resíduos da ordem de quase 60%. Com esta pesquisa exploratória, demonstrou-se que existem possibilidades de usos para este material que algumas vezes vai para aterros ou áreas de descarte. Blocos de alvenaria para civis

A aplicação na construção demonstra certa viabilidade, tanto na substituição de agregados como de cimento.

Agradecimentos

Agradecimentos à CAPES, pelo apoio financeiro às empresas RECICLO pelo fornecimento dos Resíduos da Construção Civil processados e à empresa Brasil Minério pelo fornecimento dos resíduos de caulim para o desenvolvimento deste trabalho. Este trabalho foi financiado por: Base Funding—UIDB/04708/2020 do CONSTRUCT—Instituto de I&D em Estruturas e Construções—financiado por fundos nacionais através do FCT/MCTES (PIDDAC). Este trabalho foi financiado por fundos nacionais através da FCT—Fundação para a Ciência e a Tecnologia, IP, no âmbito do Concurso Científico Estímulo ao Emprego–CEECINST/00049/2018.

Conflito de interesses

Todos os autores declaram não haver conflitos de interesse neste artigo.

Referências

1. Goldemberg J, Agopyan V, John VM (2011)*O desafio da Sustentabilidade na Construção Civil*, 1 Ed., São Paulo: Blucher, 19–61.
2. Abrelpe, Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, 2019. Disponível em: https://abrelpe.org.br/download-panorama-2018- 2019/.
3. Brasil. Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) (2012)*Sumário Mineral 2010*, Disponível a partir de: https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/dnpm/sumarios/sumario-mineral-2010.
4. Popp JH (1995)*Geologia Geral*, 4 Eds., Rio de Janeiro RJ: Technical and scientific books publisher.
5. Biffi G (1997)*Manual de Fabricação e Técnicas de Uso do Porcelanato Grés*, Itália: FaenzaEditriceEditorialGroup, 312. Disponível a partir de: http://bibuxelles.hiposter.ru/book/il_gres_porcellanato_manuale_di_fabbrificazione_and_tecniche_di_impiego_92173-free_download.html.
6. Hood RS (2006) Análise da viabilidade técnica da utilização de resíduos de construção e demolição como agregado miúdo reciclado em blocos de concreto para pavimentação [Dissertação]. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (in Portuguese). Available from: https://lume.ufrgs.br/handle/10183/12112.

Hendriks CF, Nijikerk AA, van Koppen AE (2007)*O ciclo da construção*, 2Eds., Brasília: Universidade de Brasilia.

8. Menezes RR, Farias FF, Oliveira MF, et al. (2009) Resíduos de beneficiamento de caulim aplicados na fabricação de revestimentos cerâmicos e corpos de mulita.*Resíduos Gerenciar Res*27: 78–86.
9. Seeni A, Selvamony C, Kannan SU, et al. (2012) Estudo experimental de substituição parcial de agregado miúdo por material residual das indústrias de argila da China.*sorvete*2: 167–171.

10. Du H, Pang SD (2018) Utilização de valor agregado de argila marinha como substituto de cimento para produção sustentável de concreto. *J Clean Prod*198: 867–873.
11. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2018) Portland cement with high initial strength CPV-5. Portland cement–Requirements. ABNT NBR 16697. Available from: https://www.normas.com.br/produto/normas-brasileiras-e-mercosul/pesquisar.
12. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2021) Aggregates sampling. ABNT NBR 16915,1Ed.Availablefrom: https://www.normas.com.br/produto/normas-brasileiras-e-mercosul/pesquisar.
13. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2021) Aggregates—Reducing field samples to laboratory test size. NM 27: 2001. Available from: https://www.normas.com.br/produto/normas-brasileiras-e-mercosul/pesquisar.
14. Fernandes ID (2016)*Blocos e Pavers—Produção e Controle de Qualidade*, São Paulo: Treino Assessoria e Formação, 4 Eds.
15. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2016) Hollow concrete blocks for concrete masonry–Requirements. ABNT NBR 6136: 2014. Available from: https://www.normas.com.br/produto/normas-brasileiras-e-mercosul/pesquisar.
16. Menezes RR, de Araújo Neves, G, Ferreira HC, et al. (2002) Reciclagem de resíduos da indústria de granito da região nordeste do Brasil.*Manag Environ Qual*13: 134–141.
17. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2009) Determination of aggregates–Determination of unit mass and void volume. NBR 45:2006, 4 Eds. Available from: https://www.normas.com.br/produto/normas-brasileiras-e-mercosul/pesquisar.
18. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (1982) Aggregates in loose state–Mass determination.NBR7251,2Eds.Availablefrom: https://www.normas.com.br/produto/normas-brasileiras-e-mercosul/pesquisar.
19. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2009) Fine aggregate determination of specific mass and specific mass. NBR NM 52, 2 Eds. Available from: https://www.normas.com.br/produto/normas-brasileiras-e-mercosul/pesquisar.
20. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2000) Fine aggregate determination of water absorption. NBR NM 30, 2 Eds. Available from: https://www.normas.com.br/produto/normas-brasileiras-e-mercosul/pesquisar.
21. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2003) Fine aggregate determination of fine material that passes through the 75 μm sieve, by washing. NBR NM 46, 2 Eds.
22. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2009) Aggregates for concrete–Specification. ABNT NBR 7211:2009, 2 Eds. Available from: https://www.normas.com.br/produto/normas-brasileiras-e-mercosul/pesquisar.
23. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2003) Aggregates—Sieve analysis of fine and coarse aggregates. NBR NM 248: 2003. Available from: https://www.normas.com.br/produto/normas-brasileiras-e-mercosul/pesquisar.

AIMS Press

© 2021 o(s) autor(es), licenciado AIMS Press. Este é um artigo de acesso aberto distribuído sob os termos da Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0)