

COMPORTAMENTO MECÂNICO DE ALVENARIAS DE TERRA COM RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

MECHANICAL BEHAVIOR OF EARTH MASONRY WITH CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTE

SOFIA ARAUJO LIMA BESSA, Dra. | UFMG
TIAGO AUGUSTO GONÇALVES MELLO | UFMG
BÁRBARA RODRIGUES BELO | UFMG
MARIANA ALVES MIRANDA | UFMG
ROBERTO PINTO OSÓRIO | UFMG
AUGUSTO CESAR DA SILVA BEZERRA, Dr. | CEFET-MG

RESUMO

Cerca de 60% de todo o resíduo sólido gerado no país provem das atividades do ramo da construção civil, cerca de 45 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição (RCD) por ano. É viável utilizar o RCD na fabricação de componentes ecoeficientes e a mescla do material com a terra apresenta-se como uma das possibilidades. Contudo, os estudos que analisam o comportamento dos componentes em terra em sistemas construtivos ainda são incipientes e carecem de maior aprofundamento, principalmente quando há o uso de resíduos. O objetivo deste artigo foi investigar o comportamento mecânico de blocos e de alvenarias de terra comprimida produzidos com RCD e estabilizados com dois tipos de cimento, a fim de avaliar a compatibilidade entre esses materiais. Avaliou-se a resistência à compressão axial, o índice de absorção e a durabilidade de corpos de prova, além do comportamento mecânico de prismas contrafiados de alvenaria produzidos com RCD. Os resultados mostraram que o cimento pozolânico não apresentou compatibilidade com os demais materiais mas que os resultados mecânicos obtidos pelos prismas atestaram a compatibilidade entre o solo utilizado, o RCD e o cimento CPV na produção de BTCs para alvenarias de vedação.

PALAVRAS CHAVE: Blocos de terra comprimida, Resíduos de construção e demolição, Durabilidade, Prismas de alvenarias

ABSTRACT

Around 60% of all solid waste generated in Brazil comes from the activities of the construction industry, about 45 million tons of construction and demolition waste (CDW) per year. It is feasible to use the CDW in the manufacture of eco-efficient components and the mixing of the material with the earth presents itself as one of the possibilities. However, studies that analyze the behavior of components on land in construction systems are still incipient and need further study, especially when there is the use of waste. The objective of this article was to investigate the mechanical behavior of compressed earth blocks (CEB) and masonry produced with CDW and stabilized with two types of Portland cement, in order to evaluate the compatibility between these materials. The axial compressive strength, the absorption index and the durability of specimens were evaluated, as well as the mechanical behavior of masonry prisms produced with CDW. The results showed that the pozzolanic cement was not compatible with the other materials but that the mechanical results obtained by the prisms show the compatibility between the soil used, the CDW and the CPV cement in the production of CEB for sealing masonry.

KEY WORDS: Compressed earth blocks, Construction and demolition waste, Durability, Prisms of masonry



1. INTRODUÇÃO

Os avanços tecnológicos e a lógica da produção em larga escala, num mundo cada vez mais urbanizado, têm sido acompanhados de um processo de extrema agressão ao meio ambiente com altos índices de geração de resíduos e de rejeitos e o lançamento de gases poluentes na atmosfera, com destaque para os compostos orgânicos voláteis – COVs. Diversos setores estão envolvidos e são responsáveis, em diferentes níveis, por esses acontecimentos (MELO et al., 2011; CONTRERAS et al., 2016; LOURENÇO et al., 2017).

Sabe-se que, em todo o mundo, a indústria da construção civil figura como um seguimento de expressiva contribuição no que tange ao desenvolvimento econômico. No Brasil, mesmo em períodos de recessão, as atividades desse domínio detêm grande relevância, com produção correspondente a cerca de 6% em relação ao PIB (CBIC, 2018). Contudo, o setor é, também, um dos mais paradoxais quando se comparam os seus benefícios aos impactos causados.

Os resíduos gerados nas atividades de construção e demolição, por exemplo, são responsáveis por grandes impactos ambientais. Segundo o último panorama da situação dos resíduos sólidos no Brasil, relativo ao ano de 2017, em torno de 62% de todo o resíduo sólido gerado no Brasil teve como origem as atividades de construção e de demolição, o que equivale a, aproximadamente, 45 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição (RCD) gerados por ano num total 71,6 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos. Os dados apontaram um total de 123 mil t/dia de RCD, sendo cerca de 64 mil t/dia coletadas apenas na região Sudeste (51,75%), embora as estimativas possam variar devido aos descartes ilegais (BARBIERI et al., 2010; ABRELPE, 2017).

Em consequência dessa tendência, nos últimos anos, a legislação brasileira tem se alinhado ao gerenciamento integrado dos resíduos. Desde 2002, diretrizes para a gestão de RCD estão disciplinados pela resolução nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente, legislação que se tornou norteadora de outras mais recentes e em diferentes esferas do poder público (CONAMA, 2002).

É possível a aplicação do material na cadeia produtiva das atividades de construção. No Brasil, muitos pesquisadores já investigaram os danos da alta geração de RCD e buscaram incorporá-lo em diversos materiais no ciclo da construção civil (GOMES et al., 2015; MESQUITA et al., 2015; SANTOS et al., 2015; CONTRERAS et al., 2016; SILVA & ANDRADE, 2017; ANDRADE et al., 2018).

É viável, ainda, utilizar o RCD na fabricação de componentes ecoeficientes, por meio da sua associação a materiais que causam menor impacto ambiental, pois soluções

que priorizam a racionalização e o uso sustentável dos recursos naturais e o adequado manejo de resíduos são, além de benéficas, uma necessidade contemporânea real e urgente. A mescla do material com a terra é uma das possibilidades (SECO et al., 2018).

A “arquitetura e construção com terra” é a expressão utilizada para definir todas as técnicas com o uso do solo em sua forma natural, sem nenhum tipo de processamento que altere seu perfil mineralógico. Sabe-se que, nessas condições, a terra serviu como material de construção, em diversas escalas de predominância, na consolidação de antigas civilizações, como a Mesopotâmia, o Egito e Roma (MENDES et al., 2011).

No Brasil, as técnicas construtivas com terra foram introduzidas no período colonial, provenientes da influência luso-africana, sendo muitas as cidades e os edifícios construídos com adobe e taipa (MENDES et al., 2011). Além dos antigos edifícios, estimativas de Piattoni et al. (2011) e Minke (2015) apontaram que, hodiernamente, ao menos 40% da população mundial habita ou trabalha em edificações construídas com terra.

A ínfima normatização no Brasil para a fabricação de componentes à base de terra, restrita, até então, à coleção de normas para fabricação e análises tecnológicas de blocos de solo-cimento, colabora para o desestímulo ao uso das técnicas não abarcadas, o que gera bloqueios quanto à investigação contemporânea, e potencializa a noção de passado associada a elas.

Sob perspectiva mundial, observa-se que, ao longo dos últimos cinquenta anos, uma das tecnologias com uso de terra que mais tem sido aprimorada é a dos blocos de terra comprimida (BTC) e que vem sendo cada vez mais utilizada em países como a Austrália e os Estados Unidos (MOREL et al., 2007). As pesquisas sobre a incorporação de resíduos ao BTC têm evoluído na última década, sejam estes estabilizados com o cimento (BUSON, 2009; LIMA et al., 2012; JIMÉNEZ & IZAGUIRRE, 2016) ou com a cal (GUTIERREZ et al., 2014; FRANÇA et al., 2018). Todavia, os estudos que analisam a durabilidade dos BTC ainda são incipientes e carecem de maior aprofundamento, principalmente quando há o uso de resíduos minerais, como o RCD.

As construções estabilizadas de terra podem fornecer respostas para enfrentar as dificuldades das construções modernas em termos sociológicos e econômicos. No entanto, a dificuldade de entender e prever seu comportamento a longo prazo ainda representa um obstáculo à sua disseminação. Mais especificamente, durante a sua vida útil, as paredes de terra têm que enfrentar variações importantes de umidade relativa interior e exterior. O uso

BTCs pode ajudar nessa regulação, mas ainda assim podem apresentar fissuras, lixiviação e descamação na presença de água (MURTA et al., 2010; CHAMPIRÉ et al., 2016; HELSON, et al., 2018).

A reciclagem do RCD faz parte da estratégia de gestão do município de Belo Horizonte desde o início dos anos 90 (PBH, 2018). A cidade conta com um maquinário que processa o resíduo em diferentes granulometrias, a fim de gerar produtos para aplicações distintas. Essas medidas visaram a diminuição da deposição de RCD em locais inadequados na malha urbana e a consequente valorização comercial desses resíduos. Todavia, os materiais originados da reciclagem do RCD em Belo Horizonte não têm, ainda, um fim específico (BAPTISTA JR & ROMANEL, 2013; BRASILEIRO e MATOS, 2015; LOURENÇO et al., 2017).

Dessa forma, o objetivo deste artigo foi investigar o comportamento mecânico de blocos e de alvenarias de terra comprimida produzidos com RCD e estabilizados com dois tipos de cimento, a fim de avaliar a compatibilidade entre esses materiais.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi dividida em três etapas, sendo: i) A coleta e a caracterização dos materiais; ii) As análises do comportamento mecânico, do índice de absorção e da durabilidade de corpos de prova (CPs) cilíndricos; e iii) A produção de BTC e a montagem de prismas de alvenaria para a avaliação da resistência à compressão axial.

2.1. Caracterização dos materiais

Na primeira fase do estudo, com o intuito de comprovar a viabilidade da produção dos componentes localmente, todos os materiais utilizados foram adquiridos na RMBH. O solo foi extraído manualmente a partir de 50 cm de profundidade, para descartar a presença de material orgânico. As amostras de RCD foram coletadas no estoque da Estação de Reciclagem de Entulho da Superintendência de Limpeza Urbana da Prefeitura de Belo Horizonte (SLU/PBH) em granulometria equivalente à areia média.

Optou-se por investigar o comportamento de dois tipos diferentes de estabilizantes: o Cimento Portland pozolânico (CP IV 32) e o Cimento Portland de alta resistência (CP V ARI). O primeiro foi escolhido por conta de sua maior disponibilidade comercial na RMBH e o segundo pela ausência de adições. O CP V ARI, embora possua maior teor de clínquer, o que pode colaborar na agregação das partículas do solo, possui desvantagem na questão ambiental. Os cimentos utilizados obedecem à normalização brasileira vigente – NBR 16697 (ABNT, 2018).

A composição química do solo foi determinada pelo espectrômetro de fluorescência de raios X, marca Shimadzu, por pastilhas prensadas. A composição mineralógica foi obtida por difração de raios X no equipamento XRD-7000 da marca Shimadzu, gerada a 40kV e 30mA usando radiação de Cu. A velocidade angular foi de 2°/min e o intervalo de varredura foi de $2\theta = 10^\circ$ a 80° .

Identificou-se o intervalo plástico do solo por meio da determinação dos limites de liquidez, por meio da NBR 7180 (ABNT, 2016a), e de plasticidade por meio da NBR 6459 (ABNT, 2016b) do material. A caracterização granulométrica foi realizada segundo as indicações da NBR NM 248 (ABNT, 2003b) e realizada para os três materiais (solo, areia e RCD), a fim de identificar a curva de dispersão, o diâmetro predominante dos grãos e prever a compatibilidade solo-agregados (Figura 1).



Figura 01 – Limite de Liquidez (esq.) e Limite de Plasticidade (dir.)
Fonte: Os autores.

As demais análises realizadas nos agregados (areia e RCD) foram a massa específica, pela NBR NM 52 (ABNT, 2003a), e a massa unitária pela NBR NM 45 (ABNT, 2006).

2.2. Ciclos de molhagem e secagem

No segundo estágio da investigação, foram propostas quatro diferentes proporções de materiais para os corpos de prova (CPs), com e sem RCD e com os dois tipos de cimento (CP IV 32 e CP V ARI), conforme pode ser observado na Tabela 1.

Para cada subgrupo, foram moldados sete CPs destinados ao ensaio de resistência à compressão, com base na NBR 12025 (ABNT, 2012d), sendo três aos 7 dias e quatro aos 28 dias; cinco CPs destinados ao ensaio de absorção, com base na NBR 13555 (ABNT, 2012b), sendo dois aos 7 dias e três aos 28 dias; e seis CPs para aos ciclos de molhagem e secagem - adaptação das NBR 12024 (ABNT, 2012c) e 13554 (ABNT, 2012a). Ao total, cada subgrupo dispôs de 18 CPs, totalizando, assim, 72 espécimes.

Para esta etapa, as normas de solo-cimento foram usadas como parâmetro. Diferentemente do indicado por essas, que sugerem o uso de moldes metálicos de 100

mm x 127 mm, o molde utilizado para a produção dos CPs foi o tipo recomendado pela NBR 7215 (ABNT, 2019) para a produção de CPs de argamassa, com dimensões de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. A alteração na dimensão dos moldes foi realizada com base na literatura e teve como objetivo racionalizar o uso de material no ensaio com o uso de moldes compatíveis com as normas (SOUZA, 2011; PINTO, 2016).

Pela dimensão dos CPs, os materiais secos foram pesados em balança com resolução 0,01 g e homogeneizados em um argamassadeira com capacidade para 5,00 L de mistura durante 30s em consistência seca e por mais 30s após adição de água, conforme a norma 12024 (ABNT, 2012c). Os moldes foram untados com óleo desmoldante e a mistura inserida por meio de um funil encaixado na parte superior do cilindro. O teor de umidade para a moldagem ficou em 10% para todos os CPs nesta etapa.

Materiais	Grupo 1		Grupo 2	
	IV RO	IV R100	V RO	V R100
Solo	45%	45%	45%	45%
Areia	45%	-	45%	-
RCD	-	45%	-	45%
CP IV32	10%	10%	-	-
CP VARI	-	-	10%	10%

Tabela 01 – Proporção dos materiais usados nos CPs
 Fonte: Os autores.

A compactação foi dividida em três camadas com a mesma altura, tendo cada uma recebido 30 golpes com um soquete simples. As duas primeiras camadas foram escarificadas com o auxílio de uma espátula metálica para melhor aderência das porções seguintes. O desmolde dos CPs ocorreu no mesmo dia, uma hora após a finalização das moldagens. As peças repousaram numa caixa durante o processo de cura, que ocorreu durante o período de 28 dias em ambiente de laboratório, tal qual a cura dos BTC e semelhante a outros componentes de terra compactados (taipa, terra ensacada, etc.), ainda que estabilizados com cimento, por isso a cura úmida não foi realizada (Figura 2).

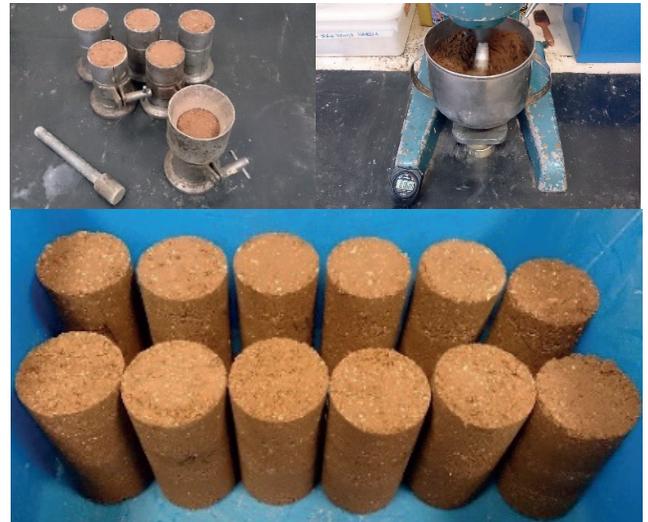


Figura 02 – Mistura, moldagem e desmoldagem dos CPs
 Fonte: Os autores.

Para os testes de molhagem e secagem, foi necessária uma moderada adaptação na NBR 13554 (ABNT, 2012a) para melhor adequação do procedimento à rotina do laboratório, a fim de eliminar inconsistências metodológicas (Tabela 2). A estrutura do ensaio, aparentemente simples, vê-se incoerente, uma vez que “estabelece intervalos entre operações que resultam em horários inadequados para a realização de algumas etapas, mesmo com um bom planejamento” (PINTO, 2016).

Após os ciclos estendidos de molhagem e de secagem (adaptados) de 72 horas cada, foram determinadas as variações de umidade, o volume e a perda de massa dos CPs, conforme a NBR 13554 (ABNT, 2012a).

De acordo com a demanda técnica nacional, usou-se como referência para a classificação do solo a norma norte-americana D2487 (ASTM, 2011). Após essa definição, os parâmetros determinados pela NBR 13553 (ABNT, 2012e) foram comparados com os resultados obtidos na análise de molhagem e secagem para a verificação da durabilidade alcançada pelos CPs.

	Molhagem	Secagem
Metodologia padrão	5 horas	42 horas a 72° C
Metodologia adaptada	24 horas	48 horas a 72° C

Tabela 02 – Adaptação da NBR 13554 – Tempos de molhagem e de secagem
 Fonte: Os autores.

2.3. Comportamento estrutural de prismas de alvenaria

Para esta etapa, foram produzidas duas séries de prismas contrafiados de alvenaria, incluindo uma sem o uso de RCD (referência), e avaliadas segundo a resistência à compressão tendo como base a NBR 15812-2 (ABNT, 2010), que regulamenta a

execução e o controle de obras em alvenaria estrutural com blocos cerâmicos. Esse padrão foi adotado devido aos valores de resistência mecânica dos BTCs produzidos, que atingiram as recomendações mínimas para componentes estruturais.

Os BTCs e os prismas foram produzidos com o cimento CP V (Grupo 2) por conta dos resultados obtidos no ensaio de moldagem e secagem. Foi adotado um padrão para juntas horizontais de 15 mm e verticais de 10 mm. A TC76-LUMB1 (RILEM, 1994) recomenda que o coeficiente de esbeltez do prisma fique entre 3 e 5 e que o número de fiadas seja de 5, no mínimo. As dimensões dos prismas podem ser observadas na Figura 3.

Na produção dos BTC, todos os materiais secos foram mensurados em balança com resolução 100 g e homogeneizados em uma argamassadeira industrial com capacidade para 60 L de mistura. Após a homogeneização, a mistura foi direcionada à prensa hidráulica (modelo PH4C 40x40 T da HIDRAL-Mac) para a compactação da mistura. O teor de umidade para moldagem também ficou em 10% para todos os BTC, que foram curados por 28 dias antes da montagem dos prismas em ambiente de laboratório e protegidos do sol direto (Figura 4).

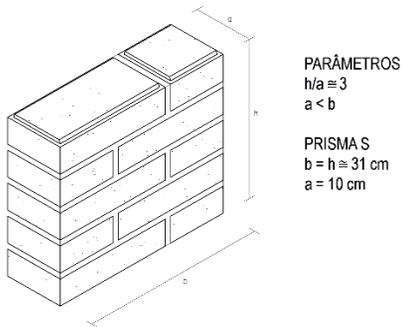


Figura 03 – Dimensões dos prismas
Fonte: Os autores.



Figura 04 – Produção dos BTCs e montagem dos prismas
Fonte: Os autores.

Três prismas foram produzidos com a série de BTC (com e sem RCD) produzida com cimento CP V ARI nas mesmas proporções utilizadas nos CPs. Para a junção dos blocos durante a montagem dos prismas, utilizou-se argamassa à base de solo, cal hidratada (tipo CH-I) e agregado (areia e RCD), de acordo com o tipo de prisma.

A relação das séries de prismas e suas respectivas argamassas de assentamento encontra-se na Tabela 3.

Os prismas foram moldados após o tempo de cura dos BTC (28 dias). Após a moldagem e o período de cura da argamassa de assentamento, aos 28 dias, foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão axial. As argamassas foram submetidas aos ensaios de resistência à tração na flexão e à compressão, de acordo com a NBR 13279 (ABNT, 2005), aos 28 dias (Figura 5).

	R0	R100
BTCs	CP V ARI – Solo - Areia (1,0:4,5:4,5)	CP V ARI – Solo - RCD (1,0:4,5:4,5)
Argamassa	CHI – Solo - Areia (1,0:4,5:4,5)	CHI - Solo - RCD (1,0:4,5:4,5)

Tabela 03 – Séries de prismas – materiais e traços
Fonte: Os autores.

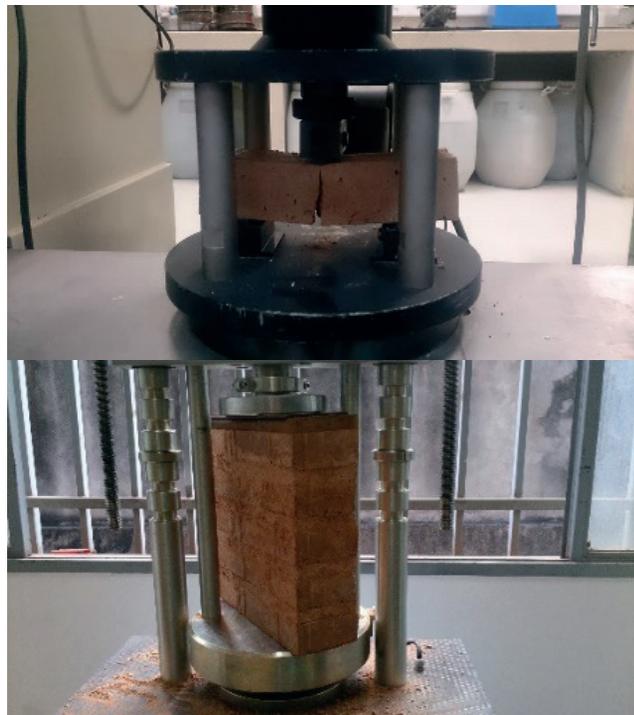


Tabela 05 – Ensaios realizados com os CPs de argamassas e com os prismas de BTC
Fonte: Os autores.

Para facilitar a adequada distribuição da carga aplicada no prisma, utilizou-se uma placa de madeira com as mesmas dimensões da face do prisma em contato com a prensa.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Caracterização dos materiais

Os resultados dos ensaios de caracterização física dos materiais utilizados encontram-se na Tabela 4.

Material	Solo	Areia natural	RCD
Métodos de caracterização	Limite de Liquidez (30,28%) Limite de Plasticidade (22,54%) Índice de Plasticidade (7,74%)	Volume de Vazios e Massa Unitária (0,11%; 1,39 g/cm ³) Massa Específica (2,49 g/cm ³)	Volume de Vazios e Massa Unitária (1,38%; 1,56 g/cm ³) Massa Específica (2,22 g/cm ³)

Tabela 04 – Séries de prismas – materiais e traços
 Fonte: Os autores.

Os ensaios de caracterização do solo dizem respeito à transição de estados físicos de acordo com o

Elementos	SiO2	Al2O3	Fe2O3	K2O	TiO2	CaO+MgO	Outros
Solo – amostra 1 (%)	47,03	24,59	19,49	4,50	1,69	1,71	0,99
Solo – amostra 2 (%)	48,28	25,08	17,54	4,60	1,92	2,06	0,52

Tabela 05 – Solo - Composição química
 Fonte: Os autores.

A soma das frações de SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ somam mais de 90% da composição das amostras de solo analisadas. Pela análise de DRx do solo, observa-se a presença do silício, em forma de quartzo, e também da caulinita e da muscovita, minerais que apresentam alumínio e potássio em sua composição, o que está de acordo com a análise química realizada (Figura 6).

A dispersão granulométrica do solo, do RCD e da areia natural, pelo método granulométrico, encontra-se na Figura 7.

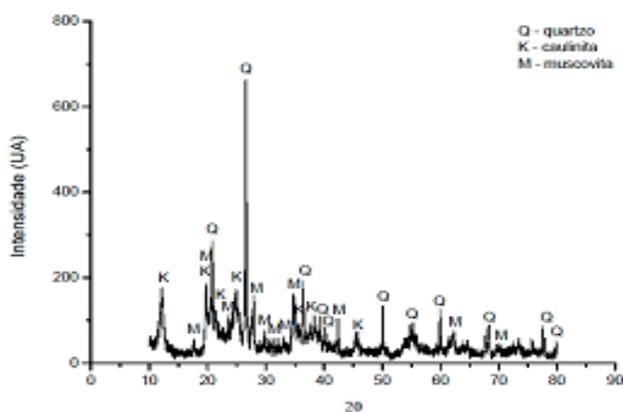


Figura 06 – Solo - Difratoograma
 Fonte: Os autores.

percentual de umidade. Dessa forma, o solo estudado torna-se plástico a partir do acréscimo de 22,54% de água, em relação à massa seca total, e líquido a partir de 30,28%. Embora o Limite de Plasticidade obtido seja 4% acima do indicado pela NBR 10833 (ABNT, 2012f) para a fabricação de blocos, o material foi corrigido posteriormente com areia e RCD, sem prejuízo para o processo de moldagem dos BTC com a composição solo-RCD proposto.

A areia, tendo graduação mais uniforme, dispõe de um menor índice de vazios, enquanto o RCD, sendo produto reciclado com composição diversa devido à variação dos materiais processados, é susceptível a um índice de vazios maior. Essas características foram melhor observadas posteriormente, com os resultados dos ensaios de absorção, que reforçaram esses indicativos.

O resultado da análise química do solo está apresentado na Tabela 5.

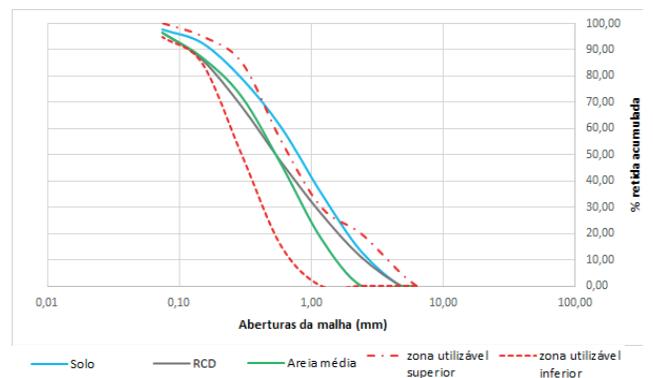


Figura 07 – Solo - Difratoograma
 Fonte: Os autores.

Todos os materiais se encontram conformados pelas zonas utilizáveis estabelecidas pela NBR 7211 (ABNT, 2005). Em relação à dimensão das partículas dos materiais, tanto o solo quanto os agregados utilizados apresentaram distribuição granulométrica compatível, fato que, ao longo das análises, favoreceu a homogeneização das misturas para a produção dos CPs e dos BTCs.

3.2. Ciclos de molhagem e secagem

Nas Tabelas 6 e 7, apresentam-se os resultados dos ensaios de resistência à compressão e de absorção dos CPs aos 7 e 28 dias, respectivamente. Os registros da realização dos três ensaios preliminares estão indicados na Figura 8.

Ensaio realizado	Grupo 1		Grupo 2	
	IV R0	IV R100	V R0	V R100
Absorção (%)	13,30	13,75	13,45	16,43
CV (%)	0,86	0,91	7,21	4,32
Resistência à compressão (MPa)	2,38	2,17	3,74	2,33
CV (%)	1,00	2,15	6,78	24,59

CV = Coeficiente de variação

Tabela 06 – Parâmetros e resultados obtidos aos 7 dias – absorção e resistência à compressão
Fonte: Os autores.

Todos os valores obtidos apresentam-se dentro dos valores normativos para o solo-cimento empregado em paredes monolíticas (NBR 13553/2012), documento este que não faz distinção entre os tipos de cimento a serem utilizados.

Comparando-se os resultados do ensaio de absorção, pode-se perceber que o maior índice de vazios do RCD pode ter refletido na forma de dispersão de suas partículas no BTC, com uma diferença mais acentuada no Grupo 2. Os CPs produzidos com 100% de RCD, em ambos os grupos, sempre obtiveram resultados maiores de absorção.

Por outro lado, os valores obtidos no ensaio de resistência à compressão foram sempre maiores nos CPs do Grupo 2, o que indica maior compatibilidade entre o solo e o clínquer presente no CP V. Como esperado, o desenvolvimento da resistência dos 7 para os 28 dias, no Grupo



Figura 08 – Ensaio de compressão (esq.), absorção (centro) e durabilidade (dir.)
Fonte: Os autores.

2, não foi tão acentuado. Essa característica tem relação direta com o tipo de cimento utilizado, que atinge elevados valores de resistência logo nos primeiros dias de cura.

Para as análises de durabilidade, foi necessária a caracterização do solo conforme a NBR 13554 (ABNT, 2012a). Pela classificação da D2487 (ASTM, 2011), o solo utilizado foi enquadrado como A-2-4 por parâmetros aproximados, conforme indicado na Tabela 8. Para essa classificação, a perda de massa dos CPs após o sexto ciclo de molhagem e secagem não deve ser superior a 14%.

Parâmetros	Resultados obtidos	Solo A-2-4
Limite de Liquidez (%)	30,28	40,00 (máximo)
Índice de Plasticidade (%)	7,74	10,00 (máximo)
Material passante #75µm (%)	0,49	35,00 (máximo)

Tabela 08 – Classificação do solo utilizado conforme a D2487 (ASTM, 2011)
Fonte: Os autores.

Os CPs produzidos com o CP IV 32 (Grupo 1) não obtiveram resultados compatíveis com os valores mínimos para a perda de massa e para a variação de volume definidos por norma. Tanto as amostras com RCD (IV R100) quanto as

amostras de referência (IV R0) não conseguiram passar pelos ciclos de molhagem e secagem sem que houvesse perda de massa acima do valor estipulado (14%) já no primeiro ensaio dos seis ciclos (Figura 9). Após o terceiro ciclo, os CPs escovados se romperam e os destinados às análises de variação de volume perderam mais de 20% da massa total.



Figura 09 – Aspecto visual dos CPs do Grupo 1 após 1º, 2º e 3º ciclos de molhagem e secagem
Fonte: Os autores.

É importante ressaltar que essa instabilidade física não pode ser atribuída ao RCD, mas ao cimento CP IV 32, muito possivelmente pelo reduzido teor de clínquer, ainda que as normas correlatas não façam distinção sobre os tipos de cimento que possam ser utilizados no solo-cimento. Sendo assim, os CPs produzidos com esse tipo de cimento, apesar de terem alcançado valores de resistência à compressão compatíveis com o esperado para a produção de blocos para vedação, necessitam de uma camada de revestimento impermeável se forem expostos às intempéries (vedação externa), tal qual muitos outros componentes convencionais.

Em contrapartida, as amostras do Grupo 2 (V R0 e V R100) obtiveram resultados compatíveis com a normalização nacional, conforme apresentado na Tabela 9. Após o ensaio de molhagem-secagem, os CPs escovados passaram por análises de resistência à compressão e de absorção, para a verificação do comportamento do material após os ciclos de durabilidade.

Análises	NBR 13553 (ABNT, 2012)	Tempo de Cura	Grupo 2	
			V R0	V R100
Varição de Volume (%)	≤ 1	28 dias	0,82	0,80
Perda de Massa (%)	≤ 14	28 dias	10,94	13,28
		CV (%)	0,84	0,12
Resistência à compressão (MPa)	≥ 1,0	Pós-durabilidade	17,83	14,73
		CV (%)	8,43	15,19
Absorção (%)	≤ 20%	Pós-durabilidade	10,23	11,91
		CV (%)	0,24	0,17

CV = Coeficiente de variação

Figura 06 – Análise de rede 2
 Fonte: Os autores.

A estabilidade dimensional é característica importante para os produtos à base de terra, uma vez que se trata de um material higroscópico. Todavia, não é indicado que as alvenarias (independente de qual material sejam feitas) fiquem expostas às intempéries, pois valores elevados de absorção e de variação dimensional cíclica podem ocasionar o surgimento de manifestações patológicas, acelerando a deterioração do material. Dessa forma, indica-se o uso de resinas impermeabilizantes e/ou de revestimentos adequados.

O solo-cimento proposto por Souza (2011) teve apenas 4% de perda de massa. Entretanto, cabe frisar que esse comportamento está intrinsecamente relacionado ao tipo de solo utilizado. Além disso, a casca de arroz, incorporada em substituição ao solo em baixo teor (4%), serviu como fibra estabilizante na matriz estudada. O RCD comporta-se como agregado, não como fibra.

Não foram observadas fissuras ou aparecimento de fungos nos CPs. O desenvolvimento da resistência à compressão e o menor índice de absorção após os ciclos de molhagem e secagem merecem destaque pelo fato da perda de massa, ainda que, dentro dos limites definidos por norma, não terem interferido na resistência final da matriz cimentícia. O aumento da resistência à compressão pós-durabilidade também foi observado por França et al. (2018).

Visualmente, os CPs do Grupo 2, produzidos com areia e com RCD, mostraram-se semelhantes, mesmo após os ciclos de molhagem e secagem (Figura 10).

As proporções utilizadas nos subgrupos VR0 e VR100 foram reproduzidas na produção dos BTCs utilizados para a moldagem dos prismas.

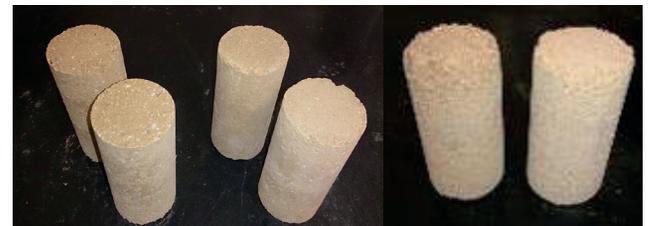


Figura 10 – Aspecto final do Grupo 2 pós-durabilidade (CPs com RCD sempre à esquerda)
 Fonte: Os autores.

3.3. Desempenho estrutural de prismas de alvenaria

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão das argamassas e dos prismas são apresentados na Figura 11. Ambas as argamassas atingiram, aproximadamente, 29% da resistência à compressão dos respectivos prismas. Para esses valores, o coeficiente de variação ficou em 4,90%, para os prismas produzidos sem RCD, e de 10,05% com RCD.

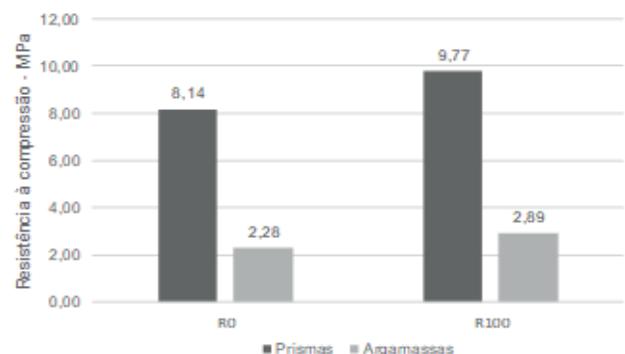


Figura 11 – Resistência à compressão dos prismas e das argamassas
 Fonte: Os autores.

Em ambos os grupos, as primeiras fissuras foram observadas quando os protótipos atingiram cerca de 70% da carga total suportada. Os valores de resistência à flexão das argamassas ficaram em 0,29 MPa (R0) e 0,27 MPa (R100), bastante próximos.

Os resultados dos prismas superaram cerca de 4 vezes o desempenho médio dos componentes estudados por Lima et al. (2011). Os melhores resultados para prismas produzidos por Buson (2009) foram 42% menores (média de 5,66 MPa).

Ao final dos ensaios, observou-se que o modo de ruptura foi semelhante entre os prismas. Em ambos os grupos, as rupturas foram silenciosas, ocorrendo, em princípio, nas juntas de assentamento – possível problema de aderência da argamassa, mas depois se apresentaram como uniformes (fissura no bloco e na argamassa), conforme a Figura 12.



Figura 12 – Aspecto final dos prismas com (esq.) e sem RCD (dir.)
Fonte: Os autores.

A resistência à compressão de prismas é um dos ensaios mais importantes em estudos dos sistemas de vedação, afinal é o principal esforço ao qual a alvenaria está sujeita. Embora ambos os grupos tenham atingidos elevados valores de resistência à compressão axial, sempre acima dos valores de norma, os prismas produzidos com os BTC com a incorporação de RCD demonstraram comportamento mecânico superior.

6. CONCLUSÃO

Após as análises, foi possível concluir que:

- Embora tenha atingido resultados acima do exigido pelas normas vigentes de solo-cimento, o CP IV 32 não apresentou compatibilidade no ensaio de durabilidade; cabe frisar que as normas vigentes não impõem qualquer restrição ao uso do CP IV e não apresentam maiores detalhes sobre suas particularidades com alguns tipos de solo;
- Os componentes moldados com o CP V-ARI obtiveram valores superiores aos parâmetros técnicos nacionais. Verificou-se que a matriz formada manteve estabilidade à abrasão mesmo quando exposta à variação de umidade e de temperatura, enquadrando-se, também, nas diretrizes estipuladas para os ensaios de durabilidade;

- Os resultados mecânicos obtidos pelos prismas atestam a compatibilidade entre o solo utilizado, o RCD e o cimento CPV. Ainda assim, tal qual os componentes cerâmicos e cimentícios, deve-se considerar o emprego de revestimentos adequados e de produtos impermeabilizantes, a fim de preservar a integridade do sistema construtivo contra a ação das intempéries;
- Foi comprovada a viabilidade técnica do uso do RCD processado em Belo Horizonte na cadeia da construção civil na produção de componentes sustentáveis.

AGRADECIMENTOS

À SLU/PBH, pela doação do RCD utilizado na investigação, e à Pró-reitoria de Pesquisa (PRPq) da UFMG, pela bolsa de estudos concedida (ADRC).

REFERÊNCIAS

- ABNT (2016a). **NBR 6459**: Solo – determinação do limite de liquidez.
- ABNT (2016b). **NBR 7180**: Solo - determinação de limite de plasticidade.
- ABNT (2005). **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação.
- ABNT (2019). **NBR 7215**: Cimento Portland – determinação da resistência à compressão.
- ABNT (2012f). **NBR 10833**: Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica - Procedimento.
- ABNT (2012c). **NBR 12024**: Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos.
- ABNT (2012d). **NBR 12025**: Solo-cimento – ensaio de compressão simples em corpos de prova cilíndricos.
- ABNT (2005). **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.
- ABNT (2012e). **NBR 13553**: Materiais para emprego em parede monolítica de solo-cimento sem função estrutural.
- ABNT (2012a). **NBR 13554**: Solo-cimento - ensaio de durabilidade por molhagem e secagem.
- ABNT (2012b). **NBR 13555**: Solo-cimento – determinação da absorção d'água.
- ABNT (2010). **NBR 15812-2**: Alvenaria estrutural – blocos cerâmicos. Parte 2: execução e controle de obras.
- ABNT (2018). **NBR 16697**: Cimento Portland - requisitos.
- ABNT (2006). **NBR NM 45**: Agregados - determinação de massa unitária e volume de vazios.
- ABNT (2003a). **NBR NM 52**: Agregado miúdo - determinação da massa específica e massa específica

aparente.

ABNT (2003b). **NBR NM 248**: Determinação da composição granulométrica.

ABRELPE (2017). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil - 2017**. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Recuperado em 21 dez. 2018. <http://abrelpe.org.br/download-panorama-2017/>.

Andrade, J. J. O.; Possan, E., Squiavon, J. Z.; Ortolan, T. L. P. (2018). Evaluation of mechanical properties and carbonation of mortars produced with construction and demolition waste. **Construction and Building Materials**, v. 161, p. 70-83.

ASMT. American Society for Testing and Materials. (2011). **ASTM D2487**: Unified soil classification system. Baptista Junior, J. V., & Romanel, C. (2013). Sustentabilidade na indústria da construção: uma logística para reciclagem dos resíduos de pequenas obras. **Urbe**. Revista Brasileira de Gestão Urbana, v. 5, n. 2, p. 27-37.

Barbieri, J. C., Vasconcelos, I. F. G., Andreassi, T.; Vasconcelos, F. C. (2010). Inovação e sustentabilidade: novos modelos e proposições. **Revista de Administração de Empresas**, 50, p. 146-154.

Brasileiro, L. L.; & Matos, J. M. E. (2015). Revisão Bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. **Cerâmica**, v. 61, p. 178-189.

Buson, M. A. (2009). **KRAFTTERRA**: Desenvolvimento e análise preliminar do desempenho técnico de componentes de terra com a incorporação de fibras de papel kraft provenientes da reciclagem de sacos de cimento para vedação vertical. Tese (Doutorado em Arquitetura). FAU/UnB. Brasília.

CBIC. CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. (2018). **PIB Brasil e Construção Civil**: IBGE, 2017. Belo Horizonte, 2018. Recuperado em 10 mar. 2018. <http://www.cbicdados.com.br/menu/pib-e-investimento/pib-brasil-e-construcao-civil>.

Champiré, F.; Fabbri, A.; Morel, J.; Wong, H.; McGregor, F. (2016) Impact of relative humidity on the mechanical behavior of compacted earth as a building material. **Construction and Building Materials**, v. 110, p. 70-78.

CONAMA (2002). **Resolução n. 307**, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Recuperado em 31 julho 2018 de http://www.mma.gov.br/estruturas/a3p/arquivos/36_09102008030504.pdf.

Contreras, M., Teixeira, S. R., Lucas, M. C., Lima, L. C. N., Cardoso, D. S. L., Silva, G. A. C., Gregório, G. C., Souza, A. E., Santos, A. (2016). Recycling of construction and demolition waste for producing new construction material (Brazil case-study). **Construction and Building Materials**. v. 123, p. 594-600.

França, B; Azevedo, A; Monteiro, S; Garcia Filho, F; Marvila, M; Alexandre, J; Zanelato, E. (2018) Durability of soil-cement blocks with the incorporation of limestone residues from the processing of marble. **Materials Research**, v. 21.

Gomes, P. C. C., Alencar, T. F. F., Silva, N. V., Moraes, K. A. M., Ângulo, S. C. (2015). Obtenção de concreto leve utilizando agregados reciclados. **Ambiente Construído**, v. 15, p. 31-46.

Gutierrez, R. S. R., Izaguirre, V. M. G., Mujica, J. A. E. (2014) Los materiales alternativos estabilizados y su impacto ambiental. **Nova Scientia**, Universidad de la Salle Bajío.

Helson, O; Eslami, J; Beaucour, A; Noumowe, A; Gotteland, P. (2018) Durability of soil mix materials to wetting/drying cycles and external sulfate attacks. **Construction and Building Materials**, v. 192.

Jiménez, Y. G. A., & Izaguirre, V. M. G. (2016) Efectos de utilización de savias vegetales em bloques de tierra comprimida a la prueba de abrasión. **LEGADO de Arquitectura y Diseño**, 19, p. 101-110.

Lima, S. A.; Varum, H.; Sales, A.; Neto, V. F. Analysis of the mechanical properties of compressed earth block masonry using the sugarcane bagasse ash. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 829-837.

Lourenço, K. K., Mello, T. A. G., Bessa, S. A. L. (2017). Análise quantitativa e qualitativa dos resíduos de construção e demolição no município de Belo Horizonte/MG. In: XXV Jornadas de Jovens Pesquisadores Associação de Universidades do Grupo Montevideu - AUGM, **Ponencias...**, Asunción, Paraguay.

Melo, A. B., Barbosa, N. P., Lima, M. R. F., Silva, E. P. (2011). Desempenho estrutural de protótipo de alvenaria construída com blocos de terra crua estabilizada. **Ambiente Construído**. v. 11, p. 111-124.

Mendes, C. Veríssimo, C. Bittar, W. (2011) **Arquitetura no Brasil**: de Cabral à Dom João VI. Imperial Novo Milênio, Rio de Janeiro.

Mesquita, L. C., Azevedo, I. C., Cândido, E. S. e Cathoud, G. A. (2015). Análise da viabilidade técnica de utilização de resíduos de construção e demolição na fabricação de blocos de vedação. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 10, p. 30-40.

Minke, G. (2015). **Manual de construção com terra: uma arquitetura sustentável**. São Paulo: B4 Editores, 225p.

Morel, J., Pkka, A., Walker, P. (2007). Compressive strength testing of compressed earth blocks. **Construction and Building Materials**, v. 21, p. 303–309.

Murta, A.; Varum, H.; Pinto, J.; Bentes, I.; Paiva, A.; Ramos, L. (2010) Benefícios económicos e ambientais inerentes ao uso de materiais estruturais naturais em habitações unifamiliares. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 10, p. 07-22.

PBH. Prefeitura Municipal De Belo Horizonte. (2018). **Superintendência de Limpeza Urbana**. Belo Horizonte. Recuperado de <<https://prefeitura.pbh.gov.br/slu>>, em 11 set. 2018.

Piattoni, Q., Quagliarini, Q., Lenci, S. (2011). Experimental analysis and modelling of the mechanical behavior of earthen bricks. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 2067-2075.

Pinto, E. S. **Solo-cimento compactado: proposta de métodos de ensaio para dosagem e caracterização física e mecânica**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura). FAAC/UNESP. São Paulo, São Paulo, 2016.

RILEM. (1994). **LUMB1: Compressive strength of small walls and prisms**. Technical Recommendations for the testing and use of construction materials. Technical Report, RILEM.

Santos, A., Teixeira, R., Mello, E., Teixeira, J. (2015). Avaliação do custo de uma estrutura de pavimento empregando agregado reciclado de RCD. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, 1, 1-13.

Seco, A.; Omer, J.; Marcelino, S.; Espuelas, S.; Prieto, E. (2018). Sustainable unfired bricks manufacturing from construction and demolition wastes. **Construction and Building Materials**, v. 167, p. 154-165.

Silva, S. R.; & Andrade, J. J. O. (2017). Investigation of mechanical properties and carbonation of concretes with construction and demolition waste and fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 153, p. 704-715.

Souza, F. A. (2011). **Estudo da durabilidade de blocos de solo-cimento com a incorporação de casca de arroz**. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos). CCT/UFCG. Campina Grande, Paraíba, Brasil.

AUTORES

ORCID: 0000-0003-1883-1251

SOFIA ARAUJO LIMA BESSA, Dra. | Universidade Federal de Minas Gerais | Escola de Arquitetura | Belo Horizonte, MG - Brasil | Correspondência para: Rua Paraíba, 697, Sala 319, Savassi, CEP 30130-141 | E-mail: sofiaibessa@ufmg.br

ORCID: 0000-0003-1978-9905

TIAGO AUGUSTO GONÇALVES MELLO | Universidade Federal de Minas Gerais, Arquitetura e Urbanismo - Belo Horizonte - MG - Brasil | Correspondência para: Rua M, 39, Bairro Liberdade, CEP 33170-890 | E-mail: tiagoaugustogm@gmail.com

ORCID: 0000-0002-7056-2872

BÁRBARA RODRIGUES BELO | Universidade Federal de Minas Gerais, Arquitetura e Urbanismo - Belo Horizonte - MG - Brasil | Correspondência para: (R. Maestro José Flores, - 21, apt 204, bloco 1 - Nova Suiça - Belo Horizonte, Mg - 30550-175) | E-mail: Baahbelo@hotmail.com

ORCID: 0000-0001-6474-3602

MARIANA ALVES MIRANDA | Universidade Federal de Minas Gerais, Arquitetura e Urbanismo - Belo Horizonte - MG - Brasil | Correspondência para: Rua Caetano de Azeredo, 339, apto 402, Bairro Barreiro - Belo Horizonte, MG - 30640-095 | E-mail: marianamiranda1520@gmail.com

ORCID: 0000-0002-6774-9484

ROBERTO PINTO OSÓRIO | Universidade Federal de Minas Gerais | Escola de Arquitetura | Belo Horizonte, MG - Brasil | Correspondência para: Av. Pasteur, 135. Ap.1202, Santa Efigênia, CEP 30150-290 | E-mail: ropios@gmail.com

ORCID: 0000-0003-1670-2376

AUGUSTO CESAR DA SILVA BEZERRA, Dr. | Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais | Departamento de Engenharia de Transportes | Belo Horizonte, MG - Brasil | Correspondência para: (Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia de Transportes, Avenida Amazonas, 5253, Nova Suiça, 30421-169 - Belo Horizonte, MG - Brasil) | E-mail: augustobezerra@cefetmg.br

COMO CITAR ESTE ARTIGO

BEZERRA, Augusto Cesar da Silva; OSÓRIO, Roberto Pinto; BELO, Bárbara Rodrigues; MIRANDA, Mariana Alves; MELLO, Tiago Augusto Gonçalves. Comportamento Mecânico de Alvenarias de Terra com Resíduos de Construção e Demolição. **MIX Sustentável, [S.l.], v. 5, n. 4, p. 53-64, out. 2019.** ISSN 24473073.

Disponível em: <<http://www.nexos.ufsc.br/index.php/mixsustentavel>>. Acesso em: dia mês. ano. doi:<https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2019.v5.n4.xx-xx>.

DATA DE ENVIO: 02/10/2019

DATA DE ACEITE: 25/10/2019
