ANAIS
IV EURO ELECS
2021

ARTIGO

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV) DE SISTEMAS DE ALVENARIA DE BLOCOS DE SOLO-CIMENTO COM DIFERENTES DOSAGENS

CARVALHO, Beatriz Temtemples
(beatriz.carvalho@fau.ufrj.br)
FAU/UFRJ (PROARQ - FAU/UFRJ), Brasil

ALBERTO, Eduarda
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – FAU/UFRJ, Brasil
(eduarda.alberto@fau.ufrj.br)

SILVOSO, Marcos Martinez
(silvoso@fau.ufrj.br)
FAU/UFRJ (PROARQ - FAU/UFRJ), Brasil

PALAVRAS-CHAVE:

Construção com terra, ACV, Bloco de terra comprimida, Solo-cimento

RESUMO

O setor da construção civil desempenha um papel relevante no desenvolvimento socioeconômico brasileiro por ser um dos setores que mais gera empregos em países em desenvolvimento. Apesar disso, o setor se apresenta como responsável por diversos problemas de ordem ambiental, tais como alto consumo de recursos naturais e um considerável percentual de geração de resíduos. Cabe então, a busca por sistemas construtivos alternativos que utilizem materiais naturais ou materiais com potencial de reciclagem. Os sistemas construtivos com terra se apresentam como uma boa alternativa nesse contexto, sendo necessário o estudo dos impactos gerados por essas práticas construtivas e seus materiais com o intuito de compreender seu desempenho ambiental. Assim, o objetivo deste trabalho é avaliar, a partir da metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida, os potenciais impactos ambientais do bloco de terra comprimida incorporado a sistemas construtivos de alvenaria. O trabalho apresenta o resultado de blocos produzidos com quatro diferentes dosagens utilizando os seguintes materiais, (a) cimento Portland CPII-F-32, (b) cal CH-III e (c) resíduo cerâmico em conjunto com o solo proveniente de um terreno em Duque de Caxias - Rio de Janeiro, pertencente a Ocupação Solano Trindade, escolhida como cenário para a pesquisa. Para avaliação do sistema construtivo, é abordada a utilização das argamassas à base de solo e areia com a utilização de dois aglomerantes distintos, cimento e cal. Sobre as categorias de danos, foram avaliadas: (a) Saúde Humana, (b) Mudanças Climáticas, (c) Depleção de Recursos e (d) Qualidade do Ecossistema. Com essa pesquisa, foi possível demonstrar quantitativamente o desempenho ambiental dos blocos de terra comprimida estabilizados com aglomerantes de ação química, constatar que a cal se apresenta como o material que possui um menor custo ambiental comparado ao cimento Portland, e avaliar os benefícios ambientais proporcionados pela reciclagem de resíduo cerâmico.

1. INTRODUÇÃO

As emissões de CO_2 relacionadas às atividades de construção e operação das edificações atingiram o mais alto nível já registrado nos últimos anos. De acordo com dados apresentados pela UNEP (2020), estima-se que, em 2019, as emissões tenham aumentado 0,5GtCO_2, em elação ao ano anterior, passando para 38GtCO_2. O aumento registrado aconteceu em decorrência das alterações nas fontes energéticas, nas quais o carvão, o petróleo e a biomassa tradicional foram substituídos, em grande parte, pela utilização de eletricidade. Ainda, cabe destacar a etapa de operação do parque edificado mundial foi responsável por 38% do total das emissões globais de CO_2 relacionadas à energia.

Além disso, este setor industrial se apresenta como responsável por uma série de outros problemas de ordem ambiental, como o alto consumo de extração de matérias primas, além de apresentar um considerável percentual de geração de resíduos. De acordo com o relatório da ABRELPE (2020), a geração de resíduo sólido urbano cresceu cerca de 17% entre 2010 e 2019, passando de 67 milhões para 79 milhões de tonelada por ano. De todo resíduo sólido urbano no território brasileiro, aproximadamente, 44,7 milhões de toneladas correspondem ao resíduo proveniente de demolição e construção. Torna-se então relevante a busca por práticas construtivas que abarquem soluções menos onerosas ao meio ambiente.

O Setor Cerâmico Brasileiro, de um modo geral, apresenta uma deficiência grande em dados estatísticos e indicadores de desempenho (ABCERAM, 2021). Segundo o relatório setorial de cerâmica vermelha de outubro de 2010 (BNB, 2010), em 2008 a produção total de tijolo cerâmico no Brasil foi estimada em 7.510 mil milheiros/mês, sendo 44,38% dessa produção é referente a região Sudeste. Em Gonçalves (2005) foi estimado uma geração anual de 19,5 milhões de toneladas de resíduo proveniente da indústria cerâmica vermelha.

A partir de uma análise bibliométrica na base de dados do SCOPUS, considerando a palavra-chave "*life cycle assessement*" no contexto brasileiro, observa-se um crescimento exponencial de documentos relacionados desde o ano de 2010 até 2021. De 1996, ano do primeiro estudo em ACV, até 2010, foram produzidos 147 documentos. Já em 2021, a quantidade de trabalhos registrados já superou a de todo período de 15 anos supracitado, sendo 179 documentos somente neste ano. Em cenário mundial, o CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) apresentou destaque entre os agentes de fomento de pesquisas sobre o tema, estando em 10º lugar no contexto internacional.

Carvalho (2018) observa que a ACV tem sido aplicada, principalmente, em estudos com ênfase nas emissões de CO_2 (ACVCO2) e consumo energético (ACVE). Apesenta diversas pesquisas relacionadas a ACV e a construção civil, como o trabalho de Caldas e outros (2016), exemplo de ACVCO2, que avaliam as emissões de CO_2 no sistema de vedação vertical uma edificação escolar. Já como referência de ACVCE, cabe menção ao estudo conduzido por Caldas e outros (2016) que avalia o ciclo de vida energético de uma habitação com light steel framing, considerando diferentes tipos de isolantes térmicos.

Não obstante, ainda são poucas as pesquisas direcionadas ao estudo e aplicação da metodologia da ACV para a avaliação de materiais de construção como a terra. Assim como coloca Ben-Alon (2019), embora a construção em terra tenha sido extensivamente discutida como sendo melhor ambientalmente, poucos estudos examinaram rigorosamente seus impactos ambientais.

Já Mateus (2019), apresenta um estudo comparativo do impacto ambiental de duas diferentes técnicas construtivas com terra, a taipa de pilão e os blocos de terra comprimida, relacionadas aos blocos cerâmicos. O autor realiza as comparações levando em consideração dois indicadores ambientais, o potencial de aquecimento global e a energia total incorporada, e adota como unidade funcional 1 kg de material e $1m^2$ de parede equivalente. O ciclo de vida das paredes de taipa e BTC foram modeladas usando o software SimaPro, enquanto que os dados dos blocos cerâmicos foram retirados do EcoInvent. Muito embora tenham sido consideradas, nesse estudo, apenas as fases do berço ao portão, foi possível confirmar que há, de fato, uma economia ambiental no uso dos materiais alternativos, principalmente porque a terra é um material disponível no local da obra e não necessita ser transportada para longas distâncias e também porque não necessita de muita energia em seu processo de fabricação.

Ben-Alon e outros (2019) apresentam um estudo de ACV que comparado a técnica construtiva do COB e materiais de construção convencionais. O trabalho avalia indicadores ambientais como energia incorporada e emissões de gases. Os resultados mostram que a utilização de COB requer apenas 18% de energia e reduz de 75% a 82% dos impactos da mudança climática global quando comparado a materiais convencionais. Além disso, a pesquisa relata que os impactos ainda podem ser reduzidos a partir da utilização de materiais do próprio local.

Além do alto custo ambiental, os altos valores econômicos da construção é um dos fatores que motivam a pesquisa por materiais alternativos, como no estudo de caso realizado por Carvalho (2019), que buscou viabilizar a produção dos blocos de terra comprimida dentro da Ocupação de Solano Trindade, a partir da utilização de materiais locais como o próprio solo do terreno, estabilizado também com materiais reciclados. A Ocupação Solano Trindade fica localizada no bairro de São Bento, em Duque de Caxias (RJ) e é vinculada ao Movimento Nacional de Luta pela Moradia, que tem um modelo organizacional autogestionário, no qual toda a comunidade é envolvida no processo de tomada de decisões e de produção do espaço. Dessa forma, a ocupação tornou-se o cenário ideal para a realização do presente estudo, já que há o interesse legitimo da população em produzir os blocos de terra comprimida com matérias locais, para a construção de suas casas em modelo de mutirão.

A partir do trabalho desenvolvido por Carvalho (2019) que atestou o desempenho mecânico dos blocos de terra comprimida produzidos com o solo da ocupação Solano Trindade, busca-se agora, compreender suas características ambientais. Assim, emprega-se a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida na qual é possível identificar processos e materiais mais custosos ambientalmente e buscar alternativas para mitigar esses possíveis danos. Cabe destacar que o número de artigos, que preveem a utilização da metodologia de ACV, desenvolvidos pela comunidade científica, vêm crescendo exponencialmente a partir da última década. Nesse

contexto, o objetivo deste estudo é avaliar, a partir da metodologia de ACV, os potenciais impactos ambientais para a produção do bloco de terra comprimida e sua incorporação na alvenaria.

2. METODOLOGIA

Este trabalho é realizado seguindo a metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) em conformidade com as normas ISO 14040 e ISO 14044 sendo assim dividido em algumas etapas tais como: (a) definição de objetivo e escopo, (b) análise do inventário do ciclo de vida, (c) avaliação do impacto do ciclo de vida e (d) interpretação dos resultados. Será utilizado software Simapro v. 9.1. banco de dados do Ecoinvent e alguns dados específicos fornecidos pelos autores.

2.1 DEFINIÇÃO DO OBJETIVO E ESCOPO

O estudo tem como objetivo (a) a avaliação do impacto ambiental da produção dos BTCs com a utilização de diferentes dosagens e diferentes estabilizantes químicos e, em um segundo momento, (b) a avaliação do impacto ambiental das paredes de alvenaria estrutural construídas com BTC.

A Ocupação Solano Trindade, localizada em Duque de Caxias, é escolhida como cenário para o presente escopo. Essa escolha leva em consideração que existe um interesse legítimo, por parte da comunidade, em produzir suas casas a partir da utilização do solo local como matéria-prima. Conforme apresentado por Carvalho *(2019)* os moradores compreendem o potencial construtivo do solo e desejam, não somente utilizá-lo para a produção das casas, como também possuem a intenção de aprender o processo construtivo para que eles próprios possam participar da construção das unidades habitacionais. Essa definição pressupõe algumas fronteiras de sistemas específicas que serão apresentas no item 2.1.3 desse artigo.

Nesse escopo são avaliados dois produtos (1) o bloco de terra comprimido cuja unidade funcional foi determinada como "uma unidade do bloco com 2MPa de resistência à compressão" e (2) a parede de alvenaria de blocos de terra comprimida sendo utilizada com unidade funcional a "1 m^2 de área da parede construída" sendo considerados apenas os impactos referentes aos blocos e a argamassa de assentamento. O detalhamento dos produtos analisados está apresentado na Tabela 1.

Modelos	Materiais	Traços (volume)
Bloco de terra comprimida com 25cm de comprimento, 12,5cm de largura e 6,25cm de altura, com dois furos de 5cm de diâmetro		
M-A-1	Bloco Solo: Cimento CPII-F-32	10: 1
M-B-1	Bloco Solo: Cal Hidratada III	10: 1
M-C-1	Bloco Solo: Cal Hidratada III: Resíduo Cerâmico	9: 1: 1
M-D-1	Bloco Cimento CPII-F-32: Resíduo Cerâmico	10: 0,5: 0,5
Alvenaria com 1m de largura, 1m de altura e 12,5cm de espessura, assentados em uma camada de 0,5cm de espessura de argamassa de solo: cimento (traço 6:1)		
M-A-2	Alvenaria de Bloco Solo: Cimento CPII-F-32	10: 1
M-B-2	Alvenaria de Bloco Solo: Cal Hidratada III	10: 1
M-C-2	Alvenaria de Bloco Solo: Cal Hidratada III: Resíduo Cerâmico	9: 1: 1
M-D-2	Alvenaria de Bloco Cimento CPII-F-32: Resíduo Cerâmico	10: 0,5: 0,5
Obs.: os volumes de solo receberam uma correção granulométrica de 30% de areia.		

Tabela 1. Dados dos Modelos Avaliados

2.2 CARACTERIZAÇÃO DOS BTC

De acordo com Neves e Milani *(2011)*, para a produção dos blocos é necessário seguir as etapas de (a) extração da matéria-prima, (b) trituração e peneiramento, (c) preparo da mistura, (d) moldagem e (e) cura. As etapas (b), (c) e (d) podem ser feitas manualmente ou a partir de processos mecanizados, e conforme é exposto por Matheus, Fernandes e Teixeira *(2019)* a escolha sobre a mecanização, ou não, dos processos vai depender das características de produção e os objetivos que desejam ser alcançados e definidos no escopo.

Os BTCs utilizados nessa pesquisa possuem 25cm de comprimento, 12,5cm de largura e 6,25cm de altura, e são os modelos com dois furos, com 5cm de diâmetro, que funcionam com encaixes, reduzindo a necessidade de utilização de argamassa de assentamento.

Sobre as dosagens, dentre as quatro misturas estudadas, três foram retiradas do trabalho de Carvalho *(2019)* sendo elas, as misturas M-A, M-B e M-C. Além dessas, ainda foi avaliada uma quarta mistura, nomeada de M-D. Todas as misturas receberam uma correção granulométrica com a adição de 30% de areia média ao solo. Os materiais utilizados no processo de estabilização química foram o cimento CP II F 32, a cal CH III e o resíduo cerâmico, conforme apresentado na Tabela 2.

O procedimento de moldagem do BTC é bastante simplificado e consiste em comprimir o solo em uma prensa, mecânica ou hidráulica, e em seguida realizar o desmolde imediato do componente construtivo. É relevante mencionar que, por conta no processo de estabilização mecânica previsto, a mistura demanda a adição de uma quantidade mínima de água, correspondente apenas ao necessário para reação de hidratação dos estabilizantes químicos adicionados a mistura. Conside-

rando que nesse estudo são avaliadas quatro misturas distintas, o volume de água adicionado, para cada uma, é distinto, principalmente por conta da quantidade e à natureza de cada estabilizante utilizado. A água é um material importante no processo de estabilização dos BTC, porém seu impacto ambiental não é significativo, como indicado por Caldas, Carvalho e Toledo *(2020)*. Assim, neste trabalho, o impacto decorrente do uso da água não foi avaliado.

Sobre a resistência à compressão dos blocos, de acordo com o trabalho de Carvalho (2019), as misturas M-A e M-C foram as que apresentaram melhores resultados, superiores àqueles exigidos na NBR 8491 - Tijolo de solo-cimento – Requisitos (ABNT, 2012).

2.2.1 Caracterização das Alvenarias de BTC

Para a análise do desempenho ambiental das alvenarias de BTC, é necessário a definição e caracterização argamassa de assentamento. Como esse trabalho visa o estudo da avaliação ambiental, é sugerido que esse a argamassa convencional seja substituída por um material que apresente um menor impacto ambiental relacionado a sua cadeia produtiva. Além disso, para o assentamento dos BTC é importante garantir que a argamassa seja compatível mecanicamente com o material utilizado nos blocos, e por isso, optou-se por trabalhar com as argamassas de solo-cimento. De acordo com o trabalho desenvolvido por Ferreira e Júnior *(2011)*, a argamassa de solo-cimento no traço, em volume, de 1:6 (cimento: solo), pode substituir a argamassa convencional para o processo de assentamento dos BTCs.

2.2.2 Consumo de Materiais

Na Tabela 2 estão apresentadas as quantidades de material utilizadas na produção de um bloco para cada mistura e para 1m^2 de alvenaria para cada mistura.

BLOCO	**Traço**	**Solo (kg)**	**Areia (kg)**	**Cimento (kg)**	**Cal (kg)**	**Resíduo (kg)**	**Energia (KWh)**	**Transporte (TKm)**
M-A Solo: Cimento	10:01	1,38	0,56	0,17	-	-	-	-
M-B Solo: Cal	10:01	1,38	0,56	-	0,08	-	-	-
M-C Solo: Cal: RC	09:01:01	1,24	0,50	-	0,08	0,16	0,02	0,00
M-D Solo: Cimento: RC	10 : 0,5 : 0,5	1,38	0,56	0,09	-	0,08	0,01	0,00
ALVENARIA	Traço	Solo (kg)	Areia (kg)	Cimento (kg)	Cal (kg)	Resíduo (kg)	Energia (KWh)	Transporte (TKm)
M-A Solo: Cimento	10:01	89,21	36,08	11,76	-	-	-	-
M-B Solo: Cal	10:01	89,21	36,08	1,52	4,68	-	-	-

Continua...

...continuação

BLOCO	Traço	Solo (kg)	Areia (kg)	Cimento (kg)	Cal (kg)	Resíduo (kg)	Energia (KWh)	Transporte (TKm)
M-C Solo: Cal: RC	09:01:01	81,02	32,77	1,52	4,68	9,22	1,05	0,13
M-D Solo: Cimento: RC	10 : 0,5 : 0,5	89,21	36,08	6,64	-	4,61	0,53	0,06
ARGAMAS-SA	Traço	Solo (kg)	Areia (kg)	Cimento (kg)	Cal (kg)	Resíduo (kg)	Energia (KWh)	Transporte (TKm)
Solo: Cimento	6: 1	7,29	2,95	1,52	-	-	-	-

Obs.: Os valores apresentados para a alvenaria correspondem ao consumo de material para produção dos blocos somados ao material necessário para produzir as argamassas de assentamento para 1m^2 de parede.

Tabela 2. Consumo de material

2.2.3 Fronteiras do Sistema

O escopo que conduziu este estudo se enquadra como "do berço ao portão", sendo consideradas as seguintes etapas, de acordo com a EN 15878 (CEN, 2011): (A1) extração de matéria-prima, (A2) transporte do material até a indústria, (A3) produção, (A4) transporte até o canteiro e (A5) incorporação na construção, conforme é apresentado na Figura 1.

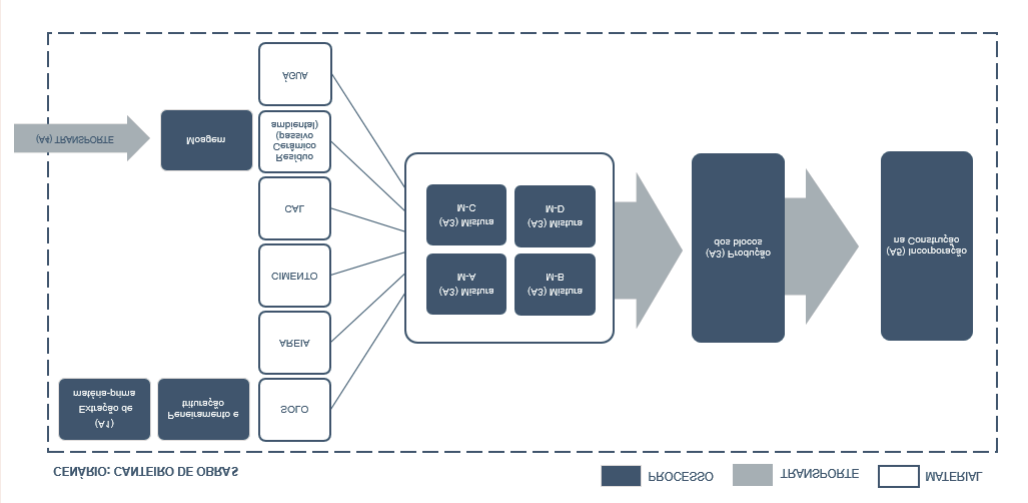

Figura 1. Fronteiras do sistema

É importante destacar que os blocos são produzidos artesanalmente, já que o escopo dessa pesquisa considera que sua produção é realizada dentro do canteiro de obras a partir de processos participativos de construção. Isso significa que a extração de matérias-primas e a produção dos blocos começam e terminam dentro no canteiro de obras, não existindo, para esse produto, nenhum impacto ambiental referente as etapas (A2) transporte do material até a indústria, e (A4) transporte até o canteiro.

Com relação ao resíduo cerâmico, salienta-se que o trabalho busca uma análise comparativa a partir da quantificação do impacto ambiental provocado pela incorporação de um passivo ambiental no processo de fabricação dos blocos em comparação a outros métodos de estabilização. Conforme é apontado por Mateus, Fernandes e Teixeira *(2019)* os blocos de terra comprimida são componentes construtivos que apresentam impactos ambientais potenciais significativamente mais baixos quando comparados aos tijolos cerâmicos convencionais. A partir dessa ideia, o presente estudo busca encontrar uma alternativa construtiva com ainda menor impacto, incorporando o passivo ambiental para diminuir o uso de estabilizantes químicos como o cimento e a cal. Na medida em que esse produto tem saldo ambiental, não cabe alocar, ao passivo, nenhum impacto referente a sua cadeira produtiva primária. Portanto, as únicas entradas consideradas para o resíduo cerâmico são referentes as etapas de (A4) transporte do resíduo proveniente da fábrica de tijolo até o canteiro e o custo de eletricidade necessário para o seu beneficiamento já no canteiro de obras.

3. ANÁLISE DO INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA

A etapa de inventário do ciclo de vida corresponde à coleta de dados referentes aos processos de produção do BTC, da alvenaria de BTC e dos materiais utilizados para a produção desses dois produtos. O método de avalição do impacto do ciclo de vida (AICV) utilizado foi o IMPACT 2002+. Esse método prevê o agrupamento dos dados do inventário em quatro categorias de danos distintas sendo elas (a) Saúde Humana, (b) Qualidade do Ecossistema, (c) Mudanças Climáticas e (d) Consumo de Recursos. Esse método foi escolhido por se tratar de um método "combinado" que considera as vantagens das abordagens *midpoint* e *endpoint* simultaneamente. Além disso, trata-se de uma abordagem de análise simplificada uma vez que resume as categorias de impacto avaliadas e facilita a interpretação dos resultados. A modelagem dos produtos foi realizada no software SimaPro v.9.1

Conforme detalhado na Tabela 2, os BTCs são constituídos principalmente de solo com correção do teor de areia, utilizando uma proporção de 70% de solo natural e 30% de areia lavada. Além desses dois materiais, os blocos recebem os estabilizantes químicos, como a cal e o cimento Portland, e água. Para a elaboração do modelo no software do Simapro foi escolhido para o representar o solo natural, dados correspondentes a argila extraída mecanicamente. Essa decisão foi tomada, pois foi considerado ser este o *dataset* disponível mais próximo ao cenário definido no escopo desta pesquisa. Para os outros materiais, como a cal hidráulica CH-III, o cimento CP-II-F-32 e a areia, foram usados dados "globais" do banco de dados Ecoinvent v3.6.

Para o resíduo cerâmico são considerados os custos ambientais do transporte e do beneficiamento do produto. Para a aquisição do resíduo cerâmico, buscou-se por fábricas de tijolos cerâmicos próximas ao canteiro de obras, e uma foi selecionada por se encontrar a 14Km do local da obra sendo ela a fábrica mais próxima. Com

relação aos custos ambientais referentes ao beneficiamento do material, para incorporação desse produto como adição mineral, é necessário realizar a moagem durante quatro horas até obter uma granulometria adequada, sendo que o moinho utilizado possibilita a moagem de 7kg de material de uma única vez, conforme apresentado por Carvalho *(2019)*. Considerando esses dados, e a partir dos consumos de resíduo cerâmico apresentados na Tabela 2, foi levantado um dado primário de entrada de energia elétrica e de transporte a partir de uma média ponderada, correspondente apenas às quantidades de materiais necessários para a produção das unidades funcionais.

Na Tabela 3 são apresentados os dados do Ecoinvent 3.6 utilizados para a modelagem da ACV.

Insumos	Conjunto de Dados	Unidade
Cimento	Cement, Portland {BR}| market for cement, Portland | Cut-off, S	Kg
Cal hidratada	Lime, hydrated, packed {RoW}| market for lime, hydrated, packed | Cut-off, S	Kg
Areia	Sand {BR}| market for sand | Cut-off, S	Kg
Terra	Clay {RoW}| clay pit operation | Cut-off, S	Kg
Resíduo cerâmico	Electricity, low voltage {BR-South-eastern grid}| market for electricity, low voltage | Cut-off, S	Kwh
	Transport, freight, lorry 16-32 metric ton, euro3 {RoW}| market for transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3 | Cut-off, S	TKm

Tabela 3. Dados utilizados na modelagem da ACV

Para a etapa (A3) produção dos blocos, considerando que essa etapa é realizada manualmente, não há dados de entradas referente aos custos de energia, assim como para a etapa (A5) incorporação na construção, uma vez que a produção de argamassa de assentamento e a execução das paredes são construídas pela força de trabalho humano.

Apesar de existirem questões relacionadas a saúde humana diretamente vinculadas às etapas de trabalho humano no canteiro, além das entradas energéticas de consumo de alimentos, essas não foram consideradas no estudo. Cabe destacar que, para essa análise seria mais adequado realizar uma pesquisa relacionada a ACV Social, que não é o escopo do presente trabalho.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 AVALIAÇÃO AMBIENTAL DAS ETAPAS DE EXTRAÇÃO E PRODUÇÃO DOS BLOCOS DE SOLO-CIMENTO

Nas Figura 2 estão apresentados os potenciais danos ambientais provocados pela produção de 1 (uma) unidade funcional de blocos de terra comprimida, levando em consideração as etapas de (A1) extração de materiais-prima até a (A5) produção dos blocos no canteiro de obras. Os valores expressos no gráfico correspondem a soma dos custos ambientais de todos os materiais presentes nas misturas para cada categoria avaliada.

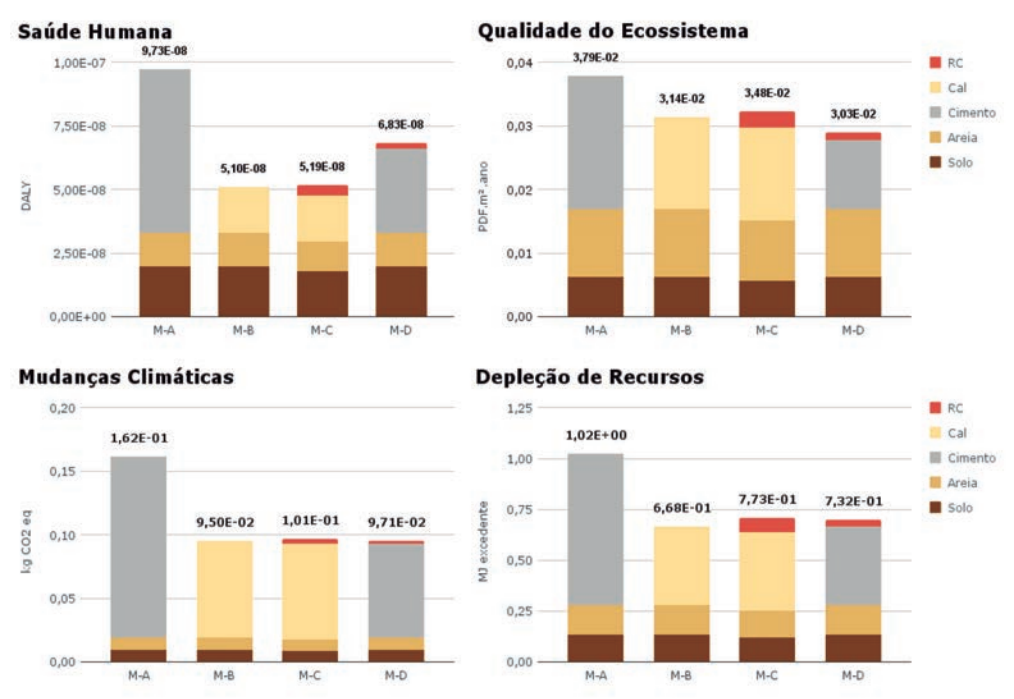

Figura 2. Gráficos síntese com os potenciais custos ambientais das misturas

Os resultados evidenciam a intensidade do dano ambiental provocado pelo cimento em comparação aos outros materiais utilizados na produção dos blocos. A mistura M-A (solo: cimento) é aquela que apresenta o maior custo ambiental em todas as categorias de danos, corroborando com o que foi apresentado por Caldas e Toledo *(2021)* em estudo semelhante. As misturas que recebem o cimento como o estabilizante químico são àquelas que apresentam maior custo ambiental, devido, principalmente, a dois fatores, a saber: a produção do clínquer em que acontece uma reação química de decomposição que libera um volume considerável de CO_2 e também a queima de grande volume de combustíveis que são necessários à produção do cimento. Além disso, há também os custos ambientais de transporte referente aos translado da matéria-prima até a indústria cimenteira e do produto até os pontos de venda.

As misturas M-B, M-C e M-D apresentaram um perfil ambiental bem diferente da mistura M-A, e com comportamento semelhante entre si, mesmo tratando-se de misturas que incorporam diferentes estabilizantes em diferentes dosagens.

Ao comparar a mistura M-A e M-B nota-se como que a substituição do cimento pela cal no sistema apresenta reduções significativas no impacto ambiental, principalmente com relação à categoria de Mudanças Climáticas e Saúde Humana. A produção da cal demanda custos energéticos de calcinação inferiores aos demandados pela produção do cimento Portland, por isso que, a mesma quantidade de cal e cimento na mistura, apresentam custos ambientais tão distintos. Cabe ressaltar que os blocos produzidos com a mistura M-B (solo: cal), de acordo com o trabalho de Carvalho *(2019)*, apresentaram desempenho mecânico inferior comparado a mistura M-A. Ainda que seja necessário incorporar um pouco mais de cal na mistura M-B para melhorar a resistência mecânica dos blocos, ela apresentaria custos ambientais superiores em relação a mistura M-A.

Considerando as altas emissões provocadas pela fabricação do Cimento Portland, busca-se no artigo avaliar alternativas de menor impacto para substituição parcial desse estabilizante químico, sendo, assim, importante destacar os impactos relacionados ao Potencial de Aquecimento Global (*Global Warming Potential* - GWP). A análise dessa categoria de impacto possibilita a comparação quantitativa dos impactos referentes a diferentes gases nocivos. Analisando os dados foi possível verificar que a mistura M-A se apresenta como a mais impactante gerando um custo ambiental de 34% a 30% mais alto em relação às misturas M-B (solo:cal), M-C (solo:cal:RC) e M-D (solo:cimento:RC). Quando são comparadas apenas as misturas que incorporaram cimento, M-A e M-D, verifica-se que, mesmo se apresentando em quantidades pequenas, o impacto desse material é muito expressivo, pois ao reduzir o consumo do cimento em 50% correspondeu a uma redução de 30% no impacto do bloco com relação a categoria GWP.

Cabe ressaltar que os blocos produzidos com a mistura M-B (solo: cal), de acordo com o trabalho de Carvalho (2019), apresentaram desempenho mecânico inferior comparado a mistura M-A. Ainda que seja necessário incorporar um pouco mais de cal na mistura M-B para melhorar a resistência mecânica dos blocos, ela apresentaria custos ambientais superiores em relação a mistura M-A. Apesar de o objetivo primário desse trabalho ser, apenas, o levantamento de dados relacionados ao desempenho ambiental dos elementos e dos sistemas construtivos em BTC, compreende-se a importância da realização de uma avaliação ecomecânica desses blocos, tendo em vista os resultados apontados por Carvalho (2019). A partir dessa investigação, será possível realizar um estudo mais aprofundado relacionando o desempenho ambiental e o desempenho mecânico dos BTC. Essa investigação permite quantificar de forma mais objetiva se, a adição de estabilizante químico, apresenta uma influência positiva ou negativa ao produto do ponto de vista ambiental. Essa análise configura um dos próximos passos da presente pesquisa.

Apesar do transporte ser um dos processos mais onerosos ao meio ambiente, fica evidente que o impacto ambiental provocado pelo transporte do resíduo cerâmico é pequeno quando comparado ao impacto da produção dos demais materiais. Observa-se que na mistura M-D a incorporação do resíduo cerâmico representa,

em média, uma redução de 31% dos impactos ambientais nas quatros categorias de danos, quando comparada a mistura M-A, sendo a redução mais expressiva na categoria de mudanças climáticas, onde atinge 41%. Além disso, o processo de beneficiamento do resíduo cerâmico apresentou impactos mínimos, que podem ser desprezados da análise. Sendo assim, dentro desse cenário, é possível afirmar que a reciclagem do resíduo cerâmico gera custos ambientais menores.

Sobre o impacto do solo, é relevante destacar que, de todos os materiais, ele é aquele que apresenta um o menor custo ambiental, mesmo sendo o material que se apresenta em maior volume dentro das misturas, de 81% a 90% em relação aos outros materiais. Além disso, a areia, que aparece em um volume de apenas 30% do volume do solo, apresenta um custo ambiental equivalente ao custo do solo, pois, como é concluído por Caldas *(2020)*, as etapas de produção da areia geram um maior consumo de combustível.

Emissão de poluentes e gases aumentam o potencial de mudanças climáticas e provocam prejuízos à saúde humana, causando problemas respiratórios, estresse térmico, desastres naturais, contribuindo para a diminuição da expectativa e qualidade de vida. Cabe destacar ainda que, quando é mencionada a categoria de dano Saúde Humana, o cimento, também, se apresenta como o material mais oneroso, principalmente, em função, das emissões de gases nocivos à saúde humana e de CO_2 já discutidas anteriormente. O grande volume de CO_2 apresenta forte influência em impactos de ecotoxicidade aquática e terrestre, eutrofização e efeitos respiratórios que podem provocar escassez de água para processos produtivos de alimentos e provocar, então, doenças como a desnutrição ou, doenças infecciosas, no caso de águas contaminadas. Face ao exposto, sendo considerado a categoria de dano em questão, a mistura M-A, em primeiro lugar, seguida da M-D, são aquelas que apresentam, o maior impacto ambiental já que que incorporam cimento.

4.2 AVALIAÇÃO AMBIENTAL DA PRODUÇÃO DAS ALVENARIAS

Na Figura 3 são apresentados os potenciais impactos ambientais provocados pela produção de $1m^2$ de alvenaria (unidade funcional), sendo feita a diferenciação dos impactos provocados pelos blocos e pelas argamassas de assentamento. Os valores expressos no gráfico correspondem a soma dos custos ambientais das argamassas e dos blocos.

Para a avaliação das alvenarias é importante destacar o custo ambiental de produção das argamassas em relação aos blocos. Para cada categoria de danos, as argamassas correspondem a um percentual de impacto distinto, variando de 10% até 20%. Em $1m^2$ de parede, o volume de argamassa de assentamento necessário para produção da alvenaria corresponde a 10% do volume de material necessário para produção dos blocos e, em algumas categorias de danos, o custo ambiental da argamassa pode corresponder a 20% do impacto da alvenaria, como no caso da mistura M-B em Saúde Humana.

Com essas informações é possível verificar que, as argamassas de assentamento nesse cenário, são responsáveis por uma parte considerável dos impactos ambientais da unidade funcional. O fato de outras misturas apresentarem um impacto relativo inferior ao da mistura M-B não significa que apresentam um bom desempenho ambiental. A interpretação que se faz é que os impactos dos blocos são mais altos para essas misturas, como é o caso da mistura M-A em todas as categorias de danos. Portanto, é importante que sejam estudas outros métodos de assentamento dos blocos, partir da utilização de outro traço para as argamassas ou até mesmo utilizando outros materiais como a cola de PVA, por exemplo.

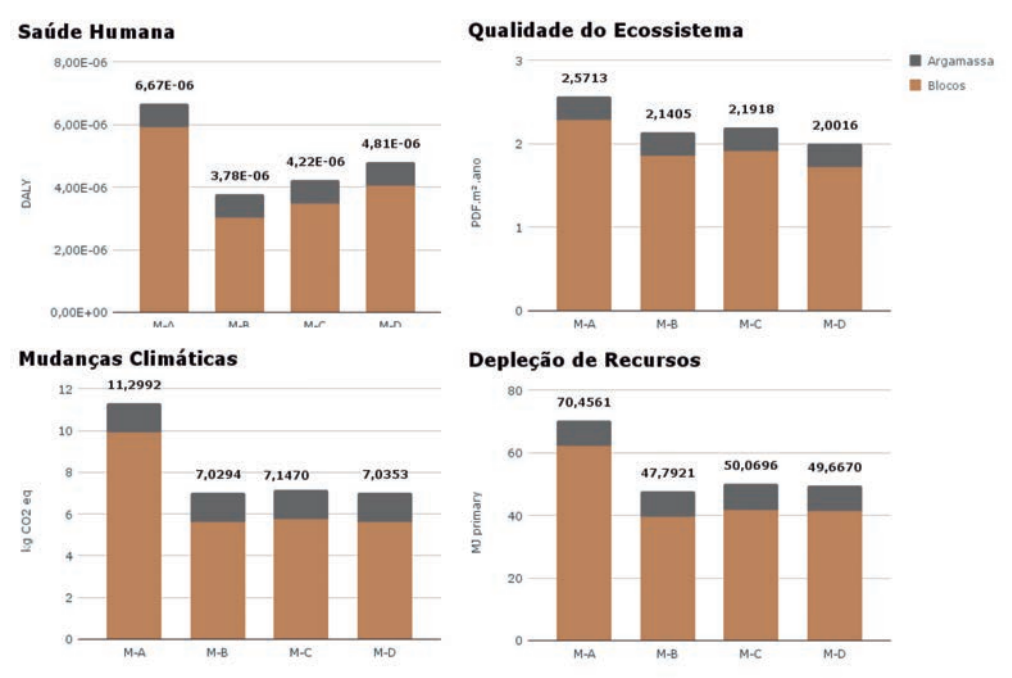

Figura 3. Alvenaria – Comparação dos potenciais impactos ambientais provocados pelos blocos e argamassas

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Observa-se que o cimento, apesar de ser um dos materiais mais utilizados pela indústria da construção, é, também, um dos mais onerosos do ponto de vista ambiental. Sob este olhar, a cal se mostrou o estabilizante mais apropriado, já que é capaz de reduzir significativamente o impacto sobre a produção dos blocos e alvenarias. Nos modelos que contém resíduo cerâmico (M-C e M-D), embora apresentem razoável diferença entre si, ambos expressam vantagens ambientais, mesmo na mistura que contém cimento.

Além disto, cabe apontar que embora a obtenção de materiais do próprio terreno ou de fornecedores próximos ao canteiro tenha sido um imperativo da comunida-

de na Ocupação Solano Trindade, sobretudo por reduzir custos econômicos, esta estratégia contribui na redução de custos ambientais.

No cenário brasileiro, apesar do grau de incerteza relativo à escassez de um banco de dados nacional para uma série de materiais e processos, a Avaliação de Ciclo de Vida é uma ferramenta eficiente para o estudo dos potenciais danos. Através da metodologia realizada neste trabalho foi possível conduzir análise de desempenho ambiental pautada em parâmetros quantitativos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCERAM, A. B. (2021). *Associação Brasileira de Cerâmica*. Fonte: <Disponível em: www.abceram.org.br>.

ABNT. (2012). *NBR 8491 - Tijolo de solo-cimento - Requisitos.* Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABRELPE, A. B. (2020). *Panorama de resíduos sólidos no Brasil.*

BEN-ALON, L., LOFTNESS, V., HARRIES, K., DIPIETRO, G., & COCHRAN, E. (14 de 05 de 2019). Cradle to site Life Cycle Assessment (LCA) of natural vs conventional building materials: A case study on cob earthen material. *Building and Environment*, pp. 1-22.

BNB, B. N. (2010). *Informe Setorial Cerâmica Vermelha*. Ceará: Banco Nacional do Nordeste do Brasil - BNB.

CALDAS, L. R. (2016). Avaliação Do Ciclo De Vida Energético (Acve) E Do Desempenho Térmico de Uma Habitação de Light Steel Framing com o Uso de Diferentes Tipos de Isolantes Térmicos. *REEC - Revista Eletrônica De Engenharia Civil, 11*. doi:https://doi.org/10.5216/reec.V11i2.37863

CALDAS, L. R., & PAIVA, R. d. (2020). Argamassas de Terra Versus Convencionais: Avaliação do Desempenho Ambiental Considerando o Ciclo de Vida. Florianópolis.

CALDAS, L., & FILHO, R. (2021). Avaliação ambiental do sistema construtivo de alvenaria de blocos de solo-cimento considerando diferentes especificações de projeto. *Gestão & Tecnologia de Projetos, 16*(2). doi:https://doi.org/10.11606/gtp.v16i2.161978

CALDAS, L., CARVALHO, M., & TOLEDO, R. (jul./set. de 2020). Avaliação de estratégias para a mitigação dos impactos ambientais de revestimentos argamassados no Brasil. *Ambiente Construído, 20*(3), 343-362.

CALDAS, L., SPOSTO, R., PAULSE, P., & HORA, K. (2016). Desempenho térmico do sistema de vedação vertical nas emissões de CO_2: estudo de caso para uma edificação escolar localizada em Goiânia – GO. *ENCAC - XVI ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO.*

CARVALHO, B. T. (2019). *Arquitetura com Terra na Construção Sustentável: Blocos de Terra Comprimido para Produção de Habitação.* Dissertação (Mestrado

em Arquitetura). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Faculdade de Arquitetura Urbanismo, Programa de Pós-Graduaçao em Arquitetura - FAU/UFRJ., Rio de Janeiro.

CARVALHO, T. N. (2018). Diretrizes da avaliação do ciclo de vida aplicadas à tomada de decisões em projeto. *Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo).* Rio de Janeiro: UFRJ - Proarq.

FERREIRA, G., & JÚNIOR, A. (março/abril de 2011). COLA À BASE DE PVA E ARGAMASSA DE SOLO-CIMENTO COMO ALTERNATIVAS. *Construções Rurais e Ambiência, 31*(2), 237-248.

GONÇALVES, J. P. (2005). *Desenvolvimento e Caracterização de Concretos de Baixo Impacto Ambiental Contendo Argila Calcinada e Areia Artificial.* Tese (Doutorado) - COPPE/UFRJ.

MATEUS, R., FERNANDES, J., & TEIXEIRA, E. (2019). Environmental Life Cycle Analysis of Earthen Building Materials. *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials.*

NEVES, C., & MILANI, A. (2011). Bloco de Terra Comprimida - BTC. Em C. NEVES, & O. B. FARIAS, *Técnicas de Construção com Terra* (p. 79). Bauru: FEB-UNESP/PROTERRA.

UNEP. (2020). *Building sector emissions hit record high, but low-carbon pandemic recovery can help transform sector – UN report.* Acesso em 17 de 07 de 2021, disponível em United Nations Environmental Programme: https://www.unep.org/news-and-stories/press-release/building-sector-emissions-hit-record-high-low-carbon-pandemic