

ARTEFATOS COM AREIA DESCARTADA DE FUNDIÇÃO E SUA VIABILIDADE

BRICKS WITH WASTE FOUNDRY SAND AND VIABILITY

PAULO PAIVA OLIVEIRA LEITE DYER, DR. | ITA

SILVELENE ALESSANDRA SILVA, Dra. | IPE

LUIS MIGUEL GUTIERREZ KLINSKY, Dr. | Road Consortia of Development Bank of Latin America, Panamá - PA.

GUSTAVO LAUER COPPIO, MSC. | IFESP

LUCIANA SIMONES CIVIDANES, DRA. | ITA

MARYANGELA GEIMBA DE LIMA, Dra. | ITA

RESUMO

A sustentabilidade na construção civil objetiva a redução de desperdícios e impactos ambientais ao integrar o empreendimento com o meio ambiente. Neste contexto, o uso de materiais de construção alternativos como os resíduos industriais não perigosos, se torna uma solução neste âmbito. Com objetivo de mensurar esta solução sustentável, neste artigo foi demonstrada a viabilidade técnica e econômica da reutilização do resíduo industrial Areia Descartada de Fundição (ADF), como agregado em artefatos de cimento. Para tanto, a ADF foi caracterizada segundo as metodologias para agregados da construção e foram produzidos lotes de artefatos de cimento contendo 33 % de ADF (em massa). Já o estudo econômico foi desenvolvido determinando a economia direta do reuso em USD/t, com a proposição de dois modelos matemáticos. Os resultados mostraram a viabilidade técnica em relação às normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) para agregados e artefatos de cimento, e uma economia proporcionada da ordem de 1 a 10 %, além de benefícios na cadeia de produção e descarte de ADF.

PALAVRAS CHAVE : Areia descartada de fundição; economia ambiental; sustentabilidade na construção civil

ABSTRACT

Sustainability applied to constructions, aims waste and environmental impacts reducing by building and environment integration. In this context, the use of alternative materials, such as non-hazardous industrial waste, becomes a solution. For measure this sustainable impact, this paper demonstrated the technical and economic viability of Waste Foundry Sand (WFS); an industrial waste; as an aggregate in concrete blocks. To this end, the WFS was characterized according to construction aggregates methodologies and a batch of concrete brick with 33% of WFS (by mass) were produced. The economic study, in other hand, was developed by determination of direct economy due to reuse (in USD/t); with the mathematical deduction of two algorithms. The results showed technical viability within the Brazilian criteria, as Association of Technical Standards (ABNT) standards for aggregates and bricks. In addition, the economy generated were about 1 to 10%, increased by others monetary benefits on production and disposal chain of WFS.

KEY WORDS: Waste foundry sand, environmental economics, sustainability in construction



1. INTRODUÇÃO

O contexto da sustentabilidade, aplicada à construção civil, prevê a redução do consumo de recursos minerais pelo reaproveitamento de resíduos industriais com baixa toxicidade, produzidos em larga escala afirma Bina (2002).

A ADF é um resíduo industrial não perigoso, segundo a norma ABNT NBR 10004 (ABNT, 2004), produzido em larga escala. Cujo descarte, em aterros sanitários, acarreta na redução da vida útil destes. Da mesma forma, esta cadeia de geração e descarte onera significativamente as fundições devido as taxas de aterramento (ESSENCIS, 2018). Com isso, o reuso da ADF promove a sustentabilidade na construção civil e beneficia os atores envolvidos nesta cadeia, além do meio ambiente quando indevidamente descartada (BINA, 2002).

Conforme Bhardwaj e Kumar (2017) e Dyer *et al.* (2021), esta oportunidade se torna plausível pela estreita semelhança físico-química da ADF com o agregado mineral, amplamente utilizado na construção civil. Com isso, seu reuso em blocos de concreto torna-se uma possibilidade em termos de redução de consumo de recursos, melhor destinação do resíduo e geração de economia financeira direta, destacam Pereira *et al.* (2018).

Todavia, salienta Bonin, Rossini e Zabim (1995), é imprescindível o entendimento das características da ADF, bem como do seu comportamento na matriz cimentícia, segundo critérios técnicos como da ABNT NBR 7211 (ABNT, 2005a) e NBR 6136 (ABNT, 2008).

Neste cenário, o objetivo deste artigo é determinar a viabilidade técnica e o impacto financeiro da utilização de ADF como agregado em artefatos de cimento a taxa de 33 % (em massa), em relação aos outros materiais que constituem o artefato: cimento e agregados minerais: mistura de seixo de rio, areia fina e média.

2. CONTEXTUALIZAÇÃO

2.1. Sustentabilidade

O conceito de desenvolvimento sustentável vem sendo cunhado desde o início da década de 70, promovendo um modelo de desenvolvimento sem comprometer as gerações futuras quanto à qualidade de vida e disponibilidade de recursos, afirma Cavalcanti (2012). Neste primeiro momento, a ideia permanecia um pouco difusa e subjetiva, uma vez que todo o progresso que a humanidade experimentou até então sempre se firmou na luta do homem em dominar a natureza, processando todo recurso natural em benefício próprio, uma via de mão única (CAVALCANTI, 2012).

De acordo com Novaes (1992), no início da década de 90, o conceito obteve grande repercussão mundial devido a conferências como a Eco 92, realizada na cidade do Rio de Janeiro. Já no início dos anos 2000, salienta Diniz (2002), foram firmados protocolos internacionais por meio da conferência Rio + 10, os quais revisaram objetivos

como de tornar mais eficiente o nível de consumo e diminuir a pegada ecológica.

Com este conceito consolidado nas últimas décadas, destaca Cavalcanti (2012), surgiu um movimento para a implantação de políticas ambientais a nível global, restringindo principalmente as indústrias, em seguir normas e procedimentos para produzir de maneira eficiente e com menor impacto ambiental. Cujo conceito, afirma Vieira (2020), não se restringe apenas à relação direta entre produção e poluição, mas também entre consumo e educação ambiental.

Neste âmbito, a sustentabilidade aplicada à construção civil se desenvolveu como uma das grandes vertentes do desenvolvimento sustentável; aplicando-se diretamente ao setor da construção civil, com princípios pautados na educação ambiental e redução de impactos; visto que as cidades e seu metabolismo respondem por um elevado consumo de recursos e produção de resíduos, afirmam Yemal, Teixeira e Nããs (2011).

2.2. Sustentabilidade e construção civil

Neste retrospecto, a sustentabilidade na construção civil visa integrar a educação socioambiental aos projetos, salientam Yemal, Teixeira e Nããs (2011). Em que, durante a construção, ocupação e pós-construção (reformas e demolição) do empreendimento, objetiva-se o emprego de tecnologias que visem a eco eficiência e redução de desperdícios, sem prejudicar características de design e conforto, destaca Librelotto (2005).

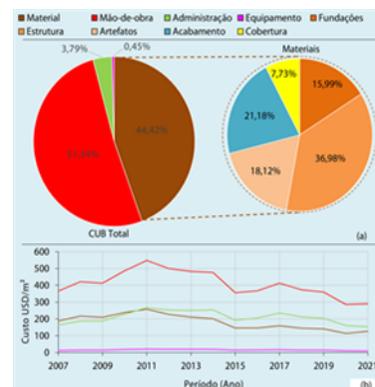


Figura 01: Composição do CUB em construções (a); e a evolução destes custos (USD/m²) em 14 anos (b)

Fonte: SINDUSCON (2021) e Cordeiro (2007)

De acordo com o Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (2021), um empreendimento que utiliza materiais e tecnologias biocompatíveis poderá ainda converter estas ações em pontos para obtenção de certificações (PARDINI, 2009). Destas, segundo Stefanuto e Henkes (2013), destacam-se o uso de energias limpas, a redução do consumo de água e a utilização de materiais de construção alternativos. Todavia, o grande entrave para a consolidação desta "visão sustentável" na construção civil são os custos considerados elevados, salientam Librelotto (2005) e Yemal, Teixeira e Nããs (2011). Desta forma, existe

a demanda por alternativas que promovam a sustentabilidade com a redução de custos diretos, reitera Bina (2002).

2.3. Custos da construção civil

Segundo Tisaka (2006), em um empreendimento os custos diretos são contabilizados de forma quantitativa unitária a partir de metodologias paramétricas, como Custo Unitário Básico (CUB), de acordo a norma ABNT NBR 12721 (ABNT, 2005).

A partir da aplicação desta metodologia ao banco de dados do Sindicato da Construção Civil do Estado de São Paulo (2021) e estimativas de Cordeiro (2007), é possível determinar a composição do CUB, como mostra a Figura 01.

De acordo com estes gráficos, os materiais de construção ocupam uma parcela significativa no custo por m² em edificações (cerca de 44 %), com destaque para os artefatos ou blocos de cimento (cerca de 18 %), conforme afirma Cordeiro (2007).

2.4. ADF e contexto

As indústrias siderúrgicas, por sua vez, tal como o setor da construção civil, desempenham um papel de grande importância econômica no Brasil e no mundo, afirma Bina (2002). Estas são responsáveis pela produção de peças metálicas pelo processo de fundição, destaca Dyer *et al.* (2021), a qual é ilustrado pela Figura 02.

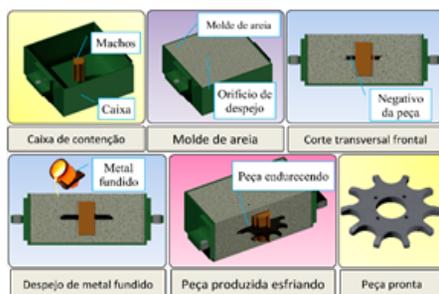


Figura 02: Esquema de produção de peças por fundição
Fonte: ABIFA (2021)

Durante esta dinâmica produtiva, os moldes arenosos são descartados após o uso, gerando um volume significativo de ADF, que acompanha a produção de peças pré-fabricadas, como apresenta a Figura 03 (BINA, 2002; ABIFA, 2021).

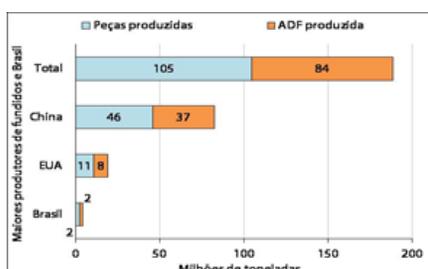


Figura 03: Produção média de ADF e peças entre 2012-2019
Fonte: Bina (2002) e ABIFA (2021)

Desta forma, ao passo que a demanda mundial por fundidos aumenta, ocorre a geração de grandes volumes de ADF, afirmam Dyer *et al.* (2021).

2.5. Classificação de ADF

A ADF, de acordo com Bonin, Rossini e Zambim (1995) é um resíduo industrial composto basicamente por sílica (areia mineral), traços de metais (do processo de fundição) e resinas (utilizadas como aglomerantes nos moldes). Estas substâncias, utilizadas para oferecer coesão aos moldes são compostas de resinas fenólicas, furânicas, uretânicas, fenólico-uretânicas ou termofixas, afirmam Dyer *et al.* (2021). Todavia, devido as baixas concentrações destas na ADF a Decisão de Diretoria 152/2007 da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (SÃO PAULO, 2007) classifica o resíduo, conforme a NBR 10004 (ABNT, 2004), como não perigoso inerte ou não inerte (Classe II-A ou II-B, respectivamente).

Porém, apesar de não perigoso, seu descarte deverá ocorrer somente em aterros sanitários industriais explicam Bonet (1995) e Bina, Rossini e Zambim (2002). E assim, a produção de ADF onera significativamente a cadeia produtiva das siderurgias com tarifas e os próprios administradores de aterros, visto que além de reduzir sua vida, evita que estes recebam resíduos considerados mais valiosos, como os perigosos (ou Classe I), destacam Dyer *et al.* (2021).

Com isso, o reaproveitamento de ADF na construção civil é uma forma de economizar insumos e reduzir o consumo de recursos naturais, visto que os materiais de construção ocupam uma participação importante no custo da obra por m² construído (Figura 01), salientam Cordeiro (2007) e Pereira *et al.* (2018).

2.6. Reuso de ADF na construção civil

Os estudos pioneiros acerca do reuso de ADF na construção civil remontam a meados da década de 70, com pesquisas focadas na reutilização em taludes e pavimentação (EMERY, 1975). Já no início da década de 90, a Sociedade Americana de Fundição (AFS, 1992) lançou o primeiro estudo completo acerca das características e possíveis usos do resíduo, como resume a Tabela 01.

Na Tabela 01, os usos são diversificados como projetos de pavimentação, edificação e obras de infraestrutura, destaca Javed (1994). No Brasil, Bonin, Rossini e Zambim (1995), Bina (2002) e Bonet (2002), foram os percussores da técnica, delimitando as seguintes possibilidades de reuso de ADF:

- I. Para produção de clínquer e lãs minerais;
- II. Como agregado para concreto de baixo custo;
- III. Como agregado para concreto asfáltico;
- IV. Para ajuste de solos na agricultura;
- V. Como misturas de solos em subleitos e aterros.

De acordo com Bina (2002), o processo é viável tecnicamente para a produção de clínquer com fontes geradoras e consumidoras próximas. Nas demais aplicações, Bonet (2002) considera resultados tecnologicamente aceitáveis, embora haja muito desenvolvimento relativo à caracterização a ser realizado, segundo a NBR 7211 (ABNT, 2005a). Portanto, o reuso de ADF na construção civil é promissor, contribuindo para a sustentabilidade, além de trazer benefícios econômicos (CBCS, 2021).

POSSÍVEIS USOS	TIPOS DE ADF (AGLUTINANTE)					
	AREIA VERDE (ÁGUA)	FENÓLICA	FENÓLICA URETÂNICA	FURÂNICA	TERMOFIXA (SHELL)	SILICATO DE SÓDIO
ASFALTO	X	X	*	*	*	0
ARTEFATOS	*	*	*	*	X	*
TIJOLOS	X	X	*	*	*	
CIMENTO	X	X	*		X	X
AGREGADOS	X	X	*	*	*	*
CONCRETO	X	X	*			
ARGAMASSA						*
SUBLEITOS		X	*		*	X
TALUDES	X	*	*	X	*	
ATERROS	X	X	*			
SOLOS	*	*	*	*	*	*
LEGENDA						
X	PROJETOS IMPLANTADOS					
*	APLICAÇÃO TEÓRICA					
0	INADEQUADO PARA REUSO					

Tabela 01: Aplicações da ADF na construção civil
 Fonte: AFS (1992)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Com o objetivo de motivar a sustentabilidade na construção civil, foi realizado um estudo de viabilidade técnica e econômica em ADF e blocos de vedação contendo o resíduo como agregado.

3.1. Materiais

3.1.1. ADF

As amostras foram coletadas em um aterro sanitário (150 kg no total), segundo os procedimentos da NBR 10007 (ABNT, 2004c), com redução por quarteamento, conforme a ABNT NBR NM 27 (ABNT, 2001a).

3.1.2. Mistura de seixo com areia

Uma mistura de seixo de rio com areia foi coletada de um porto de areia, segundo os métodos determinados pela

ABNT NM 26 (ABNT, 2001), e reduzida para os experimentos pela ABNT NBR NM 27 (ABNT, 2001a). Consiste de uma mistura natural de areia convencional (50 %) 2,00-0,075 mm e seixo de rio (50 %) 12,70-4,75 mm.

3.1.3. Areia convencional

Areia convencional foi obtida no mesmo local do seixo de rio, sendo coletada e preparada de maneira análoga. Possui dimensão nominal máxima inferior a 2,00 mm e mínima igual ou superior a 0,075 mm.

3.1.4. Reagentes químicos

Os seguintes reagentes químicos foram utilizados para o ensaio de solubilização: água deionizada, ácido clorídrico P.A. 1,00 N, hidróxido de sódio P.A. 1,00 N, ácido acético glacial P.A. e água destilada para o ensaio de lixiviação.

3.1.5. Cimento Portland CP V ARI

Foram utilizados 20 sacos de 40 kg de cimento Portland CP V ARI, com massa unitária nominal de 3,1 kg/L, obtidos de representante comercial, para a fabricação dos blocos de cimento.

3.1.6. Água

Água potável proveniente da rede pública para confecção dos artefatos de concreto.

A Figura 04 ilustra todos os materiais utilizados.



Figura 04: Fotografias dos materiais utilizados
 Fonte: os autores.

3.2. Métodos

3.2.1. Caracterização de materiais

A Figura 05 contempla um fluxograma com os tipos de caracterização, métodos de ensaio e o material analisado; sendo que todos os ensaios foram realizados em tréplica.

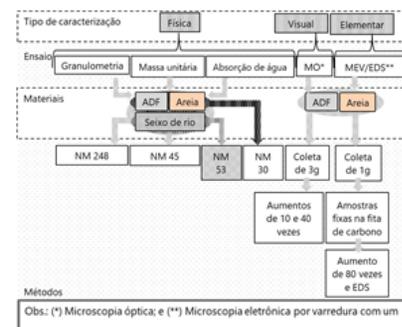


Figura 5: Fluxograma dos ensaios de caracterização.
 Fonte: os autores.

3.2.2. Produção de artefatos

Foram produzidos lotes de artefatos de cimento (blocos de vedação), de dimensões: 140 mm de largura, 190 mm de altura e 390 mm de comprimento, vazados com 25 mm de espessura, conforme as recomendações para blocos M-15 ½ Classe B da ABNT NBR 6136 (2008), como ilustrado pela Figura 06. Destes lotes, 50% foram confeccionados utilizando ADF como agregado, e o restante sem o resíduo (controle), segundo as proporções da Tabela 02.



Figura 06: Fotografias da produção de blocos;
Fonte: os autores.

Esta proporção de 33,3 % (Tabela 02) foi definida devido à elevada perda de qualidade dos artefatos com taxas superiores, enquanto taxas inferiores a 33,3 % não impactavam significativamente em termos ambientais e econômicos. Durante a fabricação dos lotes, a proporção de cimento foi fixada em 1 parte para cada 9 partes (em volume) de agregados.

3.2.3. Ensaios em artefatos de cimento

Uma vez produzido o lote, os ensaios apresentados pela Tabela 03 foram realizados após 28 dias de cura. Na Tabela 03 são especificadas as quantidades recomendadas de blocos por teste, segundo cada método, sendo que o resultado foi obtido a partir da média aritmética de cada teste.

TIPO DE	MATÉRIA-PRIMA (% EM VOL.)				QUANT.
	AREIA	SEIXO	ADF	A/C	
ADF	33,3	33,3	33,3	56	14
Controle	66,6	33,3	0	56	14

Tabela 02: Composição de agregados nos blocos de vedação
Fonte: os autores.

BLOCO	ENSAIO	MÉTODO	QUANT.
CONTROLE	ABS. DE ÁGUA	NBR 9778	2
ADF	RESISTÊNCIA	NBR 12118	12
CONTROLE	ABS. DE ÁGUA	NBR 9778	2
ADF	RESISTÊNCIA	NBR 12118	12

Tabela 03: Ensaios realizados nos blocos de cimento;
Fonte: os autores.

Foi realizada a metodologia ABNT NBR 9778 (ABNT, 2009) para determinar a retenção de água nos artefatos, a qual determina a absorção por imersão. No ensaio de resistência a compressão, os blocos foram preparados por tratamento superficial com película de gesso. A Figura 07 ilustra estes procedimentos.



Figura 07: Fotografias ilustrando os ensaios nos artefatos
Fonte: os autores.

3.2.4. Ensaios ambientais em artefatos

Após os ensaios destrutivos, os fragmentos dos artefatos foram macerados e testados segundo a ABNT NBR 10005 – lixiviação de resíduos sólidos (ABNT, 2004a) e ABNT NBR 10006 – solubilização de resíduos sólidos (ABNT, 2004b), e então foram analisados segundo o método padrão APHA (2017), conforme ilustra a Figura 08.

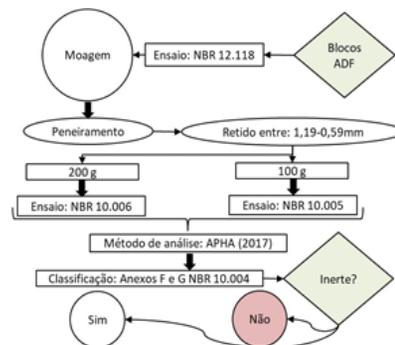


Figura 08: Fluxograma de execução dos ensaios ambientais.
Fonte: os autores.

3.2.5. Estudo econômico

Para estimar a economia gerada, inicialmente foram definidos os custos dos materiais, segundo fontes oficiais, como mostra a Tabela 04; neste caso não foram considerados custos para ADF.

Material	Areia	Seixo	Cimento	ADF	Água
Variável:	C_A	C_S	C_I	C_{ADF}	C_G
USD/t:	7,92	7,81	84,19	0,0	0,45
Fonte	(SINDUSCONSP, 2021)			(BINA, 2002)	(SABESP, 2021)

Tabela 04: Custos unitários dos materiais empregados.
Fonte: (SINDUSCONSP, 2021) e (SABESP, 2021).

Com base nestes dados, foram propostas as Equações (1) e (2) para calcular o custo unitário de cada bloco (ADF e controle). As equações foram deduzidas a partir da proporção volumétrica apresentada pela Tabela 04; tendo

em vista que, devido aos custos dados em USD/t, foram utilizadas as massas unitárias obtidas na caracterização para conversão.

$$C_C = V_b \left(0,6 \cdot C_A \cdot U_A + 0,3 \cdot C_S \cdot U_S + 0,1 \cdot C_I \cdot U_I + \frac{0,1 \cdot C_{ADF} \cdot U_{ADF}}{0,56} \right) \quad (1)$$

$$C_{ADF} = V_b \left(0,3 \cdot C_A \cdot U_A + 0,3 \cdot C_{ADF} \cdot U_{ADF} + 0,3 \cdot C_S \cdot U_S + 0,1 \cdot C_I \cdot U_I + \frac{0,1 \cdot C_{ADF} \cdot U_{ADF}}{0,56} \right) \quad (2)$$

Onde, CC e CADF são os custos (em USD) das unidades de artefatos controle e ADF, respectivamente; $V_b = 5,7$ é o volume do bloco (em litros); e U_A , U_S , U_I e U_{ADF} são as massas unitárias (em kg/L) da areia, seixo de rio, cimento e ADF, respectivamente. Já a economia relativa por m^2 construído (ECUB) foi calculada pela razão entre CC e a diferença entre CC e CADF, considerando a proporção que os materiais (44%) e artefatos (37%) ocupam no CUB (Figura 01), segundo a Equação (3).

$$E_{CUB} = 0,44 \cdot 0,37 \cdot \left[\frac{C_C - C_{ADF}}{C_C} \right] \quad (3)$$

Contudo, apesar de não contabilizados, os recursos do uso de ADF envolvem sua retirada, tratamento mecânico preliminar e transporte, os quais podem ser compensados pela desoneração de taxas de aterramento e uso do aterro para resíduos Classe I. Equações (4) e (5) calculam estes benefícios para as indústrias siderúrgicas e administradoras de aterro. Onde, BI (siderúrgicas) e BA (aterros) são os recursos gerados ou economizados em USD por tonelada de ADF (qADF) reutilizada; e TCI = 4,60 USD e TCI = 13,80 USD são taxas típicas para Classe II e Classe I (respectivamente) por tonelada de resíduo aterrado, segundo a Essencis Ecosystemas (2018).

$$B_I = q_{ADF} \cdot (T_{CI}) \quad (4)$$

$$B_A = q_{ADF} \cdot (T_{CI} - T_{CI}) \quad (5)$$

4. RESULTADOS

4.1. Ensaio de caracterização

Os ensaios de granulometria, massa unitária e absorção são apresentados pela Figura 09 e Tabela 05, juntamente com critérios e resultados acerca do mesmo tema, encontrados na literatura científica. Já as micrografias (MO e MEV) são mostradas pela Figura 10.

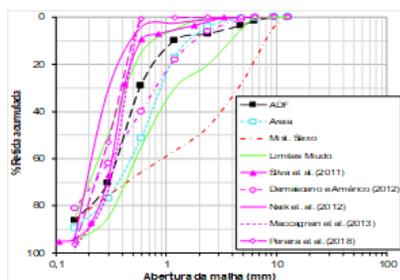


Figura 09: Granulometria dos agregados e ADF.

Fonte: os autores.

A partir destes resultados, observa-se que a ADF se enquadra como agregado miúdo, segundo os limites da ABNT NBR 7211 (ABNT, 2005), com características semelhantes à areia natural. Estes aspectos foram observados

em outros estudos.

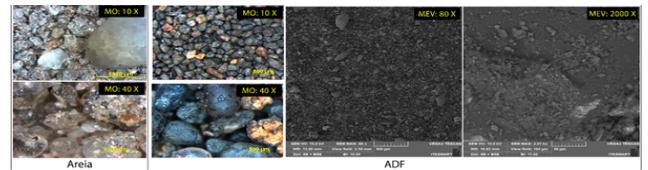


Figura 10: Micrografias obtidas por MO (10 e 40 vezes de aumento) e MEV (80 e 2000 vezes de aumento) da ADF e areia.

Fonte: os autores.

Já as micrografias (MO e MEV) corroboram as afirmações de Javed (1994), Bonin, Rossini e Zambim (1995) e Silva, Silidônio Júnior e Silva (2011), que descrevem partículas esféricas, subangulares e polidas. Durante estas análises, também foi obtida a composição elementar da ADF por EDS, como apresenta o gráfico da Figura 11.

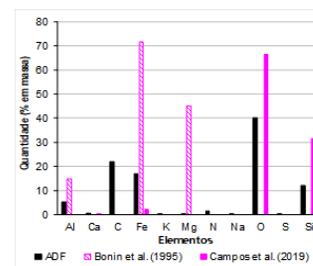


Figura 11: Composição elementar da ADF.

Fonte: os autores.

Estes resultados mostram que a ADF é constituída principalmente por sílica, além de metais oriundos do processo de fundição, sem apresentar substâncias tóxicas como metais pesados.

4.2. Ensaio em artefatos de cimento

Uma vez determinadas as características da matéria-prima empregada na manufatura dos artefatos de cimento, foi possível conhecer a granulometria e massa unitária efetiva da mistura de agregados, como apresentado pela Figura 12.

Neste caso, outras pesquisas (NAIK *et al.*, 2012; MACCAGNAN *et al.*, 2013; PEREIRA *et al.*, 2018) demonstram propriedade similares aos componentes da mistura.

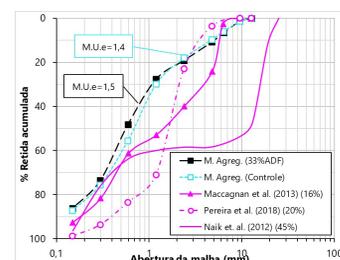


Figura 12: Composição granulométrica da mistura de agregados

Fonte: os autores.

Outrossim, os lotes apresentaram comportamento mecânico em conformidade para Classe B, segundo critérios da ABNT NBR 6136 (2008),

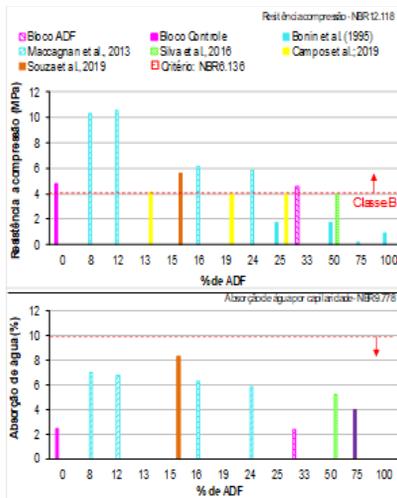


Figura 13: Propriedades mecânicas dos artefatos ADF e Controle
 Fonte: os autores.

e similar à literatura, como mostra a Figura 13.

4.3. Ensaios ambientais em blocos

Os resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização indicaram que os artefatos contendo ADF estão em conformidade com a classificação de não perigosos e inertes, de acordo com a ABNT NBR 100004 (ABNT, 2004), conforme mostra a Tabela 06.

Parâmetro	Lixiviação	Vmp	Solubil.	Vmp
	mg/L			
Arsênio	<0,003	1	<0,003	0,01
Bário	0,42	70	0,09	0,7
Cádmio	<0,008	0,5	<0,001	0,01
Chumbo	<0,063	1	<0,004	0,01
Cianeto	-	-	<0,005	0,07
Cloreto	-	-	12	250
Cromo	<0,10	5	<0,003	0,05
Fenóis	<0,003	20	<0,003	0,01
Ferro	-	-	<0,010	0,3
Fluoreto	0,35	150	0,45	1,50
Manganês	-	-	0,002	0,1
Mercurio	<0,0006	0,1	<0,0006	0,001
Nitrogênio	-	-	0,35	10
Prata	<0,012	5	<0,001	0,05
Sódio	-	-	12,40	200
Sulfato	-	-	77,00	250
Surfactantes	-	-	0,17	0,5
Zinco	-	-	0,01	5

Tabela 06: Resultados dos ensaios ambientais.
 Fonte: autores.

De acordo com os anexos G e F da ABNT NBR 10004 (ABNT, 2004), as substâncias em estado livre (após ensaios de lixiviação e solubilização) estão abaixo dos valores máximos permitidos (Vmp), classificando os blocos ADF como inertes. Estes resultados corroboram as afirmações de Bonin, Rossini e Zambim (1995), Silva, Silidônio Júnior e Silva (2011) e Silva *et al.* (2016), que salientaram o encapsulamento definitivo das partículas de ADF pela matriz

cimentícia. Com isso, comprova-se a viabilidade técnica e ambiental do uso de ADF como agregado em artefatos de cimento.

4.4. Economia gerada

Outrossim, a economia E_g revela um impacto significativo ao CUB. Outros estudos (BONIN *et al.*, 1995; CAMPOS *et al.*, 2019) comprovam estes resultados, como apresentado na Tabela 07, a qual também exhibe o consumo de matéria-prima. Estes resultados mostram uma economia de quase 1 % no CUB total (mais de 3,00 USD por m² construído), cujo artefato é 10 % mais barato que os convencionais.

Consumo de matéria-prima						
Bloco/Ref.	ADF	Cim.	Areia	Seixo	Água	Total
	kg					
Bloco ADF	2,4	1,8	2,7	2,7	3,2	9,6
Bloco Ctr	0	1,8	5,5	2,7	3,2	10,0
Bonin, R. e Z. (1995)	5,0	1,2	3,3	3,8	5,9	13,3
Campos <i>et al.</i> (2019)	3,4	0,8	0	10,5	1,0	14,7
Custo blocos e matéria-prima (USD)						
Bloco/Ref.	ADF	Cim.	Areia	Seixo	Água	Total
	USD por unidade (bloco)					
Bloco ADF	0	0,15	0,02	0,02	0,001	0,19
Bloco Ctr	0	0,15	0,04	0,02	0,001	0,21
Bonin, R. e Z. (1995)	Não informado pelo autor					0,30
Campos <i>et al.</i> (2019)	0	0,17	0	0,16	0,01	0,33
Economia relativa (blocos controle e com ADF)						
E_g (%)	0,81%					
Bonin, R. e Z. (1995)	3,05%					
Campos <i>et al.</i> (2019)	0,57%					

Tabela 07: Impactos econômicos do reuso de ADF no CUB.
 Fonte: autores.

Em relação ao consumo de matéria-prima, poderiam ser construídos mais de 61 milhões de m² ou 39 mil prédios de 3 andares (dois apartamentos por andar com 260 m² cada), gerando uma economia de 206 milhões de USD, em função do CUB (SINDUSCONSP, 2021), caso a produção anual (em 2020) de ADF fosse reaproveitada (ABIFA, 2021), segundo a metodologia de Cordeiro (2007). Isso evitaria a extração de mais 1,9 milhões de toneladas de areia, gerando uma economia de mais de 15 milhões de USD, segundo a cotação apresentada na Tabela 04.

Porém, neste presente estudo e em outros trabalhos similares (BONIN, ROSSINI e ZAMBIM, 1995; CAMPOS *et al.*, 2019), a ADF não é taxada. Todavia, sua retirada, tratamento e transporte geram custos, os quais poderiam ser compensados pela desoneração das tarifas de descarte, seja pelo reuso direto das siderurgias ou pela priorização do descarte de resíduos Classe I em aterros. A Tabela 08 apresenta estes benefícios extras, conforme a metodologia determinada pelas Equações (4) e (5).

ECONOMIA (USD)		
BENEFÍCIOS DO REUSO	SIDERURGIAS	ADM. ATERROS
	B_1	B_A
POR TONELADA	4,60	9,20
POR BLOCO	0,01	0,02
PELA PRODUÇÃO ADF 2020	9055803,80	18111607,60

Tabela 08: Benefícios gerados na cadeia de produção do resíduo.
Fonte: autores.

Conforme mostra a Tabela 08, os custos de reuso de ADF podem ser compensados pela desoneração de tarifas de aterramento, uma vez que estes custos são próximos ao preço comercial da areia mineral dado pela Tabela 04. Bonin, Rossini e Zambim (1995) reiteram estas afirmativas, estimando benefícios ainda maiores, da ordem de 0,06 USD por cada bloco às indústrias siderúrgicas.

Neste cenário, verifica-se que, além de viável, o reuso de ADF como agregado em artefatos de cimento para vedação gera benefícios econômicos, que impactam na cadeia de geração e descarte do resíduo e na construção civil.

Com isso, esta iniciativa se torna mais uma medida para contribuir para a sustentabilidade na construção civil, segundo os preceitos de Yemal, Teixeira e Nãas (2011), Cavalcanti (2012) e do Conselho Brasileiro de Construção Sustentável (2021).

5. CONCLUSÕES

Conclui-se que o reuso de ADF como agregado, substituindo parcialmente o agregado miúdo na fabricação de artefatos ou blocos de cimento (sem função estrutural) para construção civil é uma iniciativa técnica e ambientalmente viável, uma vez que foram cumpridos os requisitos normativos em ensaios laboratoriais, tanto para o resíduo quanto para o artefato pronto.

O reuso ainda produz um material de construção de custo inferior ao convencional, imbuído de benefícios à cadeia de geração e descarte do resíduo. Assim, esta iniciativa torna-se possível, sendo que, em termos comerciais, contribui para a sustentabilidade na construção civil, uma vez que grandes quantidades de recursos naturais esgotáveis deixam de ser retirados do meio ambiente, evitando impactos ambientais.

AGRADECIMENTOS

À empresa Essencis Ecosystemas Ltda. pelo fornecimento de ADF e outras informações de gerenciamento do resíduo.

Ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica, pela disponibilidade para execução de ensaios laboratoriais de caracterização de agregados e ADF.

Ao Instituto de Estudos Avançados, pela disponibilidade

dos laboratórios de microscopia óptica.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, pela disponibilização de laboratórios para caracterização microestrutural por MEV/EDS.

À empresa Blocos Messiano Ltda., pela fabricação de artefatos de concreto para testes.

À Universidade do Vale do Paraíba, pela disponibilização de laboratórios para ensaios nos blocos de concreto.

REFERÊNCIAS

ABIFA. Associação Brasileira de Fundação. **Índices Setoriais 2012-2019**. Disponível em: <https://www.abifa.org.br/>. Acesso em: 07 jul. 2022.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10004**: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10005**: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004a.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10006**: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004b.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 10007**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004c.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12118**: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 12721**: Avaliação de custos de construção para incorporação imobiliária e outras disposições para condomínios edilícios. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 6136**: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 7211**: Agregados para Concreto – Especificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2005a.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM 26**: Agregados – Amostragem. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR NM 27**: Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro: ABNT, 2001a.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). **Standard Methods**: for the Examination of Water and Wastewater. 23. ed. Washington: American Public Health

Association, 2017.

BHARDWAJ, B.; KUMAR, P. Waste foundry sand in concrete: A review. **Construction and Building Materials**, 2017, v. 156, n. 2017, p. 661-674.

BINA, P. **Metodologia de Utilização de Rejeitos Industriais na Pavimentação: Estudo de Caso de Uso de Areia de Fundição**. Dissertação de Mestrado. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Programa de Mestrado Profissional em Habitação. 2002, 133 p.

BONET, I. I. **Valorização do Resíduo Areia de Fundição (RAF). Incorporação nas Massas Asfálticas do Tipo C.B.U.Q.** Dissertação de Mestrado. Santa Catarina: Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. 2002. 142 p.

BONIN, A. L.; ROSSINI, A. J., ZABIM, A. F. Reutilização de Areia Preta de Fundição na Construção Civil. In: FENAF 95 FEIRA DE FUNDIDOS, INSUMOS E EQUIPAMENTOS, 95., 1995, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: Congresso de Fundição da ABIFA, 1995. p. 203-221.

CAMPOS, M. A.; FERRÃO, A. M. A.; FERNANDES, F. A. A.; CAZELA, A. M. Blocos de Concreto com Areia de Descarte de Fundição: um Case de Sucesso de Viabilidade Econômica, Propriedades Mecânicas e de Durabilidade. In: 18º CONAF – CONGRESSO ABIFA DE FUNDIÇÃO, 18., 2019, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: Congresso de Fundição da ABIFA, 2019.

CAVALCANTI, C. Sustentabilidade: mantra ou escolha moral? Uma abordagem ecológico-econômica. **Estudos Avançados**, 2012, v. 26, n. 74, p. 35-50.

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO (SABESP). **Tarifas de Distribuição e Tratamento de Água**. Disponível em: <http://site.sabesp.com.br/site/Default.aspx>. Acesso em: 07 jul. 2022.

CONSELHO BRASILEIRO DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL (CBCS). **Avaliação do ciclo de vida modular**. Disponível em: <http://www.cbcs.org.br/website/>. Acesso em: 07 jul. 2022.

CORDEIRO, F. R. F. S. **Orçamento e Controle de Custos na Construção Civil**. Monografia. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais. Curso de Especialização em Construção Civil. 2007. 65 p.

DAMASCENO, B. C.; AMÉRICO, J. D. Utilização de areia de fundição na produção de blocos de concreto sem função estrutural. In: XX CONGRESSO INTERNO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNICAMP, 20., 2012, Campinas. **Anais [...]**. Campinas: Universidade de Campinas, 2012.

DINIZ, E. M. Os Resultados da Rio +10. **Revista do Departamento de Geografia**, 2002, v. 15, n. 2002, p. 31-35.

DYER, P. P. O. L.; KLINSKY, L. M. G.; SILVA, S. A.; SILVA, R. A.; LIMA, M. G. Macro and microstructural characterization of

waste foundry sand reused as aggregate. **Road Materials and Pavement Design**, 2021, v. 22, n. 2.

EMERY, J. J. Waste and Byproduct Utilization in Highway Construction. **Resource Recovery and Conservation**, 1975, v. 1, n. 1975, p. 25-43.

ESSENCIS ECOSSISTEMAS. Administração e Manejo de Aterro Sanitário na Cidade de São José dos Campos/SP. São José dos Campos: **Relatório de circulação interna**. 2018.

JAVED, S. Use of Waste Foundry Sand in Highway Construction. Indiana: **JHRP-94/23 - Final Report**. Joint Highway Research Project, Civil Engineering Building, Purdue University, 1994. 304 p.

LIBRELOTTO, L. I. **Modelo para Avaliação da Sustentabilidade na Construção Civil nas Dimensões Econômica, Social e Ambiental (ESA): Aplicação no Setor de Edificações**. Tese de Doutorado. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina. Programa De Pós-Graduação em Engenharia De Produção. 2005. 317 p.

MACCAGNAN, B.; PELIZZARI, P. M.; DRUCK, F.; PAGNUSSAT, D. T. Otimização do Proporcionamento de Areias de Fundição Incorporadas na Fabricação de Blocos de Concreto. In: 55º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 55., 2013, Gramado. **Anais [...]**. Gramado: Instituto Brasileiro de Concreto, 2013.

NAIK, T. R.; KRAUS, R. N.; RAMME, B. W.; CANPOLAT, F. Effects of fly ash and foundry and on performance of architectural precast concrete. **Journal of Materials Civil Engineering**, 2012, v. 24, p. 851-859.

NOVAES, W. Eco-92: avanços e interrogações. **Estudos Avançados**, 1992, v. 6, n. 15, p. 79-93.

PARDINI, A. F. **Contribuição ao Entendimento da Aplicação da Certificação LEED e do Conceito de Custos no Ciclo de Vida em Empreendimentos mais Sustentáveis no Brasil**. Dissertação de Mestrado. Campinas: Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. 2009. 227 p.

PEREIRA, D. F.; ZIMMER, G. V.; SILVA, J. D.; CUSTÓDIO, R. R. Reaproveitamento da Areia de Desmoldagem como Substituto Parcial da Areia em Artefatos de Concreto. **Mix Sustentável**, 2018, v. 4, n. 1, p. 66-72.

SÃO PAULO, O ESTADO. Decisão de Diretoria nº 152, de 03 de abril de 2007. Dispõe sobre procedimentos para gerenciamento de areia de fundição. **Diário Oficial Estado de São Paulo**: Caderno Executivo I (Poder Executivo, Seção I), SP, p. 51, 03 abr. 2008. 152/2007/C/E.

SILVA, A. F.; VIEIRA, C. A.; CANÇADO, F. M.; FARIA, L.; RAPHAEL PIMENTA GUIMARÃES, R. P.; SANTOS, J. A. S. Caracterização Físico-Química e Avaliação da Viabilidade de Reuso de “Areias de Fundição” para Fabricação de Blocos de Concreto sem Função Estrutural. **Revista**

Brasileira de Gestão e Engenharia, 2016, v. 14, n. 05, p. 83-104.

SILVA, C. E.; SILIDÔNIO JR., L. C.; SILVA, R. E. B. Aspectos Qualitativos da Fabricação de Blocos de Concreto Utilizando Resíduos de Areia de Fundação. In: XXXI ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 29., 2011. Belo Horizonte. **Anais [...]**. Belo Horizonte: ENEGEP, 2011.

SINDICATO DA CONSTRUÇÃO CIVIL DO ESTADO DE SÃO PAULO (SINDUSCONSP). **CUB: Custo unitário básico da Construção Civil**. Disponível em: <https://sindusconsp.com.br/cub/>. Acesso em: 07 jul. 2022.

SOUZA, S. T. M.; MARTINI, M. C.; FERREIRA, T. V. Reutilização de Areia Descartada de Fundação na Produção de Blocos de Concreto Estrutural. **Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável**: Capítulo 28, 2019, 2., p. 290-299.

STEFANUTO, A. P. O.; HENKES, J. A. Critérios para Obtenção da Certificação LEED: um Estudo de Caso no Supermercado Pão de Açúcar em Indaiatuba/SP. **R. gest. sust. ambient.**, 2013, v. 1, n. 2, p. 282-332.

THE AMERICAN FOUNDRYMEN'S SOCIETY (AFS). **Final Report on Phase II: Alternate Utilization of Foundry Waste Sand**. Illinois: Department of Commerce and Community affairs, 1992. 82 p.

TISAKA, M. **Orçamento na construção civil: consultoria, projeto e execução**. 1. ed. São Paulo: PINI, 2006.

VIEIRA, L. B. A Educação Ambiental, a Sociedade de Consumo e a Necessidade da Sustentabilidade. **Revbea**, 2020, v. 15, n. 4, p. 95-109.

YEMAL, J. A.; TEIXEIRA, N. O. V.; NÄÄS, I. A. Sustentabilidade na Construção Civil. In: III INTERNATIONAL WORKSHOP ADVANCES IN CLEANER PRODUCTION, 3., 2011. São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: International Workshop Advances in Cleaner Production, 2011.

AUTORES

ORCID: 0000-0001-7110-6871.

PAULO PAIVA OLIVEIRA LEITE DYER, Dr. | Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA). Infraestrutura Aeronáutica. | Correspondência para: São José dos Campos - SP. Brasil. Praça Marechal Eduardo Gomes 12231-010 São José dos Campos, SP | e-mail: paulo_dyer@yahoo.com

ORCID: 0000-0003-1601-5373.

SILVELENE ALESSANDRA SILVA, Dra. | Instituto de Pesquisas Espaciais (IPE) - Laboratório Associado de Sensores e Materiais | Correspondência para: Avenida dos Astronautas, 1758 - Jardim da Granja, São José dos Campos, SP - Cep: 12227-010 | email: lenisoni@uol.com.br

ORCID: 0000-0002-2052-9951.

LUIS MIGUEL GUTIERREZ KLINSKY, Dr. | Road Consortia

of Development Bank of Latin America, Panamá - PA. | Correspondência para: Boulevard Pacífica, P.H Oceanía Business Plaza. Torre 2000, piso 27 Punta Pacífica. Ciudad de Panamá | email: luisgk@outlook.com

ORCID: 0000-0001-5232-5104.

GUSTAVO LAUER COPPIO, MSc. | Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFESP) | Correspondência para: Av. João Olímpio de Oliveira, 1561 - Vila Asem, Itapetininga - SP, 18202-000. | email: gustavo-coppio@gmail.com

ORCID: 0000-0001-6932-8619.

LUCIANA SIMONES CIVIDANES, Dra. | Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) - Departamento de Química. São José dos Campos - SP. Brasil | Correspondência para: Praça Marechal Eduardo Gomes 12231-010 São José dos Campos, SP | email: lu_civi@yahoo.com.br

ORCID: 0000-0002-0046-3991.

MARYANGELA GEIMBA DE LIMA, Dra. | Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA) - Infraestrutura Aeronáutica. São José dos Campos - SP. Brasil | Correspondência para: Praça Marechal Eduardo Gomes 12231-010 São José dos Campos, SP | email: magdlima@gmail.com

COMO CITAR ESTE ARTIGO

DYER, Paulo Paiva Oliveira Leite; SILVA, Silvelene Alessandra; KLINSKY, Luis Miguel Gutierrez; COPPIO, Gustavo Lauer; CIVIDANES, Luciana Simones; DE LIMA, Maryangela Geimba. Artefatos com Areia Descartada de Fundação e sua Viabilidade. **MIX Sustentável**, [S.l.], v. 8, n. 4, p. 45-58, ago. 2022. 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.MIX2021.v8.n4.49-62>.

DATA DE ENVIO: 20/08/2021

DATA DE ACEITE: 16/08/2022

PUBLICADO EM: 01/09/2022

EDITOR RESPONSÁVEL: Paulo Cesar Machado Ferroli

Registro da contribuição de autoria:

PPOLD; SAS; LMGK; GLC; LSC e MGL: Conceituação, Curadoria, Análise formal, Aquisição de financiamento, Investigação, Metodologia, Administração de projetos, Validação, Visualização, Escrita - rascunho original, Escrita - revisão e edição

Declaração de conflito: nada foi declarado.