

DESIGN SUSTENTÁVEL: ARTEFATOS COM COPRODUTO DA INDÚSTRIA DA ALUMINA

SUSTAINABLE DESIGN: ARTIFACTS WITH CO-PRODUCTS FROM THE ALUMINA INDUSTRY

Wener M. T. Santos^{1*}

Ana Lucia A. de Oliveira Zandomenghi¹

* Autor para correspondência: wener.santos@ufma.br

Resumo: Motivado pela necessidade de exploração de alternativas sustentáveis para materiais de construção, este estudo pioneiro investigou a viabilidade do uso do coproduto de alumina na produção de argamassa, uma área pouco explorada na literatura. Apesar da natureza alcalina do coproduto, sua adição às argamassas demonstrou fornecer resistência adequada e impacto ambiental reduzido. A introdução gradual do coproduto resultou em uma ligeira redução na resistência à compressão, mas de acordo com padrões aceitáveis. As análises químicas revelaram aumentos significativos nos teores de óxidos de ferro, sódio e alumina nas amostras, conferindo características distintivas às argamassas. Ambientalmente, as amostras foram classificadas como classe II-A não inerte, indicando menor impacto ecológico. Os artefatos produzidos com as amostras A2 e A3 apresentaram boa resistência à compressão e acabamento avermelhado, em virtude do óxido de ferro. O trabalho oferece uma perspectiva sustentável e inovadora para a reutilização de resíduos industriais, com benefícios potenciais tanto para a indústria quanto para o meio ambiente.

Palavras-chave: coproduto de alumina; *design*; construção; produtos.

Abstract: Motivated by the need to explore sustainable alternatives in construction materials, this pioneering study investigated the feasibility of using alumina byproduct in mortar production, an area unexplored in the literature. Despite the alkaline nature of the byproduct, its addition to mortars demonstrated to provide adequate strength and reduced environmental impact. The gradual introduction of the byproduct resulted in a slight reduction in compressive strength but remained within acceptable standards. Chemical analyses revealed significant increases in iron oxide, sodium, and alumina in the samples, imparting distinctive characteristics to the mortars. Environmentally, the samples were classified as non-inert class II-A, indicating a lower ecological footprint. Artifacts produced from A2 and A3 samples exhibited good compressive strength and a reddish finish due to the presence of iron oxide. This study offers a sustainable and innovative perspective on the reuse of industrial waste, with potential benefits for both the industry and the environment.

Keywords: alumina byproduct; design; construction; products.

¹ Universidade Federal do Maranhão (UFMA) – São Luís (MA), Brasil.

INTRODUÇÃO

O Design desempenha um papel fundamental no contexto da sustentabilidade, com o propósito de gerar novas ideias e produtos que buscam expandir e explorar métodos e técnicas de desenvolvimento. Nesse contexto, a sustentabilidade no Design motiva o ato de conectar aspectos tecnológicos e ecológicos, resultando na criação de abordagens que agregam valor tanto no âmbito social quanto cultural (John; Zordan, 2001).

De acordo com Manzini (2008), o *design* estratégico permite-nos conceber e desenvolver efetivamente novas soluções sustentáveis que podem ser aplicadas em nossa sociedade. Assim, a relevância da sustentabilidade na construção civil reside na capacidade humana de utilizar materiais não esgotáveis, não prejudiciais, reciclados e renováveis, além de aprimorar técnicas de produção alternativas que resultem em uma redução significativa na geração de resíduos (Manzini, 2008).

Segundo John e Zordan (2001), a quantidade de resíduos de construção e demolição varia significativamente, situando-se entre 163 kg e 3.658 kg por pessoa, em escala global. É importante notar que tais valores se referem apenas aos resíduos sólidos domésticos, não incluindo os resíduos gerados durante a produção desses materiais, o que acrescenta uma camada adicional de considerações.

Coletti *et al.* (2016) discutem a relevância da reciclagem e do reúso de resíduos no contexto da fabricação de tijolos sustentáveis, com foco específico no uso do lodo cerâmico. Eles conduziram testes em uma fábrica na Itália para explorar a abordagem. Essa pesquisa está alinhada com o interesse crescente de diversos estudiosos na busca por conhecimentos relacionados à reciclagem, ao reúso de resíduos e às diversas maneiras de produção e aplicação de produtos nas fases da construção, com o objetivo de promover a reutilização de materiais como uma estratégia eficaz para mitigar os impactos ambientais (Coletti *et al.*, 2016).

Dado que a indústria da construção civil é responsável por mais de 50% dos resíduos sólidos, conforme destacado pelo Conselho Internacional de Construção em 2002, tornou-se indispensável contemplar a sustentabilidade de maneira mais pragmática. Isso implica buscar a redução dos impactos ambientais, sem comprometer a qualidade dos resultados dos produtos, e ao mesmo tempo preservar o meio ambiente para as gerações vindouras; tudo isso enquanto se mantém custos reduzidos, em conformidade com os princípios do tripé da sustentabilidade, o que se relaciona diretamente com a proposta de *design* aplicado a um desenvolvimento sustentável (Brasil, 2010).

O foco do presente estudo é um dos resíduos provenientes da indústria da construção civil: a bauxita residual, também conhecida como lama vermelha, um subproduto gerado durante o processo de refino da bauxita para a produção de alumina. Para efeitos deste trabalho, a bauxita residual será referida como coproduto da indústria de alumina. Esse coproduto, proveniente do processo Bayer, resulta na geração de aproximadamente 2 milhões de toneladas para cada 1 milhão de toneladas de óxido de alumínio produzido. Composto principalmente por alumínio, ferro, silício, titânio, sódio e cálcio, o material apresenta partículas extremamente finas e alto nível de alcalinidade, com um pH superior a 12 (Santos, 2012).

Esta pesquisa tem como objetivo desenvolver um processo viável e eficiente para a aplicação dos resíduos provenientes da bauxita, com o propósito de transformá-los em novos produtos com o auxílio do emprego das ferramentas do *design*. O processo busca não apenas mitigar o impacto ambiental associado ao descarte dos resíduos da bauxita, como também explorar oportunidades de reutilização e reciclagem desses materiais, contribuindo assim para a sustentabilidade ambiental e econômica da indústria.

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Na metodologia adotada, os materiais e as composições desenvolvidos foram submetidos a avaliações abrangendo análises de resistência à compressão, fluorescência de raios X, análise de lixiviação, conforme a norma NBR 10005 (ABNT, 2004a); solubilidade, de acordo com a NBR 10006 (ABNT, 2004b), e confecção de artefatos, como *pavers* intertravados com 16 faces, blocos sextavados, pisos táteis, pisos tipo “pezão” e guias de “bate-roda”.

Os materiais utilizados na formulação das composições incluíram água, o coproduto de alumina proveniente de empresa do Maranhão e cimento Portland tipo CP-IV-32 fornecido pela empresa Bravo. As amostras foram preparadas na forma de argamassa, com a exclusão da brita na mistura, seguindo os percentuais estabelecidos na tabela 1.

Tabela 1 – Composição (argamassas) das amostras

Amostras	Cimento (%)	Coproducto (%)
A1	40	10
A2	30	20
A3	20	30
A4	10	40

Fonte: os autores

Em cada amostra, foram moldados dez corpos de prova de formato cilíndrico para cada idade de ruptura, ou seja, para 3, 7 e 28 dias, com duplicação. Esses corpos de prova apresentaram dimensões de 5x10 cm, seguindo as diretrizes estabelecidas pela norma NBR 7215, que regula o procedimento de moldagem e cura de corpos de prova (ABNT, 2019), conforme ilustrado na figura 1.

Figura 1 – Preparo dos corpos de prova



Fonte: os autores

Após um período de 24 horas, procedeu-se à desmoldagem dos corpos de prova, identificando-os individualmente. Em seguida, eles foram imersos e mantidos em água saturada de cal até a realização dos ensaios de resistência à compressão, conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018).

Com as composições estabelecidas, além da produção dos corpos de prova, também foram confeccionados diversos artefatos com o propósito de avaliar as características visuais dos produtos resultantes.

ANÁLISE DOS RESULTADOS OU DISCUSSÃO

As pesquisas relacionadas ao coproduto de alumina revelaram uma lacuna importante em termos de artigos que abordam técnicas de produção e fabricação de produtos com tal material. Isso nos coloca na vanguarda no que diz respeito à produção de protótipos usando esse coproduto.

Antes da formulação das composições, conduziu-se uma análise detalhada dos materiais envolvidos. Em seguida, desenvolvemos uma matriz com base nesses materiais específicos para a aplicação em questão.

Cimento CP-IV-32

Com relação às características físico-químicas, o cimento CP-IV contém material pozolânico que varia de 15% a 50% em massa, o que confere ao cimento menor permeabilidade. Possui um teor máximo de óxido de magnésio (MgO) de 6,5%, trióxido de enxofre (SO₃) e uma perda ao fogo máxima de 4,5%.

Coproduto da alumina

O coproduto da alumina exibe um pH de 12,6 e uma granulometria com partículas extremamente finas, representando 98,01% do seu conteúdo, com uma densidade de 3,18 g/cm³. Além disso, a análise química reforça a presença significativa de óxido de ferro, alumina e sílica, como evidenciado na tabela 2.

Tabela 2 – Análise química do coproduto

Elementos resíduo de bauxita	Elementos resíduo de bauxita
Al ₂ O ₃	20,14
SiO ₂	15,01
Fe ₂ O ₃	40,03
CaO	0,79
TiO ₂	3,35
K ₂ O	0
MnO	0,03
ZrO ₂	0,26
Na ₂ O	7,55
Ba	Ba 0
SO ₃	0
PF	12,84

Fonte: os autores

Em relação à lixiviação e à solubilidade, o coproduto é classificado como classe I, o que significa que é considerado perigoso por causa de seu pH alcalino, que excede o valor padrão de 12,5 estabelecido pela norma.

A composição da argamassa foi cuidadosamente elaborada de acordo com os parâmetros apresentados na tabela 3, com um aumento gradual da proporção do coproduto na massa.

Tabela 3 – Análise química do coproduto

Amostras	Cimento (kg)	Coproduto (kg)	Água (Litros)	A/C
A1	40	10	25	0,625
A2	30	20	28	0,933
A3	20	30	44	2,200
A4	10	40	54	5,400

Fonte: os autores

O aumento no volume de água observado está possivelmente relacionado às reações de hidrólise dos íons alumínio e ferro, com ênfase nas espécies como $[Al_6(OH)_15]^{3+}$, $[Al_8(OH)_20]^{4+}$, $[Al_{54}(OH)_{144}]^{18+}$ e $AlO_4Al_{12}(H_2O)_{12}(OH)_{247}^{+}$, que predominam sobre os íons Al^{3+} nessas condições. Quanto às reações de hidrólise das partículas de óxidos de ferro, que também carregam uma carga positiva nas mesmas condições de pH, os mecanismos de desestabilização ainda carecem de uma explicação mais clara. Essa hipótese é sustentada por analogias com processos de tratamento de água, nos quais, principalmente, espécies minerais com Al^{3+} são empregadas como agentes floculantes. Tal uso acaba demandando um maior volume de água para alcançar o nível de plasticidade necessário para a trabalhabilidade da argamassa proposta neste estudo.

Outro fator a ser considerado é o aumento na relação água/cimento (A/C), um parâmetro que quantifica a quantidade de água e cimento utilizada na mistura do concreto e que afeta diretamente sua resistência. É importante observar que, quanto maior a relação A/C, menor será a resistência final do material.

Resistências à compressão

Ao analisar a variação da resistência à compressão em relação ao tempo de cura durante o período de 28 dias, como ilustrado no gráfico 1, nota-se que a amostra A1 exibe a maior resistência. Conforme a substituição do cimento por parte do coproduto é realizada na composição dos corpos de prova, ocorre uma redução dessa propriedade mecânica nas amostras, conforme visto na tabela 3.

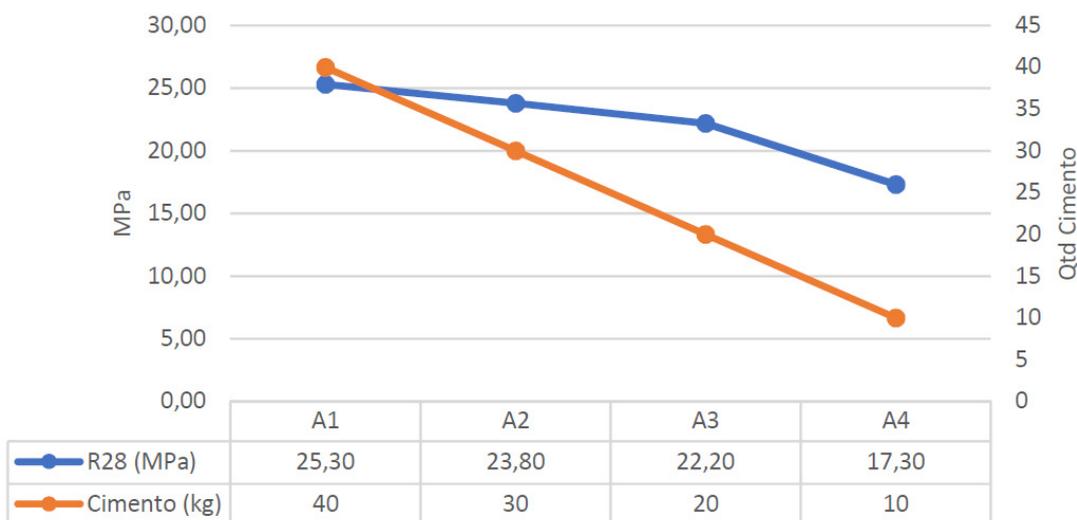
Tabela 3 – Resistência à compressão no 28.º dia de cura

Amostras	Cimento (kg)	Coproduto (kg)	Água (Litros)	A/C	R28 (MPa)
A1	40	10	25	0,625	25,30
A2	30	20	28	0,933	23,80
A3	20	30	44	2,200	22,20
A4	10	40	54	5,400	17,30

Fonte: os autores

Com os dados obtidos também pode ser confirmado o efeito da relação A/C na resistência nas amostras (gráfico 1).

Gráfico 1 – Resistência à compressão x teor de cimento das amostras no 28.º dia de cura



Fonte: os autores

Se comparado às normas NBR 8491 (ABNT, 2012), para tijolos de solo-cimento, o resultado da resistência à compressão obtido é favorável, pois os dados das amostras apresentam a média dos valores superior a 2MPa (20kgf/cm²).

Fluorescências de raios X

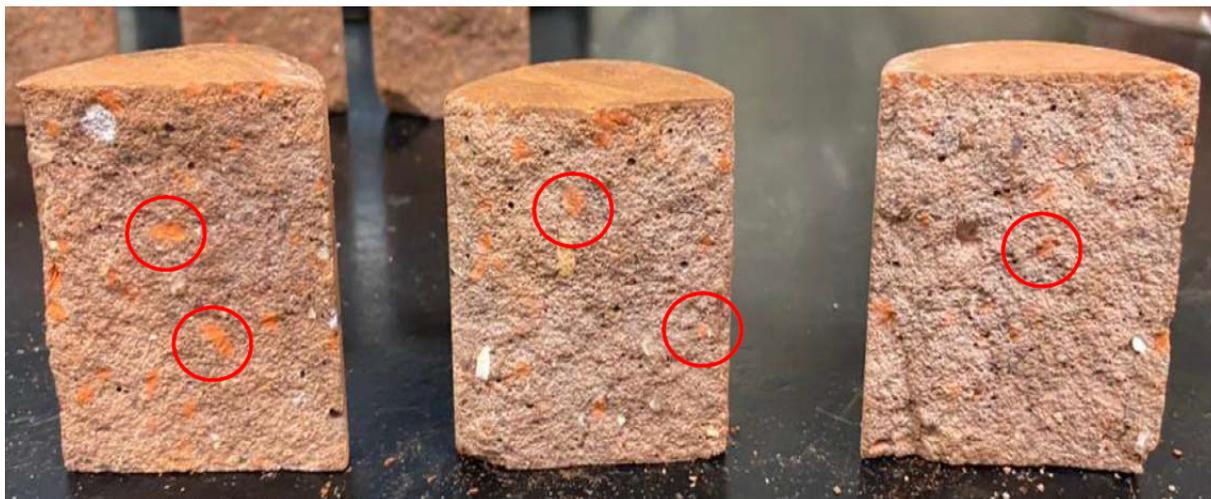
De acordo com os dados obtidos por meio da fluorescência de raios X nas amostras, observa-se um aumento progressivo no teor de alumina à medida que o coproduto é adicionado às composições. Esse comportamento era antecipado, uma vez que a composição do coproduto apresenta um teor significativo de óxido de alumínio e resíduos de ferro, conforme indicado na tabela 5.

Tabela 5 – Elementos químicos das amostras

Amostras/ Elementos	A1	A2	A3	A4
SiO ₂	28,25	28,07	28,04	27,71
Al ₂ O ₃	7,63	7,84	8,24	8,37
Fe ₂ O ₃	6,00	6,45	6,92	7,47
CaO (%)	48,14	47,67	47,00	46,22
MgO (%)	1,59	1,59	1,57	1,56
SO ₃ (%)	2,60	2,58	2,56	2,52
Na ₂ O (%)	0,67	0,78	0,90	0,98
K ₂ O (%)	0,36	0,34	0,33	0,32

Fonte: os autores

A figura 2 mostra a parte interna das amostras, em que é percebida a presença de grãos maiores do coproduto. Isso decorre da falta de homogeneização do tamanho das partículas nas amostras.

Figura 2 – Amostras analisadas após rompimento

Fonte: os autores

Lixiviação e solubilidade

O coproduto da alumina é inicialmente classificado como pertencente à classe I, por causa de sua alcalinidade, o que o torna potencialmente perigoso. No entanto as amostras analisadas – denominadas A1 a A4 – foram classificadas como classe II-A, ou seja, não inertes, que não apresentam riscos ambientais significativos. Essa classificação confirma sua adequação e excelência para diversas aplicações.

Artefatos fabricados

Com base nas análises e resultados alcançados, optou-se por utilizar as composições A2 e A3 para a fabricação de peças, e os resultados obtidos durante o processo foram satisfatórios, como ilustrado nas figuras 3 e 4. A composição A2 foi empregada na produção de *pavers* intertravados com 16 faces, assim como em peças sextavadas, em virtude do resultado positivo em relação à resistência à compressão (figura 3).

Figura 3 – *Pavers* intertravados 16 faces e sextavados, trabalhados com amostras A2

Fonte: os autores

Com a amostra A3, foram confeccionados pisos táteis do tipo bola e reto. Além disso, há a pisadeira “pezão” e o guia “bate-roda”.

Figura 4 – Produtos pisos táteis tipo bola e reto confeccionados com amostras A3



Fonte: os autores

CONCLUSÃO

O presente estudo explorou as possibilidades e os desafios relacionados ao uso do coproduto de alumina, particularmente na produção de argamassa. A falta de uma extensa literatura sobre a aplicação desse material destacou a natureza pioneira do projeto.

Diversos aspectos do coproduto foram minuciosamente analisados, desde sua composição química até suas propriedades físicas, passando pela sua viabilidade em misturas de argamassa. Ficou evidente que, apesar de possuir características alcalinas que podem categorizá-lo como um material potencialmente perigoso, sua incorporação controlada em composições de argamassa pode resultar em produtos com resistência adequada e menor impacto ambiental.

A adição gradual do coproduto em diferentes amostras revelou uma tendência de diminuição da resistência à compressão. Contudo, mesmo com essa redução, a resistência alcançada permanece dentro de padrões aceitáveis para diversas aplicações, como ilustrado pelos artefatos produzidos.

As análises químicas indicaram um aumento progressivo nos teores de óxidos de ferro, sódio e alumina nas amostras, uma vez que esses elementos estão presentes no coproduto de alumina. Além disso, a pesquisa trouxe à tona um aspecto positivo do ponto de vista ambiental. Apesar da natureza alcalina do coproduto, as amostras produzidas foram classificadas como classe II-A não inerte, o que sugere um menor impacto ambiental.

Os artefatos fabricados com base nas amostras A2 e A3, graças aos resultados favoráveis de resistência à compressão, confirmam a viabilidade prática da incorporação do coproduto em produtos de construção. Os artefatos exibiram excelente acabamento e uma coloração avermelhada, em virtude da presença de óxido de ferro nas composições.

Adicionalmente, é importante destacar o papel fundamental do Design na promoção da sustentabilidade ao longo deste projeto. A abordagem sustentável adotada, que busca inovações para reutilizar resíduos industriais e reduzir o impacto ambiental na produção de materiais de construção, deixa clara a contribuição significativa que o Design pode oferecer para soluções mais eficazes e ecológicas. Essa colaboração não apenas expande as possibilidades na indústria da construção, como também cria oportunidades para o desenvolvimento de produtos e processos que incorporam eficiência e responsabilidade ambiental como princípios fundamentais.

Em resumo, este projeto lança luz sobre as perspectivas de reutilização de resíduos industriais, propondo uma abordagem inovadora e sustentável no campo do *design* e da construção. Os resultados obtidos apontam para um caminho promissor para futuras pesquisas e aplicações práticas, com potenciais benefícios tanto para a indústria quanto para o meio ambiente.

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739** – concreto: ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. 3 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2018. 9 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215** – cimento Portland: determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2019. 12 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8491** – tijolo de solo-cimento: requisitos. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2012. 5 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10005** – procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2004a. 20 p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10006** – procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2004b. 3 p.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano nacional de resíduos sólidos**. Brasília, 2010. Disponível em: <http://bibliotecadigital.economia.gov.br/handle/123456789/1037>. Acesso em: 2 set. 2023.

COLETTI, C.; MARITAN, L.; CULTRONE, G.; MAZZOLI, C. Use of industrial ceramic sludge in brick production: effect on aesthetic quality and physical properties. **Construction And Building Materials**, v. 124, p. 219-227, out. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.096>.

JOHN, V. M.; ZORDAN, S. E. Research & development methodology for recycling residues as building materials. **Waste Management**, v. 21, n. 3, p. 213-219, 2001.

MANZINI, E. **Design para inovação social e sustentabilidade**: comunidades criativas, organizações colaborativas e novas redes projetuais. Rio de Janeiro: E-Papers, 2008. 104 p.

SANTOS, W. M. T. **Caracterização e análise de pisos intertravados utilizando a lama vermelha**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Campina Grande, São Luís, 2012.

REGISTRO DE CONTRIBUIÇÃO DE AUTORIA:

Taxonomia CRediT (<http://credit.niso.org/>)

WMTS. Conceitualização, Investigação, Metodologia, Gestão de projetos
ALAOZ. Metodologia, Insumos, Análise formal

Declaração de conflito: nada foi declarado.