XXI ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
14 a 16 de outubro de 2026 | Goiânia-Brasil
DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8713

Caracterizações de lama base para impressão 3D de resíduos de alvenaria de tijolos - Inovação sustentável em canteiro experimental

Characterization of base slurry for 3D printing from ceramic brick masonry waste - Sustainable innovation on an experimental construction site

Roger dos Santos Costa
Universidade Presbiteriana Mackenzie| São Paulo | Brasil |roger.dst94@gmail.com
Thiago Oliveira Leite
Universidade Presbiteriana Mackenzie| São Paulo| Brasil |thiagoleite.arq@gmail.com
Sasquia Hizuru Obata
FAU Mackenzie. NAPPLAC- USP e FAAP| São Paulo| Brasil | sasquia.obata@gmail.com
Renato Rodrigues
Universidade Presbiteriana Mackenzie| São Paulo| Brasil | rnt.rod@gmail.com

Resumo

O presente estudo realizou a caracterização geotécnica preliminar de Resíduos de Alvenaria Cerâmica (RAC) visando avaliar sua aptidão inicial para formulação de lamas base destinadas à manufatura aditiva para impressão 3D e sustentabilidade. O principal achado é o Índice de Plasticidade (IP) de 1,18%, valor que diverge da faixa ideal (20%-35%) para manufatura aditiva (DIW), classificando o material como não plástico e demandando otimização reológica com aditivos. A contribuição é demonstrar a viabilidade da valorização do RAC, transformando o resíduo em insumo de alto valor, alinhando a impressão 3D à Economia Circular e projetando a redução de descarte em aterros no contexto brasileiro.

Palavras-chave: Lama base. Impressão 3D. Resíduos cerâmicos. Caracterização. Sustentabilidade.

Abstract

This study presents a preliminary geotechnical characterization of Ceramic Masonry Waste (CMW) to assess its initial suitability for the formulation of base slurries intended for additive manufacturing through Direct Ink Writing (DIW) and to promote sustainable material reuse. The main finding is the Plasticity Index (PI) of 1.18%, which falls well below the optimal range (20–35%) required for DIW, classifying the material as non-plastic and indicating the need for rheological optimization through the incorporation of suitable additives. The study demonstrates the potential for valorizing CMW by converting this construction waste into a high-value raw material, thereby supporting the integration of 3D printing technologies with Circular Economy principles and contributing to the reduction of landfill disposal within the Brazilian context.

Keywords: Base Slurry. 3D Printing. Ceramic Waste. Characterization. Sustainability.

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8713

INTRODUÇÃO

A construção civil é um dos maiores consumidores de recursos naturais e principal gerador de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) no Brasil. O RCD de alvenarias cerâmicas é subutilizado e majoritariamente destinado a aterros, apesar da Resolução CONAMA n. 307/2002 permitir sua reciclagem como agregado [5]. A urgência de reutilização é confirmada pelo fato de que muitos municípios ainda utilizam lixões [11]. A valorização do RCD é um imperativo ambiental, minimizando o consumo de recursos e os impactos da produção de materiais virgens [10,9].

Nesse horizonte de valorização, o presente estudo foca em resíduos cerâmicos heterogêneos provenientes do Canteiro Experimental da FAU Mackenzie, garantindo rastreabilidade e contexto controlado [5, 14]. Paralelamente, a impressão 3D na construção civil surge como uma tecnologia inovadora que permite a produção eficiente e a redução de desperdícios [7]. Resíduos cerâmicos podem servir como matéria-prima para formulação de "lamas base" para extrusão [1]. A viabilidade técnica depende da caracterização física, química e reológica do material em estado fresco para assegurar extrusão contínua e estabilidade geométrica inicial [7].

O Objetivo Geral é caracterizar a lama base produzida a partir desses resíduos, visando sua aplicação na impressão 3D e a consequente promoção da inovação e da sustentabilidade no setor. Para alcançar tal propósito, foram definidos os seguintes Objetivos Específicos:

1. Realizar a identificação e caracterização dos tipos de resíduos de alvenaria gerados no canteiro experimental para a produção da lama base.
2. Contribuir para a redução da pressão de destinação a aterros, por meio da valorização e reutilização efetiva dos resíduos.
3. Discutir criticamente os limites físicos de consistência do resíduo cerâmico frente aos requisitos de fluxo de bicos de extrusão, identificando as necessidades de aditivação reológica.

METODOLOGIA

A metodologia adotada é **quantitativa-experimental**, focada na caracterização física do Resíduo de Alvenaria Cerâmica (RAC). A revisão bibliográfica abordou a gestão de RCD/Economia Circular e requisitos reológicos, reforçando a urgência da reutilização devido ao impacto da produção de tijolos cerâmicos [9]. O RAC heterogêneo foi triado, britado e moído para a granulometria fina necessária. A caracterização do resíduo moído, essencial pela influência em absorção e densidade [10], seguiu rigorosamente as Normas Brasileiras (ABNT).

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8713

BASES E REFERENCIAIS SOBRE LAMAS BASE PARA IMPRESSÕES 3D

O desempenho das lamas cerâmicas na Manufatura Aditiva, notadamente via *Direct Ink Writing* (DIW), é determinado pela interação entre o Índice de Plasticidade (IP) e as propriedades reológicas. Para a estabilidade estrutural (*buildability*), a lama deve apresentar comportamento de gel, onde o módulo de armazenamento (G') deve ser superior ao módulo de perda (G''). Embora o IP forneça uma indicação preliminar da moldabilidade, a reologia é crucial para o processo.

Estudos evidenciam que pastas de porcelana com um teor de sólidos de aproximadamente 75% (Quadro 1) demonstram propriedades reológicas e módulos de armazenamento ideais para a impressão de estruturas geométricas complexas via DIW [16]. Além disso, a relação água/ligante (W/L) é crucial, impactando diretamente a tensão de escoamento (*yield stress*) e a viscosidade plástica. A redução nesses parâmetros aumenta a fluidez, favorecendo a extrudabilidade, mas deve ser controlada, pois pode comprometer a *buildability* [13].

O IP ideal para lamas cerâmicas em impressão 3D, em termos de seu equivalente reológico, situa-se frequentemente na faixa de 20% a 30%, garantindo o equilíbrio necessário entre a extrudabilidade e a rigidez imediata para o empilhamento (Quadro 1).

Quadro 1: Parâmetros reológicos e seus equivalentes no Índice de Plasticidade para DIW

Material base	**IP ou parâmetro equivalente**	**Faixa típica**	**Unidade**	**Observação**
Argila natural (*clay printing*)	IP (Atterberg)	15 – 35	%	Plasticidade média a alta
Pasta de porcelana (DIW)	Sólidos	~ 70 – 75	%	Alta coesão
Argila + água (W/B)	Relação água/ligante	0,25 – 0,45	—	Controla fluidez
Lama cerâmica (SLA/DIW)	Viscosidade	10^2 – 10^4	Pa·s	Extrusão controlada
Lama cerâmica	*Yield stress*	100 – 1000	Pa	Estabilidade estrutural
Lama cerâmica estável	G' > G''	—	—	Comportamento gel

Quadro 2: Interpretação do Índice de Plasticidade (IP) para Impressão 3D

Faixa de IP	Comportamento	Aplicação
< 10%	Baixa plasticidade	Não imprimível
10 – 20%	Média	Limite inferior
20 – 35%	Ideal	Impressão estável
> 35%	Muito plástico	Pode colapsar

DESENVOLVIMENTOS EXPERIMENTAIS

1 CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA

Para as análises, coletou-se uma amostra de tijolos reutilizados de um canteiro experimental. O material foi triturado para reduzir sua granulometria, seguido de uma triagem para selecionar as partículas adequadas ao estudo proposto.

Figura 1: Amostra de tijolos com resíduos de argamassa

Fonte: Autor, 2026

2 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

A análise granulométrica neste estudo foi efetuada através do processo de peneiramento a seco de acordo com a especificação NBR 7181 (1988) [4]. Foi tomada



uma amostra de 1,18kg dos resíduos triturados. Posteriormente o material foi seco em estufa a 105ºC/110ºC, até a constância da massa. O material assim obtido é usado no peneiramento. A análise granulométrica revelou que o produto da moagem primária do RAC é composto predominantemente por fração graúda (70,17% retido acima de 4,75 mm), apresentando apenas 2,20% de finos passantes na malha de 0,074 mm. Embora o material total apresente comportamento de agregado graúdo, os ensaios de

consistência subsequentes foram conduzidos estritamente na fração passante da peneira nº 40 (0,59 mm).

Quadro 3 – Análise Granulométrica

Peneiras Pol/Nº	Abertura (mm)	Retido (g)	Passando (g)	Porcentagem que passa (%)
2"	50	0	1180	100,00
1 1/2"	38,1	0	1180	100,00
1"	25,4	86	1094	92,71
3/4"	19	250	844	71,53
1/2"	12,7	288	556	47,12
3/8"	9,52	100	456	38,64
Nº4	4,75	104	352	29,83
Nº4	2	42	310	26,27
20	1,18	90	220	18,64
40	0,59	74	146	12,37
60	0,425	52	94	7,97
100	0,149	40	54	4,58
200	0,074	28	26	2,20
Fundo	-	26	0	0

Fonte: Desenvolvido pelo autor, 2026.

Figura 2: Conjunto de peneiras metálicas para determinação granulométrica do RAC



Fonte: Autor, 2026

3 LIMITE DE LIQUIDEZ (LL)

O limite de liquidez (LL) é o teor de umidade de um solo, regido pela NBR 6459/2017 [2], acima do qual ele se comporta como um fluido viscoso. Para o ensaio, uma amostra de solo de 200g foi preparada (seca em estufa a 105º-110ºC por 24h e passada na peneira nº 40 - 0,59mm) e misturada à água para obter uma massa plástica homogênea. Uma porção da massa foi transferida para a concha do aparelho Casagrande, onde o sulco foi feito. A concha foi acionada (2 golpes/s) até que a ranhura se fechasse em 1,2 cm. O material no ponto de fechamento foi coletado para determinação da umidade. O ensaio foi repetido por mais 4 vezes, totalizando 5 pontos na faixa de 10 a 30 golpes, para a construção do gráfico de limite de liquidez. O resultado do teor de umidade dos pontos encontrados está expresso no Quadro a seguir.

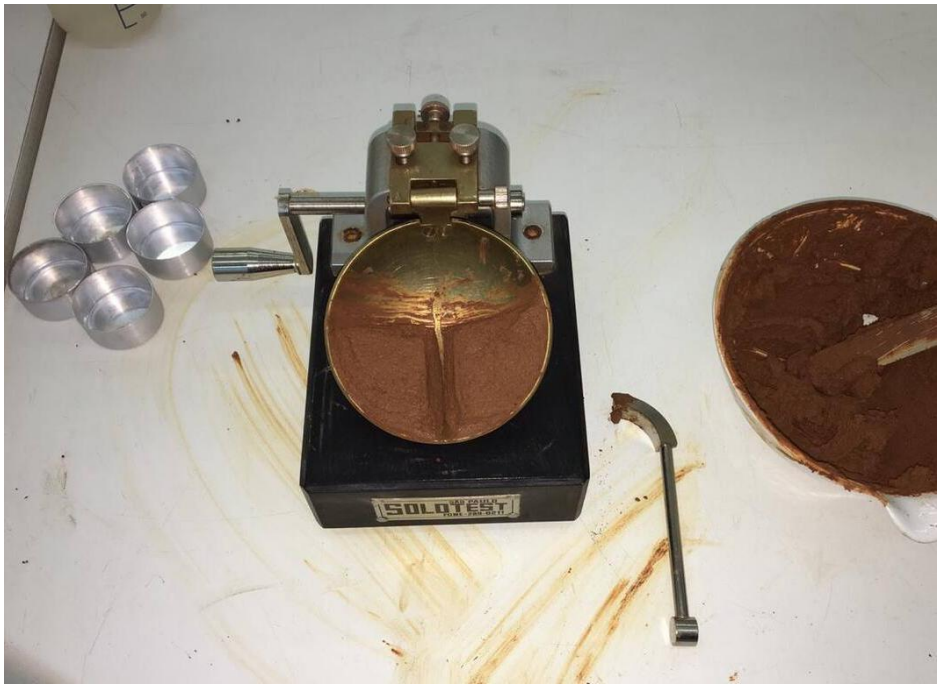
Quadro 4 – Limite de Liquidez

Cápsula Nº	Peso da cápsula (g)	Peso da amostra úmida+cápsula (g)	Peso da amostra seca+cápsula (g)	Peso da amostra seca (g)	Peso da água (g)	Teor de umidade (%)	Número de golpes Nº
01	6,102	20,196	16,991	10,889	3,205	29,433	27
02	6,134	20,526	16,941	10,807	3,585	33,173	24
03	6,470	21,915	17,875	11,405	4,040	35,423	19
04	6,288	20,230	16,506	10,218	3,724	36,445	14
05	6,334	21,520	17,314	10,980	4,206	38,306	10

Fonte: Desenvolvido pelo autor, 2026.

De acordo com os dados encontrados através do ensaio de limite de liquidez no Quadro de limite de liquidez foi possível traçar retas perpendiculares no gráfico em função dos pontos encontrados em indicando o número de golpes e o teor de umidade correspondente aos 25 golpes.

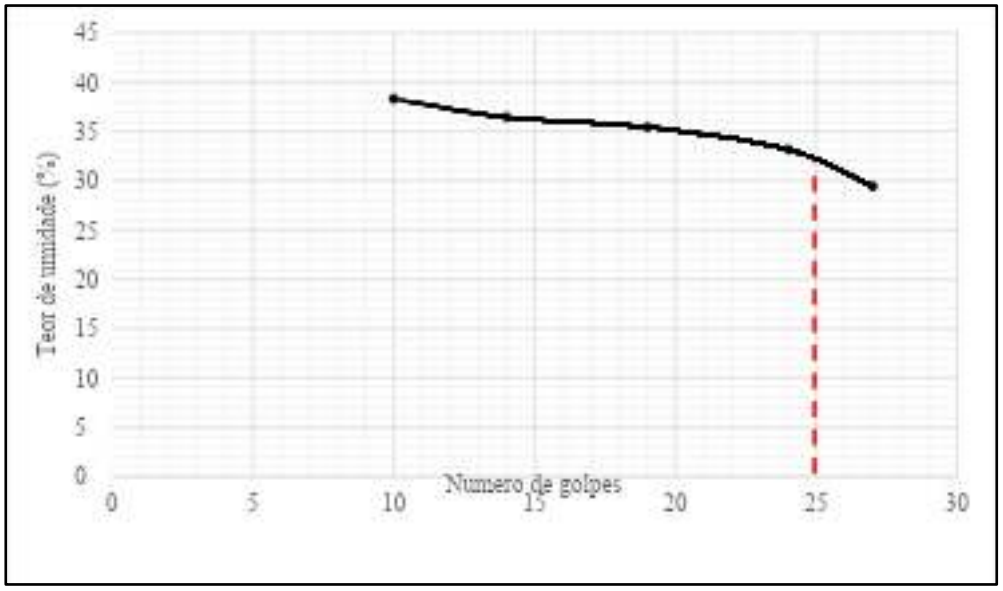
Figura 3: Ensaio de Limite de Liquidez



Fonte: Autor, 2026

4 LIMITE E ÍNDICE DE PLASTICIDADE (LP E IP)

Figura 4: Gráfico de teor de umidade por golpes



Fonte: Autor, 2026

O Limite de Plasticidade (LP), definido pela NBR 7180/16 [3], indica o teor de umidade em que o solo torna-se plástico. Para o ensaio, 50g de material foram homogeneizados com água até a plasticidade ideal. Fragmentos dessa massa foram moldados em cilindros de 3 mm de diâmetro por 100 mm de comprimento sobre placa de vidro. As amostras foram pesadas e levadas à estufa para determinação da umidade. O procedimento foi repetido três vezes, garantindo que os valores não divergissem mais de 5% da média.

Quadro 5 – Limite de Plasticidade

Cápsula Nº	Peso da cápsula (g)	Peso da amostra úmida+cápsula (g)	Peso da amostra seca+cápsula (g)	Peso da amostra seca (g)	Peso da água (g)	Teor de umidade (%)	Limite de plasticidade (% média)
06	5,974	9,078	8,337	2,363	0,741	31,358	31,615
07	6,315	10,388	9,411	3,096	0,977	31,557	31,615
08	6,692	9,985	9,188	2,496	0,797	31,931	31,615

Fonte: o autor, 2026.

A partir dos valores de limite de liquidez e limite de plasticidade, determinou-se o Índice de Plasticidade (IP), expresso em porcentagem, que representa a faixa de umidade em que o material mantém consistência plástica. O quadro a seguir apresenta o valor de IP obtido nos ensaios realizados neste estudo.

Índice de plasticidade é dado pela seguinte expressão:

$$IP = LL - LP \ (1)$$

Onde:
IP: índice de plasticidade
LL: limite de liquidez
LP: limite de plasticidade

Limite de liquidez	32,8%
Limite de plasticidade	31,62%
IP = LL - LP	**1,18%**

Fonte: o autor, 2026.

O Índice de Plasticidade (IP) é calculado pela fórmula IP = LL – LP, representando a faixa de umidade em que o solo mantém consistência plástica. Os ensaios resultaram em um IP de 1,18%.

Solos finos são classificados em oito categorias via gráfico de plasticidade, abrangendo argilas e siltes de variadas plasticidades e compressibilidades.
Baseado no gráfico da Figura 5: Gráfico de Plasticidade, a amostra classifica-se como silte inorgânico de média compressibilidade e silte orgânico.

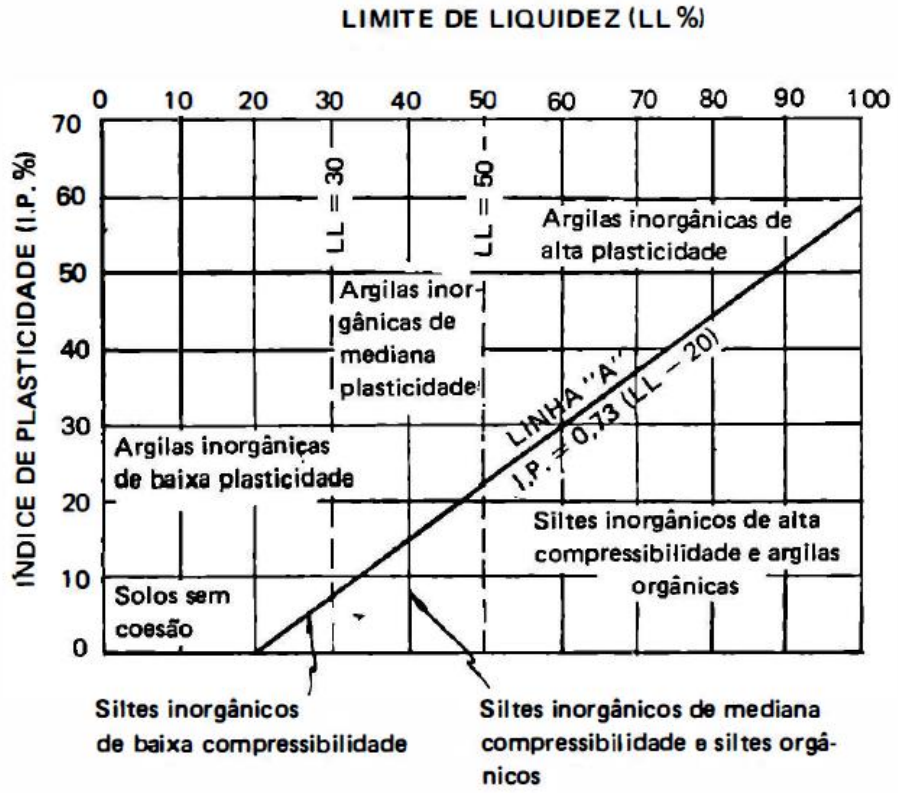
DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8713

RESULTADOS

A eficácia do Resíduo de Alvenaria Cerâmica (RAC) como lama para impressão 3D depende de sua adequação aos critérios reológicos de extrusão e estabilidade estrutural (*buildability*).

1. Plasticidade e Implicação Reológica

Figura 5: Gráfico de Plasticidade



Fonte: Caputo, 1988; Suporte Solos, 2025

Portanto, tomando como base este gráfico podemos determinar que este solo é relativamente um silte inorgânico de mediana compressibilidade e silte orgânico.

COMPARATIVOS ENTRE AMOSTRA E BASES REFERENCIAIS

Análise Comparativa e Implicações para a Impressão 3D

A adequação do Resíduo de Alvenaria Cerâmica (RAC) para impressão 3D depende da extrusão e *buildability* [8]. Os ensaios de limites de Atterberg revelaram um Índice de Plasticidade (IP) de 1,18%, muito abaixo da faixa ideal (20% a 35%) para o *Direct Ink Writing* (DIW) (Quadro 2). O baixo IP classifica o RAC como de baixa plasticidade [6,15], implicando em insuficiente *yield stress* para a estabilidade imediata das camadas. A otimização exige aditivos e ligantes para elevar a *yield stress* e viscosidade ao intervalo ideal (10^2 a 10^4 Pa·s) [13]. Apesar do desafio, a valorização do RAC alinha-se à Economia Circular, transformando o resíduo em insumo de alto valor [10,1]. A escalabilidade no Brasil depende da validação do desempenho mecânico [10].

DISCUSSÃO DE RESULTADOS COM BASE NO ESTUDO DE REFERÊNCIA

Os ensaios de Atterberg no resíduo cerâmico (LL 32,8%; LP 31,6%) resultaram em um IP de 1,2%. Esse valor o classifica como solo siltoso de baixíssima plasticidade [6,15], limitando sua aptidão como matriz coesiva autossuficiente. O baixo IP de 1,2% revela um descompasso com as faixas ideais de plasticidade para Direct Ink Writing (DIW), necessárias para imprimir geometrias estáveis [9,12]. O Índice de Plasticidade crítico obtido de 1,2% classifica a fração fina do RAC como de plasticidade desprezível, assemelhando-se a um silte inorgânico inerte de baixíssima coesão. Essa característica técnica evidencia que o resíduo cerâmico bruto não possui coesão intrínseca suficiente para manter a forma após a extrusão. Para superar a ausência de comportamento gel (G' > G'') e garantir uma tensão de escoamento estática de empilhamento estável, a formulação da lama base requer obrigatoriamente a incorporação de aditivos químicos e ligantes ativos. Metodologicamente, o material atua como fino de baixa coesão, devendo ser tratado como fração granular [12]. A coesão para a manufatura aditiva deve ser obtida via ligantes e controle reológico (tensão de escoamento e módulos viscoelásticos), superando a baixa plasticidade intrínseca e dependendo do desenho global da mistura [9,12,7].

CONCLUSÕES

O estudo conclui pelo atendimento dos Objetivos Específicos propostos. (1) Caracterização: A metodologia quantitativa-experimental, com ensaios de granulometria e limites de Atterberg, cumpriu o propósito de classificar o material e diagnosticar a necessidade de intervenção. O achado central é que a caracterização revelou um Índice de Plasticidade (IP) extremamente baixo (1,18%), contrastando com a faixa ideal (20% a 35%) para a manufatura aditiva (*DIW*), exigindo intensa otimização reológica. (2) Contribuição: Demonstrou-se a viabilidade de valorizar o Resíduo de Alvenaria Cerâmica (RAC) na produção da lama base, alinhando o projeto à Economia Circular e mitigando o descarte em aterros. (3) Escalabilidade: A validação do conceito projeta a escalabilidade da solução para a construção civil brasileira, necessitando de

validação mecânica posterior. A principal limitação reside, portanto, na baixa plasticidade do material, que exige formulação dependente de aditivos e ligantes para atingir a *yield stress* e *buildability* exigidas (100 a 1000 Pa).
Sugestões para trabalhos futuros incluem finalizar as análises de Composição Química (FRX e DRX) para otimizar a resistência, validar os ensaios de Reologia e Trabalhabilidade da lama base e avançar para a fase de ensaios de desempenho mecânico de corpos de prova impressos e impressão em escala real, consolidando a pesquisa para a inovação e sustentabilidade.

DECLARAÇÃO

Durante a preparação deste artigo, a terceira autora utilizou as ferramentas Google Gemini e Microsoft Copilot para revisão linguística e aprimoramento textual. O primeiro e o segundo autores utilizaram o Perplexity, powered by GPT-5.4, para a revisão e melhoria de coesão formal de trechos do texto. Após a utilização das ferramentas/serviços, os autores revisaram e editaram o conteúdo conforme necessário e assumem total responsabilidade pelo conteúdo do artigo publicado.

REFERÊNCIAS

[1] ANGJUSHEVA, B.; DUCMAN, V.; FIDANCHEVSKI, E. The effect of the addition of construction & demolition waste on the properties of clay-based ceramics. **Science of Sintering**, Vol. 54 No. 3 (2022). Published. Belgrade, Serbia, 2022-08-28. Disponível em: https://ojs.itn.sanu.ac.rs/index.php/scisint/article/view/598 Acesso em: 27 abr. 2026.

[2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Determinação do Limite de Liquidez. 5p. Rio de Janeiro, 2017

[3] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. 3p. Rio de Janeiro, 2016.

[4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo – Analise Granulométrica. 7p. Rio de Janeiro, 1988.

[5] BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução n. 307, de 5 de julho de 2002**. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Brasília, DF: CONAMA, 2002. Disponível em: <https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=305>. Acesso em: 29 abr. 2026.

[6] CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos solos e suas aplicações: fundamentos**. 6. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1988. Disponível em: <https://engenhariacivilfsp.files.wordpress.com/2015/05/mecanica-solos-fundamentos-vol1-6ed-caputo.pdf>. Acesso em: 4 maio 2026.

[7] CARVALHO, A.; CHAVES, A. R.; BERTINI, A. A. **Impressão 3D e industrialização na construção: uma revisão sistemática de literatura**. TECSIC, v. 4, 2023. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/tecsic/article/view/2395>. Acesso em: 4 maio 2026.

[8] CHANG, H. et al. Preparation of High-Stability Ceramic Slurry with Gel Behavior for Stereolithography 3D Printing. **Materials**, v. 16, n. 7, p. 2816, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/ma16072816

[9] DIAS, J. O. et al. Life cycle assessment applied to red ceramic bricks production versus red ceramic bricks incorporated with stone wastes: a comparative study. In: **CHARACTERIZATION OF MINERALS, METALS AND MATERIALS**, 2021. Proceedings [...]. Cham: Springer, 2021. p. 277–286. Disponível em: <https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-65493-1_27>. Acesso em: 4 maio 2026.

[10] EVANGELISTA, Ana Catarina Jorge; TAM, Vivian W. Y.; SANTOS, Jorge. Recycled ceramic fine aggregate for masonry mortar production. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials**, [s. l.], v. 172, n. 5, p. 225-234, out. 2018. DOI: https://doi.org/10.1680/jcoma.16.00063. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1747650X18000197. Acesso em: 2 abr. 2026.

[11] INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **MUNIC 2023: 31,9% dos municípios brasileiros ainda despejam resíduos sólidos em lixões**. Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/41994-munic-2023-31-9-dos-municipios-brasileiros-ainda-despejam-residuos-solidos-em-lixoes>. Acesso em: 29 abr. 2026.

[12] M'BARKI, Amin; BOCQUET, Lydéric; STEVENSON, Adam. Linking rheology and printability for dense and strong ceramics by direct ink writing. **Scientific Reports**, v. 7, n. 6017, p. 1–10, 2017. DOI: 10.1038/s41598-017-06115-0. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28729671/>. Acesso em: 4 maio 2026.

[13] RIHANI, N. et al. 3D Clay Printing: A Taguchi Approach To Rheological Properties And Printability Assessment. **E3S Web of Conferences**, v. 601, p. 00023, 2025. DOI: https://doi.org/10.1051/e3sconf/202560100023

[14] RONCONI, Reginaldo Luiz Nunes. **Inserção do canteiro experimental nas faculdades de arquitetura e urbanismo**. 2002. Tese (Doutorado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16131/tde-31012023-125838/publico/Ronconi_Reginaldo_Luiz_Nunes_2002_DO.pdf>. Acesso em: 29 abr. 2026.

[15] SUPORTE SOLOS. **Limites de Atterberg e classificação dos solos: interpretação prática para obras de infraestrutura**. São Paulo, 2025. Disponível em: <https://suportesolos.com.br/blog/conteudo-tecnico-limites-de-atterberg-e-classificacao-dos-solos-interpretacao-pratica-para-obras-de-infraestrutura/413/>. Acesso em: 4 maio 2026.

[16] WU, Y. et al. Rheology and Printability of a Porcelain Clay Paste for DIW 3D Printing of Ceramics with Complex Geometric Structures. **ACS Omega**, v. 9, n. 24, p. 26450–26457, 2024. DOI: https://doi.org/10.1021/acsomega.4c02543

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8713