

REVISTA DE ARQUEOLOGIA

Volume 38 No. 2 Maio - Agosto 2025

ARTIGO

RESGATE ARQUEOLÓGICO NO SÍTIO CAIEIRAS TRÊS IRMÃOS: RESULTADO DAS TÉCNICAS DE REGISTRO TRADICIONAIS E MODELAGEM DAS ESTRUTURAS POR MEIO DA APLICAÇÃO DO SENSOR LIDAR

Valdinêy Amaral Leite*, Déborah Duarte-Talim**, Lidiane Aparecida da Silva***, Lucas Antônio Brasil Gonçalves Lacerda****, Tayami Fonseca França*****, Thiago Hycaro Santos Neves*****

RESUMO

Este artigo apresenta os resultados de mapeamento e modelagem realizados durante as atividades de resgate arqueológico desenvolvidas no sítio arqueológico Caieiras Três Irmãos, no âmbito dos Programas de Salvamento e Resgate Arqueológico na área do “Complexo Minerário de Ijaci”, no município de Ijaci (MG). As atividades consistiram em escavação arqueológica para averiguação do pacote estratigráfico, descrição arquitetônica das estruturas, escaneamentos

* Arqueólogo e Analista Ambiental da Brandt Meio Ambiente- Bacharel em Humanidades e Licenciado em Geografia pela Universidade Federal Dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM). Mestre em Antropologia/Arqueologia com ênfase em Arqueologia pelo Programa de Pós-Graduação de Antropologia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Doutorando em Geografia pelo Instituto de Geociências da UFMG. E-mail: valdiney.leite@brandt.com.br; valdineyal@msn.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-9531-0374>

** Arqueóloga e Analista Ambiental da Brandt Meio Ambiente. Doutora em Antropologia/Arqueologia, com ênfase em Arqueologia pelo Programa de Pós-Graduação de Antropologia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) E-mail: deborah.talim@brandt.com.br; delsduarte@hotmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5470-3364>

*** Arqueóloga e Analista Ambiental da Brandt Meio Ambiente-Bacharela em Humanidades e Licenciada em Geografia pela Universidade Federal Dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM). Mestre em Antropologia com ênfase em Arqueologia pelo Programa de Pós-Graduação de Antropologia da Universidade Federal de Pelotas (UFPel). E-mail: lidiane.silva@brandt.com.br; lidiane.las@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0797-1649>

**** Geógrafo e Analista Ambiental da Brandt Meio Ambiente. Bacharel em Geografia, Especialista em Geoprocessamento pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC-Minas) e Mestre em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). E-mail: llacerda@brandt.com.br; lucas.abgl@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9422-1901>

***** Arquiteta e Urbanista. Técnica em Conservação e Restauração de Bens Culturais (FAOP). Mestre em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável, com ênfase em Patrimônio e Memória pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). E-mail: arq.tayamifonseca@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9389-2201>

***** Analista generalista interdisciplinar e Analista Ambiental da Brandt Meio Ambiente. Bacharel em Humanidades pela Universidade Federal Dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM). E-mail: thiago.neves@brandt.com.br; nevsthiago21@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4975-8985>

DOI: <https://doi.org/10.24885/sab.v38i2.1203>

por meio de sensor LiDAR e fotogrametria das estruturas, o que possibilitou obter três resultados diferentes sobre o mesmo sítio. As informações obtidas permitiram tecer análises comparativas de técnicas e entender os processos formativos do sítio e a organização das atividades relacionadas aos fornos de cal, auxiliando, com isso, na construção do conhecimento arqueológico histórico local e regional.

Palavras-chave: Técnicas de registro; Sensor LiDAR; Resgate arqueológico.

ARTICLE

THE ARCHAEOLOGICAL RESCUE OF THE CAIEIRAS TRÊS IRMÃOS SITE: RESULT OF TRADITIONAL REGISTRATION TECHNIQUES AND MODELING OF STRUCTURES BY APPLYING THE LIDAR SENSOR

ABSTRACT

This study describes mapping and modeling results during the archaeological rescue activities at the Caieiras Três Irmãos Archaeological Site within the Archaeological Salvage and Rescue Programs in the “Ijaci Mining Complex” in the municipality of Ijaci (MG), Brazil. Activities consisted of archaeological excavation to investigate the stratigraphic package, architectural description of the structures and scans using LiDAR, and the photogrammetry of its structures, resulting in three results on the same site. The information enabled comparative analyses of techniques and the understanding of the formative processes of the site and the organization of activities related to the lime kilns, corroborating the construction of local and regional historical archaeological knowledge.

Keywords: Registration techniques; LiDAR sensor; Archaeological rescue.

ARTÍCULO

RESCATE ARQUEOLÓGICO DEL SITIO CAIEIRAS TRÊS IRMÃOS: RESULTADO DE TÉCNICAS TRADICIONALES DE REGISTRO Y MODELADO DE ESTRUCTURAS MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL SENSOR LIDAR

RESUMEN

Este artículo presenta los resultados del mapeo y modelado realizados durante las actividades de rescate arqueológico realizadas en el sitio arqueológico Caieiras Três Irmãos en el ámbito de los Programas de Salvamento y Rescate Arqueológico en el área del “Complejo Minero Ijaci”, en el municipio de Ijaci, Minas Gerais, Brasil. Las actividades consistieron en excavación arqueológica para investigar el paquete estratigráfico, descripción arquitectónica de las estructuras y escaneos mediante LIDAR y fotogrametría de las estructuras, lo que permitió obtener tres resultados diferentes en un mismo sitio. La información obtenida permitió realizar análisis comparativos de técnicas y comprender los procesos formativos del sitio y la organización de actividades relacionadas con los hornos de cal y, con ello, corroborar con la construcción de conocimiento arqueológico histórico local y regional.

Palabras clave: Técnicas de registro; Sensor LiDAR; Rescate arqueológico.

INTRODUÇÃO

As pesquisas apresentadas neste estudo fazem parte das atividades desenvolvidas no contexto da arqueologia preventiva na área do Complexo Minerário de Ijaci, de responsabilidade da InterCement Brasil S/A¹.

O sítio analisado neste artigo decorre de um período fabril característico no Brasil no século XIX, quando se descobrem áreas de extração do calcário (Silva, 2009). As características construtivas desses bens remetem à herança de Portugal e à inovação tecnológica trazidas a este território. Tal como aponta Kühl (2006), muito da arquitetura industrial em sua fase inicial é testemunho da transposição de estilos, materiais e técnicas que marcaram um período. O sítio arqueológico Caieiras Três Irmãos constitui-se, assim, em vestígio da história industrial brasileira, podendo ser considerado um patrimônio cultural brasileiro.

Este artigo tem como objetivo primordial discutir e divulgar diferentes técnicas de registro e mapeamento de estruturas arqueológicas e suas implicações, tendo como estudo de caso o sítio arqueológico Caieiras Três Irmãos, especificamente o Forno de Cal 1 – estrutura inteira. Além disso, busca-se demonstrar que a aplicação dessas técnicas (desenhos arquitetônicos, escaneamento por sensor de *Light Detection and Ranging* (LiDAR) com nuvem de pontos coloridas e não coloridas, e fotogrametria) contribui com resultados inovadores para a documentação, (re)construção e interpretação das estruturas arqueológicas.

Por meio das atividades de campo, foram localizadas duas estruturas de fornos de cal, denominadas de Forno de Cal 1 e Forno de Cal 2, e uma área de extração de matéria-prima localizada entre esses fornos (Figura 1). Ambas as estruturas estão situadas às margens da estrada municipal não pavimentada e juntas configuram o cenário do sítio arqueológico histórico Caieira Três Irmãos², no município de Ijaci (MG) (Brandt, 2021, 2022).

Após a identificação inicial, os estudos foram aprofundados por meio da implementação do Programa de Salvamento e Resgate do Sítio Arqueológico Caieira Três Irmãos. Para tanto, foram empregadas abordagens provenientes da arqueologia (resgate arqueológico), da arquitetura (descrições e plantas) e da aplicação de técnicas de sensoriamento remoto, incluindo escaneamentos com sensor LiDAR e fotogrametria das estruturas. Esses procedimentos são detalhados posteriormente na subseção de materiais e métodos.

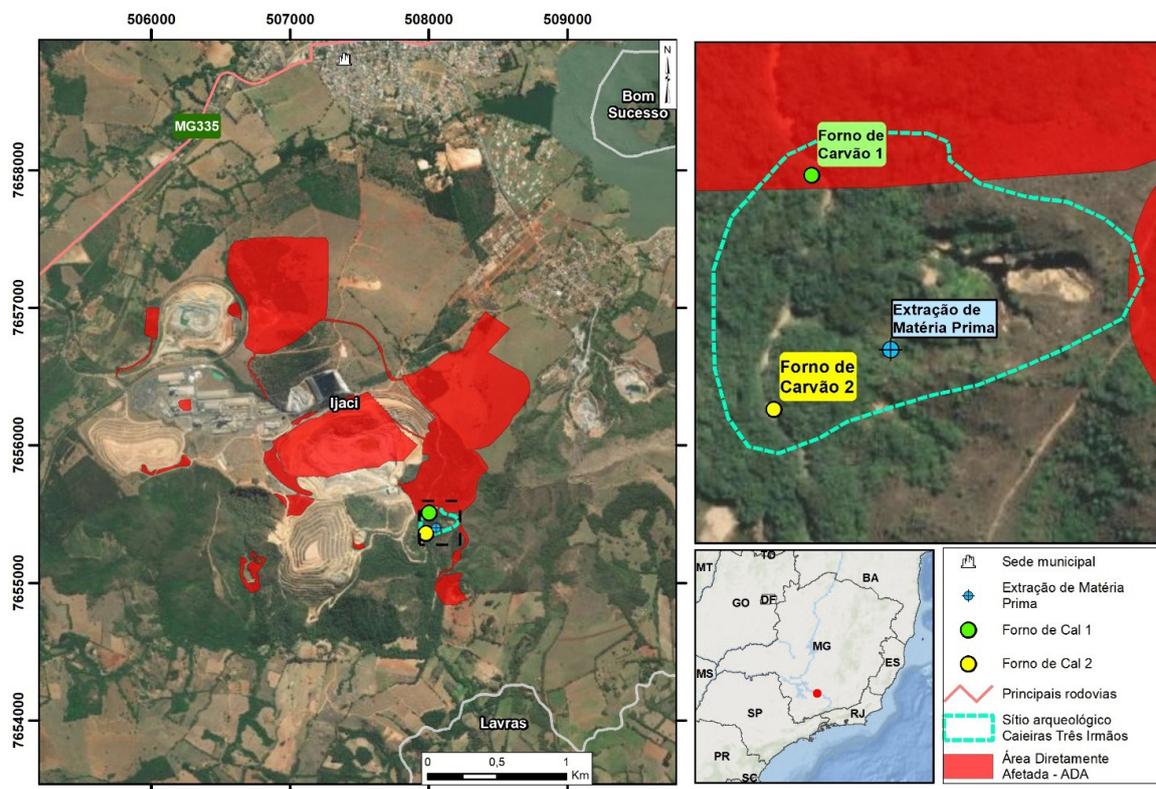
Na Figura 2, destaca-se na imagem inferior a localização dos Fornos 1 e 2, bem como a área de extração de matéria-prima que os abastece. Observa-se também, em média/alta vertente, a presença de uma voçoroca a montante da área de exploração de matéria-prima ativa, resultante de processos erosivos recentes. Ao fundo são visíveis cortes, taludes e a estrutura do empreendimento previamente mencionado.

¹ A área do empreendimento foi alvo de estudos arqueológicos sob a rubrica de Diagnóstico Interventivo Arqueológico Complementar, a partir das orientações do Termo de Referência Específico (IPHAN-MG, 2012), da Portaria nº 230/2002 e da Portaria Sphan nº 07/1988. Processo Iphan nº 01514.007690/2014-12.

² Referência à toponímia local.

Ainda observando a ilustração, destacam-se os detalhes dos fornos nas duas fotos superiores, com visadas de leste a oeste, cercados por uma vegetação de porte médio, típica do bioma da Mata Atlântica em transição para o Cerrado/campo sujo. Na primeira foto, que mostra a estrutura do Forno de Cal 2, observa-se parte da estrutura colapsada, com os blocos do material construtivo carreados. Na segunda foto, em primeiro plano, destaca-se o cinzel; na porção central, o patamar; e, ao fundo, entre as árvores e com formato piramidal, o Forno de Cal 1. Ambas as estruturas estão localizadas às margens de uma estrada vicinal, em baixa vertente, próximas ao curso hídrico local (córrego afluente do Rio Grande). Essas estruturas estão distantes aproximadamente cem metros uma da outra. Entre elas, na porção mais a leste, localiza-se a pedra destinada à extração de calcário, onde são visíveis blocos com marcas de extração manual, realizadas com o uso de marretas, ponteiros e talhadeiras, conforme relatado por um morador local.

Figura 1. Mapa da localização do empreendimento e dos sítios.



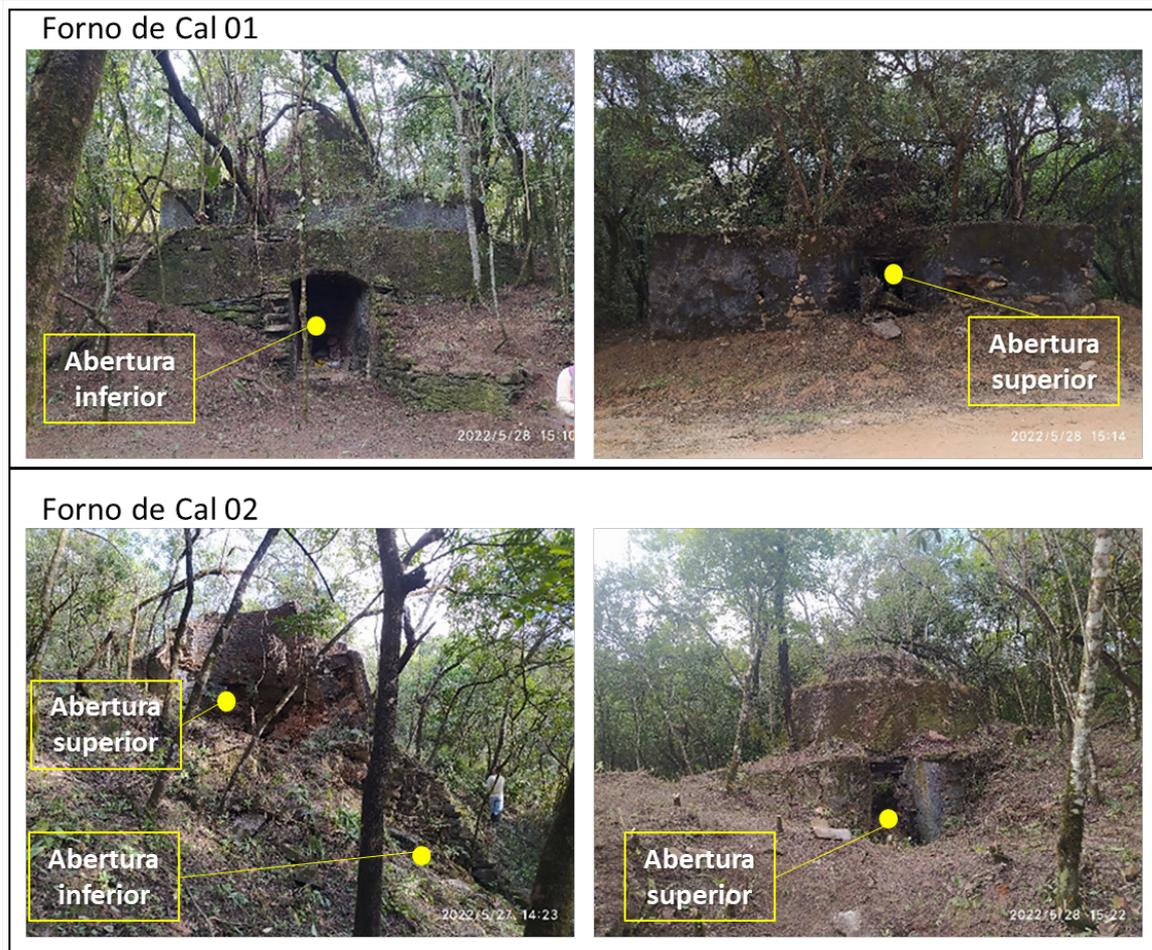
Fonte: Brandt (2022).

A base dos fornos foi edificada com pedras encaixadas. Em determinados pontos, a estrutura apresenta-se mista, composta por pedras e tijolos. As chaminés foram construídas em alvenaria de tijolos maciços, assentados com argamassa e revestidos externamente. O Forno 1 tem dimensões de oito metros de comprimento, dez metros de largura e 9,3 metros de altura, enquanto o Forno 2 é ligeiramente menor, medindo aproximadamente seis metros de comprimento, oito metros de largura e nove metros de altura (Figura 3).

Figura 2. Inserção dos sítios na paisagem.



Fonte: Brandt (2023).

Figura 3. Vista geral dos fornos.

Fonte: Brandt (2023).

Entre os fornos foram encontrados fragmentos de telha com características artesanais (côncavas, irregulares, sem marcas de fábricas) e fragmentos de tijolos maciços, muito provavelmente provenientes dos setores desmoronados dos fornos, em superfície. As características das técnicas construtivas dos fornos e os materiais utilizados apontam para uma data de construção e utilização no século XIX, período em que os tijolos maciços se popularizam no Brasil, com a chegada das ferrovias (Silva, 2009). Ainda, foram encontrados e observados tijolos de fabricação mais antiga, de dimensões maiores. Há também telhas cerâmicas curvas, mais características do período anterior ao século XX: maiores dimensões, deformidades aparentes, sem marcações de fábrica e sem diferenciação de capa e bica.

Parte significativa dessas estruturas encontrava-se coberta por uma vegetação diversificada e, assim, para execução das atividades, realizou-se a limpeza das estruturas, removendo-se as gramíneas e os arbustos que encobriam parcialmente as estruturas. A vegetação de maior porte/estrutura foi mantida, de modo a evitar qualquer alteração do ambiente ou interferências nos fornos. Após a limpeza, pôde-se avaliar feições, dimensões e estado de conservação, bem como identificar os principais agentes degradantes, como as raízes das árvores de grande porte, a forte inclinação do relevo e, ainda, por estar do lado da estrada principal, a grande deposição de lixo e entulho de construções modernas das décadas de 1970 e 1980. Notaram-se também desmoronamentos nas estruturas (Forno 2),

rachaduras profundas e blocos deslocados, possivelmente associados às trepidações devido à circulação de veículos ou detonações que ocorrem próximo ao sítio. Além disso, há deposição de fungos, líquens e casulos de insetos, teias de aranha e formigueiros, o que leva à desestabilização das estruturas.

PRODUÇÃO DA CAL NO BRASIL: BREVE CONTEXTO

A produção de cal representa um marco significativo nas conquistas industriais da humanidade, sendo reconhecida como uma das primeiras indústrias elaboradas pelo homem, com registros nas civilizações egípcia, grega e romana, por exemplo (Coelho; Torgal; Jalai, 2009). Esse processo envolve a transformação de uma rocha natural por meio de técnicas específicas, resultando na obtenção de um material artificial que não existe naturalmente. Esse feito notável implica na modelação de uma rocha natural para criar uma substância que atenda de maneira mais direta e eficaz às necessidades humanas (Muñoz Jiménez; Schnell Quiertant, 2006).

O início da produção de cal remonta às civilizações antigas, marcando um estágio crucial no desenvolvimento industrial. Foi com os romanos, no entanto, que esse processo atingiu um refinamento notável. A expertise adquirida por meio de práticas e conhecimentos transmitidos ao longo das eras permitiu aperfeiçoar as técnicas de produção de cal, contribuindo não apenas para a satisfação das necessidades humanas, mas também para a evolução do conhecimento técnico e científico na história da humanidade. Assim, a produção de cal não apenas representa uma das primeiras incursões industriais, mas também evidencia a capacidade adaptativa e inovadora do ser humano ao longo do tempo.

Para compreender a presença dos fornos na localidade estudada e sua própria estrutura, é importante sintetizar o processo artesanal de produção da cal. A mineração do calcário consiste inicialmente no desmonte da jazida de calcário, as conhecidas pedreiras. A extração era realizada de forma manual com a utilização de ferramentas como formões. Porém, com a evolução tecnológica, a extração passou a ser realizada com a implantação de explosivos, ou com maquinário pesado, como rompedor e retroescavadeira, de forma mais rudimentar (John; Punhagui; Cincotto, 2014). Após a extração, nos processos recentes, as rochas de calcário passam por um processo de britagem, antes do processo de calcinação, reduzindo as dimensões dos blocos. O processo de calcinação remove o gás carbônico (CO₂) do calcário para produzir óxido de cálcio ou cal virgem³ (CaO) (Coelho; Torgal; Jalai, 2009).

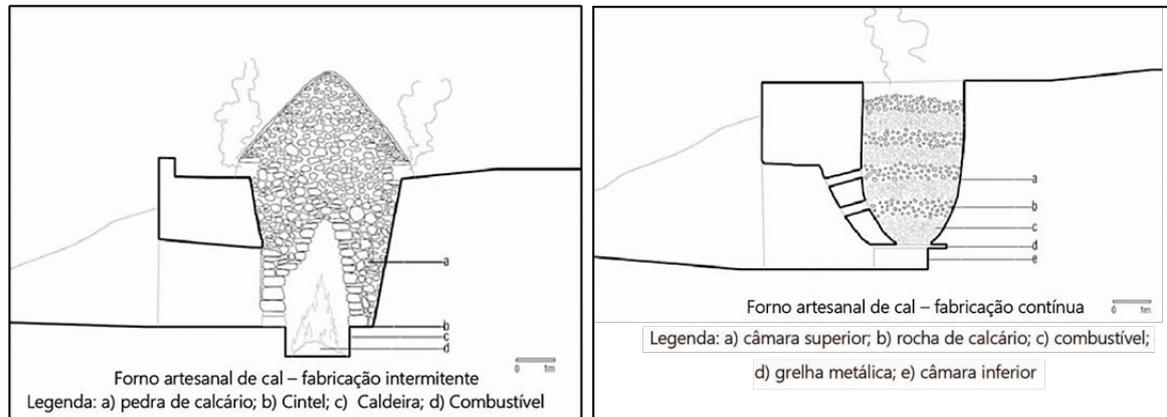
Nos processos de calcinação mais antigos, os fornos são escavados nos barrancos e revestidos de tijolos ou pedras, sendo o calor obtido a partir da queima de carvão ou madeira. Por meio dessa técnica, segundo Custódio (2015), duas tipologias de estruturas de fornos artesanais se destacam (Figura 4):

- **Forno de queima intermitente:** de câmara única, planta circular, com estrangulamento ao nível da soleira da porta do forno. Na parte inferior desse nível abre-se a caldeira onde acontece a combustão da lenha e onde se acumulam as cinzas. Sobre o nível da soleira da porta e do estrangulamento (o cinzel), há a construção de uma abóbada ovalada com as pedras de calcário de maiores dimensões que irão suportar as demais, de menores dimensões.

³ O termo “cal virgem” é o consagrado, na literatura brasileira e nas normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas, para designar o produto composto predominantemente por óxido de cálcio ou por óxido de cálcio e óxido de magnésio, resultantes da calcinação, à temperatura de 900-1.200 °C, de calcários, calcários magnesianos e dolomitos.

- **Forno de queima contínua:** composto por duas câmaras sobrepostas e separadas geralmente por grelha de ferro. Em uma delas se inicia a combustão, onde caem as cinzas e as rochas já calcinadas. A grelha tem função de sustentação das camadas intercaladas e sucessivas do combustível e de rochas. A câmara superior possui formato de cone invertido, servindo de condução das sucessivas camadas até a câmara inferior.

Figura 4. Diferentes tipos de fornos artesanais de cal.



Fonte: adaptada de Custódio (2015).

Constata-se assim, que os fornos encontrados na Caieira Três Irmãos se aproximam muito do tipo de forno intermitente: apresentam uma câmara subterrânea, com abóbada circular, apesar de terem a base quadrada.

No contexto brasileiro, a cal passa a ser produzida para suprir as necessidades da construção civil. No século XVI, a produção tinha como base conchas de ostras, encontradas em acúmulos conchíferos no litoral do Rio de Janeiro. Esses acúmulos eram tão abundantes que chamaram a atenção de cronistas e viajantes estrangeiros, como frei Vicente de Salvador e Gabriel Soares de Souza. De fato, trata-se dos sambaquis, cuja exploração para a produção de cal na época suscitou o grande debate entre artificialistas e naturalistas acerca de sua origem (Capanema, 1876; Neto, 1882).

A cal de marisco era produzida a partir da calcinação de conchas em fornos, as caieiras. As conchas eram trituradas e misturadas à “moinha de carvão [...], e na proporção de 1 volume de moinha de carvão para 8 de marisco” (Santos, 1980, p. 5). A mistura era então levada ao forno, anteriormente forrado com lenha, sendo o fogo mantido aceso por 24 horas. Depois de resfriado, a mistura era aspergida com água, sendo, assim, a “cal apagada”. Todo o processo era realizado com mão de obra escrava (Santos, 1980).

Naquela época, a cal era empregada como elemento ligante na composição da argamassa e do revestimento de construções das mais diversas, como fortificações, igrejas e edificações (Souto, 2015). O produto da calcinação das conchas era a cal virgem (óxido de cálcio), que era adicionada à água, se transformando em cal extinta (hidróxido de cálcio). O termo utilizado para se referir à aplicação dessa cal extinta era “caiar” (Souto, 2015). Essa cal podia ainda ser misturada com óleo de baleia ou de peixe e, nesse caso, servia como cimento entre blocos de pedra (Vita; Luna; Teixeira, 2007).

A produção de cal de conchas ou “cal de marisco” (Santos, 1880) foi utilizada por um longo tempo, tendo registro também em 1816, em uma pintura de Jean-Baptiste Debret, e uma descrição do processo de calcinação a céu aberto, sem fornos, feita por John Luccock na mesma época, no Rio de Janeiro (Luccock, 1975 *apud* Souto, 2015). Auguste de Saint-Hilaire também descreveu um processo semelhante de calcinação

de conchas oriundas de “ostreiros” ou “casqueiros”, ou seja, de sambaquis, no litoral do Espírito Santo, nas duas primeiras décadas do século XIX (Saint-Hilaire, 1936)⁴. No início do século XIX, há uma menção da utilização de casca de marisco para a produção de cal, feita por Monsenhor Pizarro (Souto, 2015), demonstrando a perduração da exploração das conchas para a produção de cal no Brasil. Em 1877, já durante o período de declínio da produção de cal baseada em conchas, foram registradas na Ilha do Governador, por exemplo, doze fábricas de cal – um número ainda relativamente elevado para a cidade do Rio de Janeiro (Souto, 2015).

Desde pelo menos 1833, há publicações, em jornais especializados, sobre a utilização da cal, em forma de pó, como fertilizante e corretor de acidez do solo (Souto, 2015). Misturava-se a cal com ervas parasitas, obtendo-se um estrume, e a mistura dessa cal com a terra foi denominada de “caldeagem” – processo muito difundido na época na França, na Inglaterra e na Alemanha (Souto, 2015). Para essa função, relata-se principalmente o uso da cola proveniente da calcinação de pedras, mas há o registro também da aplicação de conchas em estado natural, ou transformadas em cal, como adubo. No final do século XIX, há, ainda, referências da utilização da cal para a desinfecção de esgotos.

Quanto à utilização das pedras calcárias para a produção da cal, Saint-Hilaire (1936) já relata seu uso na localidade de São Pedro dos Índios, em sua visita ao Espírito Santo, na primeira metade do século XIX (Vita; Luna; Teixeira, 2007). José Américo dos Santos (1880) relata a utilização de pedras calcárias para a produção de cal no interior do país, onde não há os ricos depósitos do mar, como na cidade litorânea do Rio de Janeiro, sendo essa produção conhecida como cal de pedras (Santos, 1980). Segundo ele, a produção no interior é mais custosa, em função do frete e do maior valor da cal produzida a partir do calcário. Porém, na época, era produzida no Vale do Paraíba como um todo, “sendo preferida para as construções da estrada de ferro” (Santos, 1980, p. 6), como a estrada de ferro de D. Pedro II. A maior parte da cal produzida no país é resultante da calcinação de calcários/dolomitos metamórficos, de idades geológicas diferentes – geralmente geologicamente muito antigos e de pureza variável, a depender da região (Pereira; Ferreira, 2009). Para a calcinação do calcário é preciso atingir temperaturas por volta de oitocentos a novecentos graus Celsius (Coelho; Torgal; Jalai, 2009).

Em 1879, José Américo dos Santos menciona o risco de decadência da produção de cal no país, em função do crescente aumento da utilização do cimento de Portland, uma mistura de calcário calcinado com argila e água que passava por nova calcinação depois de seco, patenteado em 1824 por Joseph Aspdin (Medeiros, 2019). Esse novo ligante tem melhor desempenho, além de endurecer mais rápido do que a cal (Coelho; Torgal; Jalai, 2009).

No fim dos anos 1940, a cal hidratada foi lançada no mercado e, com isso, o processo de produção de cal recebeu novas etapas (Silva, 2009), ao mesmo tempo que o uso dos fornos artesanais decaiu. A cal hidratada tem partículas muito finas e leves, com alto poder aglomerante, ao mesmo tempo que tem maior potencial de plasticidade, sem fissuração (Coelho; Torgal; Jalai, 2009).

Os primeiros fornos utilizados na produção brasileira eram chamados de meda e poço. Já os fornos de alvenaria começaram a ser utilizados no final do século XIX, segundo informações da Associação Brasileira dos Produtores de Cal. Estes eram “encostados em barrancos e operados com características mais artesanais do que industriais, sempre tendo

⁴ Obra originalmente publicada em Paris em 1833.

a lenha como combustível” (Silva, 2009, p. 27). A partir dos anos 1960, inicia-se a utilização dos fornos metálicos horizontais e verticais (Coelho; Torgal; Jalai, 2009; Silva, 2009).

A evolução dos fornos de cal foi impulsionada pela necessidade de economizar combustível (Silva, 2009) e, conseqüentemente, baratear a produção. Assim, é possível encontrar pelo país antigas estruturas de fornos, decorrentes de caieiras artesanais, geralmente de origem local ou familiar. No município de Ijaci encontra-se a maior reserva de calcário do sul de Minas, localizada no Graben de Ijaci. Desde a década de 1940, esse calcário atraiu a atenção das indústrias, tornando a fabricação de cal uma atividade economicamente significativa tanto no passado quanto no presente. Atualmente, o principal setor industrial que impulsiona a região é a mineração de materiais para a construção civil e a agricultura, incluindo cal, calcário, cimento e argamassa.

MATERIAIS E MÉTODOS

Esta pesquisa foi desenvolvida por meio de atividades de gabinete e campo, de modo interdisciplinar e transdisciplinar, envolvendo procedimentos metodológicos de diferentes áreas do conhecimento. Dessa forma, apresentam-se a seguir os materiais, métodos e técnicas utilizadas em cada abordagem: arqueológica, arquitetônica e aplicação de sensores LiDAR no Forno de Cal 1.

Métodos arqueológicos

O trabalho arqueológico consistiu basicamente em atividades de salvamento e resgate do sítio Caieiras Três Irmãos, onde inicialmente foi realizada a limpeza da cobertura vegetal com uso de foice, facão e rastelo em toda a área dos fornos, de modo a possibilitar a visualização, a descrição e o registro dos seus atributos. Ressalta-se que as árvores de maior porte que se encontravam sobre e entre os fornos não foram retiradas, devido ao risco de desmoronamento das estruturas.

Em seguida, foi conduzido um caminhamento intensivo na área, com o objetivo de mapear vestígios de superfície e identificar áreas com pacotes sedimentares e vestígios de superfície para a abertura de áreas de escavação arqueológica. Essas escavações foram realizadas mediante a abertura de quadrículas de um metro por um metro, utilizando decapagens artificiais com nível de controle de dez centímetros em dez centímetros. Todo o processo foi meticulosamente registrado por meio de fotografias, desenhos esquemáticos e descrições no caderno de campo. Os sedimentos foram peneirados em malha de dois milímetros e descritos quanto a compactação, granulometria, umidade, coloração e outros elementos perceptíveis a olho nu.

As escavações das quadrículas foram encerradas em média no nível 4, entre trinta e quarenta centímetros de profundidade. Após esse nível, foi aberto um poço para teste no centro, com cavadeira articulada, seguindo também níveis artificiais, com controle de dez em dez centímetros de espessura até a profundidade de um metro. O objetivo das escavações foi averiguar se existia pacote arqueológico e, conseqüentemente, a estratigrafia e a dispersão dos vestígios arqueológicos em subsuperfície. Contudo, adianta-se que as escavações não evidenciaram vestígios arqueológicos.

Métodos arquitetônicos

Simultaneamente às atividades dos arqueólogos, descrições arquitetônicas e análises das técnicas construtivas dos fornos foram realizadas. Após o reconhecimento de campo/estruturas, elaboraram-se os croquis de cada face das estruturas para realização das medições.

As medidas foram coletadas utilizando de forma combinada trena de fibra de vidro e trena a laser, proporcionando uma abordagem abrangente para capturar dimensões e detalhes arquitetônicos de forma mais fidedigna.

Os fornos de cal foram documentados por meio de fotografias, em diferentes ângulos e destaque nas áreas específicas que apresentavam danos estruturais. Desse modo, foram avaliadas as condições gerais dos fornos, registrando a localização de componentes como chaminé, vãos de acesso e túneis (cinzel).

A estrutura do Forno 2 se encontrava em colapso. Assim, realizaram-se também levantamentos secundários, com o estudo de estruturas similares, e de forma comparativa com o forno íntegro (Forno 1) dentro do sítio arqueológico. Foram utilizados dados de volume e medidas das partes ainda preservadas do forno, permitindo a apresentação da tipologia de construção, das técnicas construtivas, da funcionalidade, da história e dos elementos necessários para inferir a forma provável do forno atualmente em ruínas. Diante disso, tendo em vista a proposta deste artigo, elegeu-se a estrutura do Forno de Cal 1 para desenvolver as análises comparativas entre as técnicas aplicadas.

No contexto em questão, foi estabelecido um ponto de referência para as medições do Forno de Cal 1, utilizando a face mais intacta, a fim de garantir a consistência nas medidas. Com a trena de fibra foram realizadas medidas de reentrâncias e detalhes. A trena a laser foi utilizada para medir dimensões lineares, como largura, altura e comprimento do forno. Contudo, devido à grande luminosidade no local, a trena a laser foi menos utilizada nas faces externas, empregando-se a trena convencional nas medidas externas. Como a estrutura do forno possui grande altura, o uso das fotografias como referencial também foi base para a etapa da elaboração dos desenhos técnicos.

De posse das anotações realizadas em campo, com medições e avaliação da estrutura, foi realizada a etapa do relatório e dos desenhos técnicos. Para a elaboração dos desenhos técnicos foi utilizado o programa AutoCAD, que permite a criação precisa de modelos em 2D e 3D, fornecendo uma visualização detalhada da estrutura. No caso dos fornos foram elaborados apenas desenhos 2D de planta baixa e elevações.

Cabe ressaltar que houve uma limitação quanto às medições internas, devido ao risco de colapso da estrutura. Para contornar essa situação, foram utilizadas as medidas externas e o estudo comparativo com estruturas semelhantes, buscando-se projetar a forma interna do Forno 1, que se encontrava íntegro.

O trabalho desenvolvido em colaboração entre arqueólogos e arquitetos, utilizando diversas abordagens metodológicas de cada uma das áreas, como apresentado acima, permitiu a elaboração de uma representação virtual das estruturas existentes. Isso possibilitará, no futuro, a reconstituição virtual dos fornos como estruturas íntegras, recompondo as porções ausentes e/ou degradadas.

O levantamento arquitetônico das estruturas foi empregado no Projeto de Resgate Arqueológico do Sítio Caieira Três Irmãos com o intuito de disponibilizar conhecimentos sobre a tipologia arquitetônica dos fornos. Essa metodologia permitiu ainda entender a morfologia do sítio arqueológico, distinguindo as camadas e estruturas componentes dos fornos.

Métodos de sensoriamento remoto/geoprocessamento: técnica de varredura terrestre

Como forma de avaliar alternativas técnicas do sensoriamento remoto, foram aplicados diferentes métodos de registro das estruturas: fotogrametria realizada com laser LiDAR; escaneamento utilizando sensor Zebgo-Geoslam e escaneamento com *smartphone* equipado com sensor LiDAR (iPhone 12 Pro Max).

Diante do processo de desenvolvimento tecnológico, já ocorre há alguns anos o uso de equipamentos baseados em laser, visando a aquisição otimizada de dados topográficos georreferenciados em áreas remotas e/ou complexas (Pucci; Marambio, 2009). O uso de sensores LiDAR terrestres promove incremento e mudança de perspectivas em estudos ambientais, permitindo mapeamentos tridimensionais que subsidiam cálculos (área, superfície e volume) e análises geométricas, podendo a técnica ser aplicada em ambientes confinados como cavidades ou dutos (De Waele *et al.*, 2018). Considera-se, portanto, a aplicabilidade de técnicas de varredura a laser terrestre (TLS)⁵ e fotogrametria 3D de estruturas para fins arqueológicos (Puchol *et al.*, 2013).

A varredura utilizando a tecnologia LiDAR em grandes espaços emite resultados com a representação de milhões de pontos, revolucionando a coleta de dados e a forma de analisar os sítios arqueológicos e as paisagens. Assim, a nuvem de pontos que é gerada representa um universo de mudanças geradas na topografia pelo ser humano no tempo-espaço. O que torna ainda mais inovadora essa tecnologia é a possibilidade de escaneamento mesmo em áreas remotas e com vegetação densa (Fisher *et al.*, 2016).

Essa tecnologia consiste em um sensoriamento remoto baseado em laser, a qual fornece dados tridimensionais precisos e detalhados da topografia da superfície do solo (Gomes; Simas, 2014; Inomata *et al.*, 2018). No entanto, a tecnologia de sensoriamento remoto a laser aplicada aos estudos arqueológicos no Brasil ainda se encontra em fase inicial e é pouco explorada. O LiDAR pode contribuir significativamente para os estudos arqueológicos, especialmente na varredura e escaneamento de estruturas em áreas remotas ou inacessíveis devido à cobertura vegetal. Seus resultados podem apresentar altos índices de qualidade na identificação de paisagens construídas por antigas ocupações humanas. Um exemplo recente e inovador inclui voos realizados em grandes sítios arqueológicos em Mariana e Ouro Preto (MG), associados à arqueologia da mineração. Os resultados preliminares têm demonstrado uma série de anomalias no terreno que vão além das possibilidades de visualização *in loco* (assunto a ser aprofundado em outra publicação).

Zebgo-Geoslam

Como uma das técnicas aplicadas, o levantamento ou varredura terrestre foi realizado com o uso do equipamento LiDAR, sensor Zebgo da fabricante Geoslam. De acordo com a especificação técnica do fabricante (Geoslam, 2021), esse equipamento tem a capacidade de leitura de 43 mil pontos por segundo, com uma frequência de quarenta hertz, alcançando trinta metros e com uma precisão relativa entre um e três centímetros. Além disto, o equipamento tem campo de visão de 270° na vertical e 360° na horizontal, garantindo amplo alcance a toda a estrutura mapeada. É importante ressaltar que o sensor utilizado não tem câmera fotogramétrica integrada, ou seja, são geradas nuvens de pontos com ausência de cor, portanto não colorizadas.

Smartphone: iPhone 12 Pro Max

O dispositivo da Apple (iPhone 12 Pro Max) tem sensor com emissão de pulsos e foi implantado inicialmente para melhoria de performance quanto à identificação facial, medição de objetos e estruturas. De acordo com a especificação técnica (Apple, 2022, c2025),

⁵ A sigla TLS corresponde ao nome da técnica em inglês “Terrestrial Laser Scanning”.

o sensor permite a digitalização de objetos localizados a distâncias de até cinco metros do dispositivo. O sensor LiDAR do iPhone é integrado com câmeras de alta resolução, unidade de medição inercial (IMU)⁶, que minimiza impactos de movimentos, e com sistema para registros fotográficos individuais, utilizados para melhoria visual dos dados 3D. O uso do sensor já foi validado em estudos ambientais (Gollob *et al.*, 2021; Mokroš *et al.*, 2021).

Levantamento de dados em campo: coleta de pontos de controle

Para que houvesse o georreferenciamento da nuvem de pontos resultante da varredura da estrutura arqueológica com uso dos sensores LiDAR, previamente foram identificadas coordenadas de amarração por meio da coleta de três pontos de controle no entorno da área de interesse. Essas coordenadas de amarração foram registradas por meio de aparelho receptor de *Global Positioning System* (GPS) de navegação do modelo Garmin 64x. De acordo com a especificação técnica do fabricante, existe garantia de precisão posicional próxima de três metros, considerada uma precisão moderada. Embora haja limitações do GPS portátil quando comparado a sensores de alta precisão com *Real Time Kinematic* (RTK), o sensor é adequado para a análise em questão, que não busca requisitos de precisão centimétrica, como aplicado em levantamentos como de georreferenciamento cadastral ou agricultura de precisão. Nesse caso, todos os levantamentos realizados foram amarrados às mesmas coordenadas de referência, significando que, mesmo que haja o baixo deslocamento posicional em relação à verdade de campo, os levantamentos estão vinculados a referências em comum.

Levantamento de dados em campo: scanner

O mapeamento com sensor Laser Scanner (Zebgo) foi iniciado com a manutenção estática do sensor e do operador pelo tempo de quinze segundos. De acordo com as orientações do fabricante, esse procedimento é identificado pelo sensor como ponto de controle, e, juntamente com outros dois pontos, foi utilizado como ponto de referência para amarração e georreferenciamento da nuvem de pontos. Após esse procedimento, e observando as condições de segurança operacional, toda a área do Forno 1 foi percorrida por um operador com sensor em mãos, buscando, mediante a percepção *in loco*, que toda a área da estrutura fosse alcançada pelo feixe de laser. Com exceção da etapa de manutenção estática do sensor para reconhecimento do ponto de controle, o mesmo procedimento de varredura da área foi realizado com *smartphone* (iPhone 12 Pro Max), considerando as limitações deste quanto à distância máxima de cinco metros entre o aparelho e o alvo desse levantamento.

Para ambos os levantamentos (Zebgo e iPhone), todo o procedimento de execução da atividade de levantamento em campo ocorreu em tempo inferior a sessenta minutos para cada sensor. Ou seja, trata-se de um procedimento de aplicação relativamente rápida.

Processamento de dados

Após a conclusão da etapa de levantamento em campo, utilizando ambos os sensores (Zebgo e iPhone), o georreferenciamento das nuvens de pontos foi realizado no software RiSCAN Pro, considerando as coordenadas de amarração coletadas com o GPS Garmin.

⁶ A sigla IMU corresponde ao nome da técnica em inglês “Inertial Measurement Unit”.

Para os dados obtidos por meio do sensor Zebgo, devido à alta densidade de informações coletadas pelo sensor de varredura, somente 20% do volume obtido foram direcionados para o software de processamento, procedimento este em acordo com as recomendações do fabricante (Geoslam, 2021), garantindo ainda assim um alto nível de detalhamento e precisão da estrutura mapeada.

Para os dados obtidos por ambos os sensores, considerando a existência de interferências e obstáculos entre sensores, operador e alvo (Forno 1), como árvores ou arbustos, e até mesmo resíduos sólidos urbanos, foi realizada a limpeza da nuvem de pontos. Após o processo de filtragem ou limpeza da nuvem de pontos e a eliminação de registros indesejáveis, foi realizada uma triangulação considerando a resolução espacial de dois centímetros. Nessa etapa do processo ocorreram a interpolação, a renderização e a criação do modelo tridimensional, procedimentos realizados no software CloudCompare.

Para a representação dos resultados obtidos, os dados foram convertidos e projetados para utilização em software ZWCAD, ambiente onde foram realizadas análises dimensionais e ilustrativas (plantas e seções).

RESULTADOS

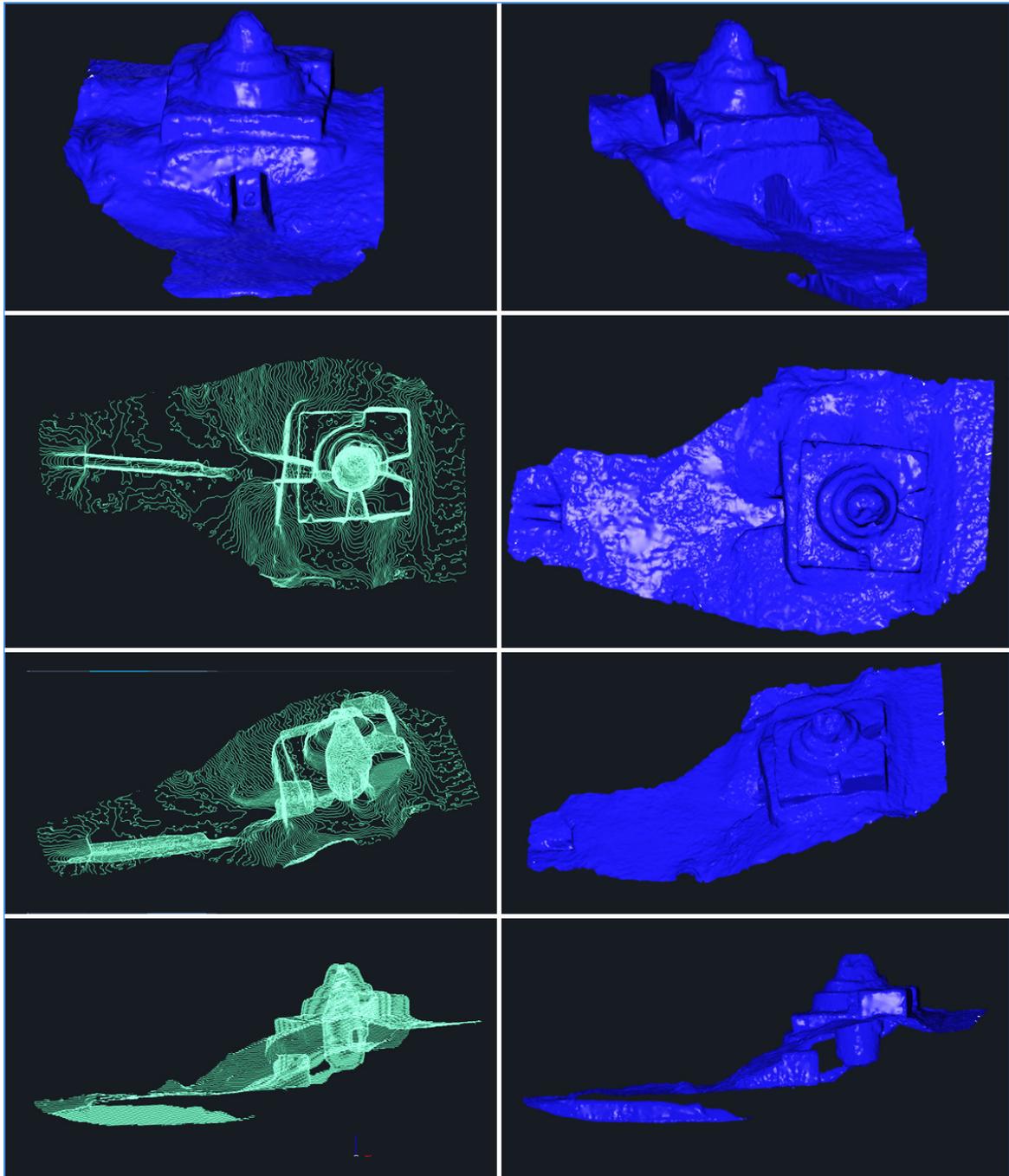
Resultados do escaneamento da estrutura: Zebgo e iPhone 12 Pro Max

O resultado do modelo tridimensional gerado a partir do processamento de nuvem de pontos do sensor componente do aparelho iPhone apresentou boa representação geométrica da estrutura mapeada (Forno de Cal 1), além de notória potencialidade para a criação de realidade virtual e das formas, dimensões e percepção do arranjo locacional das subestruturas (entradas, depósito de lenha, cinzeiro) em relação ao terreno. A nuvem de pontos colorizada potencializa a experiência de realismo da estrutura mapeada, proporcionando visualização intuitiva e natural, permitindo ao observador/ usuário melhor percepção de escala do ambiente por meio das cores, que são essenciais para destacar, caracterizar e diferenciar elementos, melhorando, conseqüentemente, a compreensão visual (Figura 5).

Esses resultados indicam a grande potencialidade de uso do sensor para a representação geométrica de estruturas arqueológicas similares, mas evidencia também as limitações causadas pela ausência de sensor fotográfico que permita a representação com colorização nativa, impossibilitando análises texturais e realistas do alvo mapeado.

Outro ponto notável de observação é a não captura do sensor de toda a extensão do cinzeiro localizado na parte inferior do forno. O duto tem extensão estimada de dezesseis metros entre a base do forno e a saída do cinzeiro, local de onde o operador manuseou o sensor. Apesar da indicativa técnica de que o sensor Zebgo tem alcance de até trinta metros, o que seria suficiente para cobrir a área do cinzel, o conduto não foi completamente mapeado. Por risco de colapso estrutural e adotando medidas de segurança, o operador não adentrou no conduto, impossibilitando o contato visual pleno com o duto em sua integralidade. Nesse contexto, considerando a etapa de limpeza da nuvem, entende-se que o duto apresenta, na data do levantamento, uma obstrução por deposição natural, não sendo possível especificar a natureza desses obstáculos.

Conforme ocorrido também no levantamento com utilização do Zebgo, o sensor do iPhone não alcançou toda a extensão do duto, o que se pode justificar considerando o limite de distância de alcance mencionado na especificação técnica do aparelho (cinco metros).

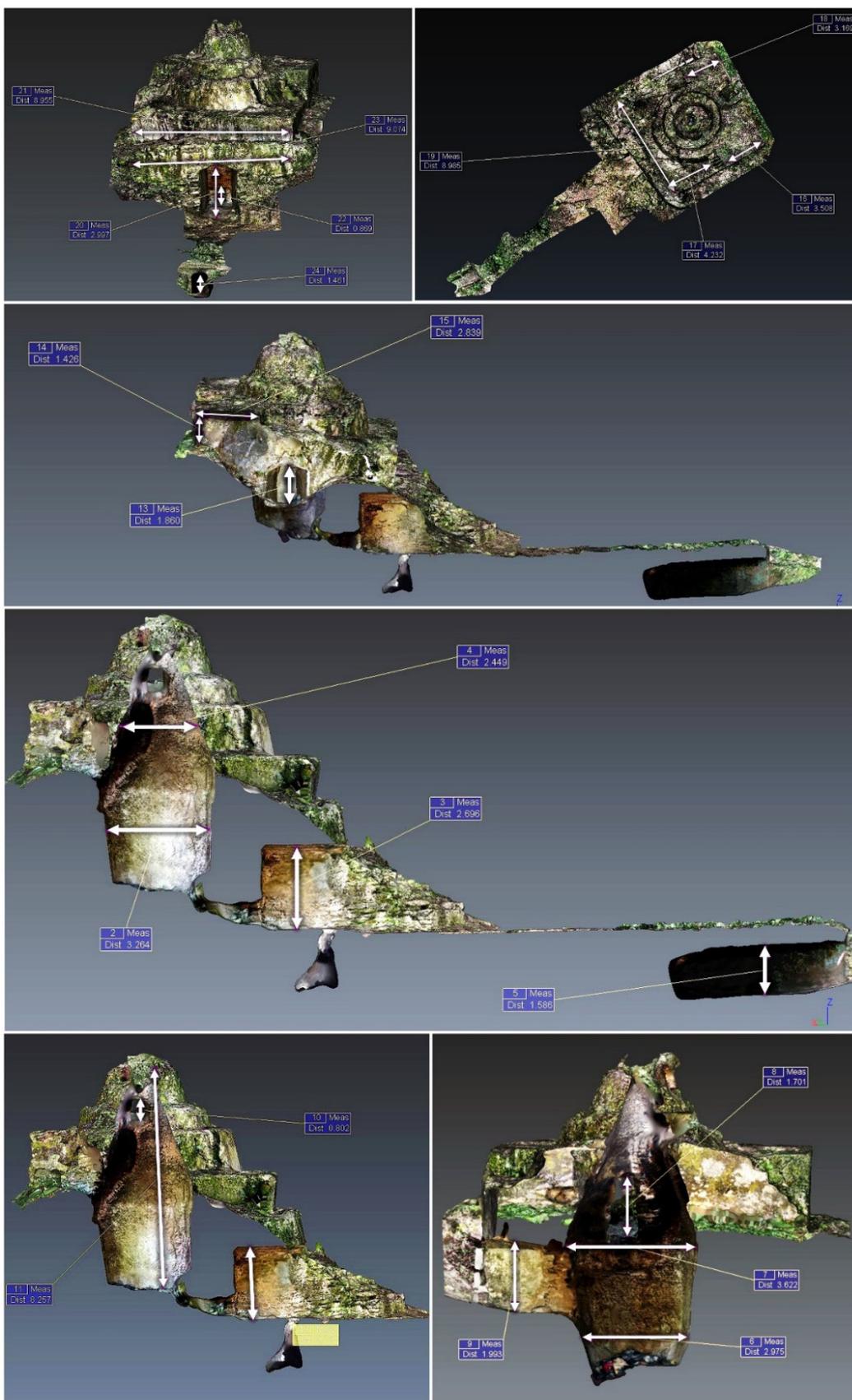
Figura 5. Modelo tridimensional: Zebgo.

Fonte: Brandt (2023).

Resultados do método arquitetônico (tradicional)

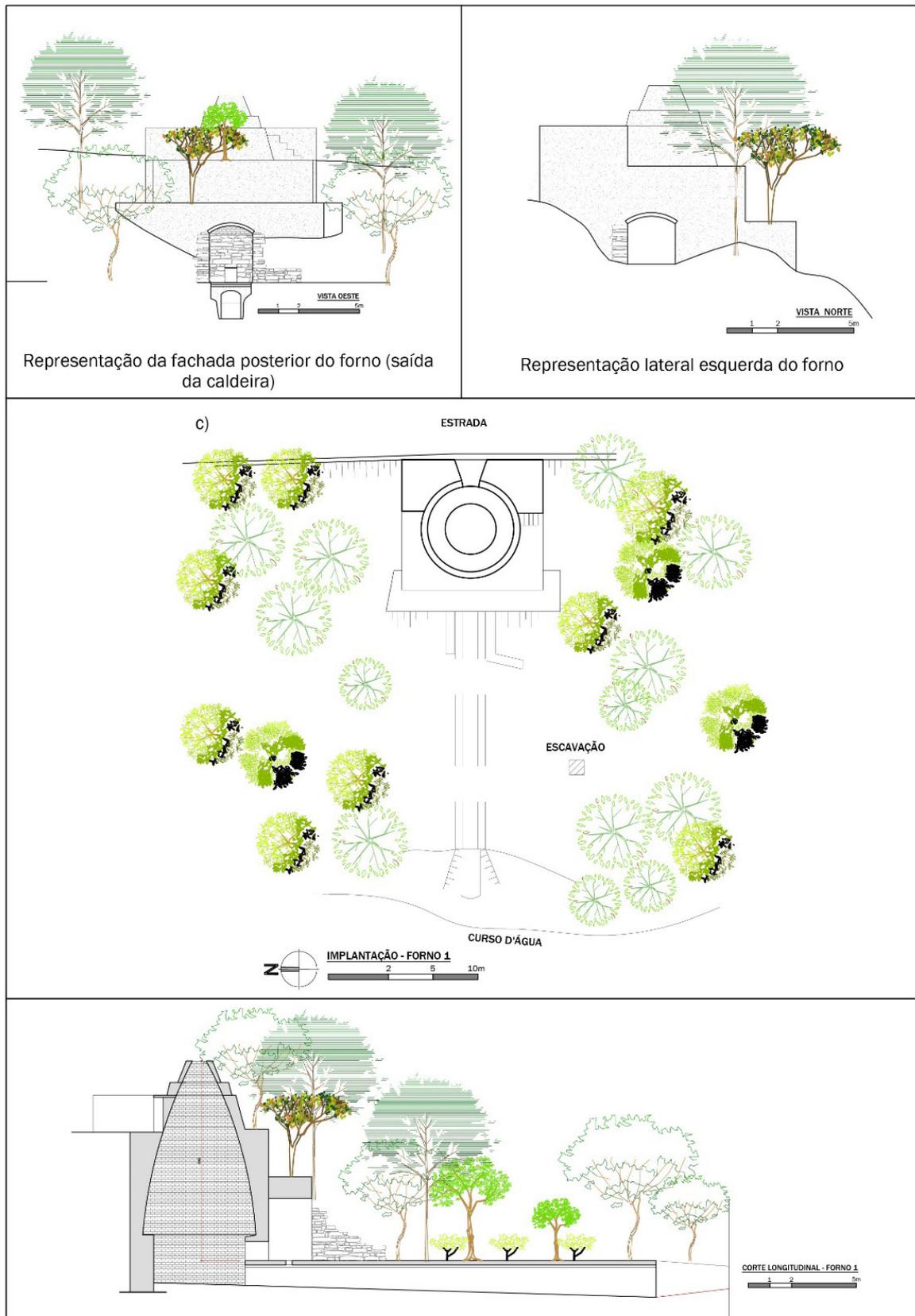
Ao analisar a representação técnica arquitetônica (Figura 7), pode-se observar também a base retangular, com uma abertura voltada para a parte mais baixa do terreno, o que permite o acesso à caldeira e a retirada de cinzas por um túnel (cinzel). Além disso, observaram-se na parte intermediária da chaminé duas aberturas, uma na lateral, na altura média do forno, e outra abertura superior. Esses vãos são de acesso para colocação das pedras de calcário a serem calcinadas. A chaminé tem forma cônica, em três níveis, havendo uma abertura circular no topo, conferindo aos fornos uma morfologia geral piramidal.

Figura 6. Modelo tridimensional colorizado: iPhone 12 Pro Max.



Fonte: Brandt (2023).

Figura 7. Representação arquitetônica do Forno de Cal 1.

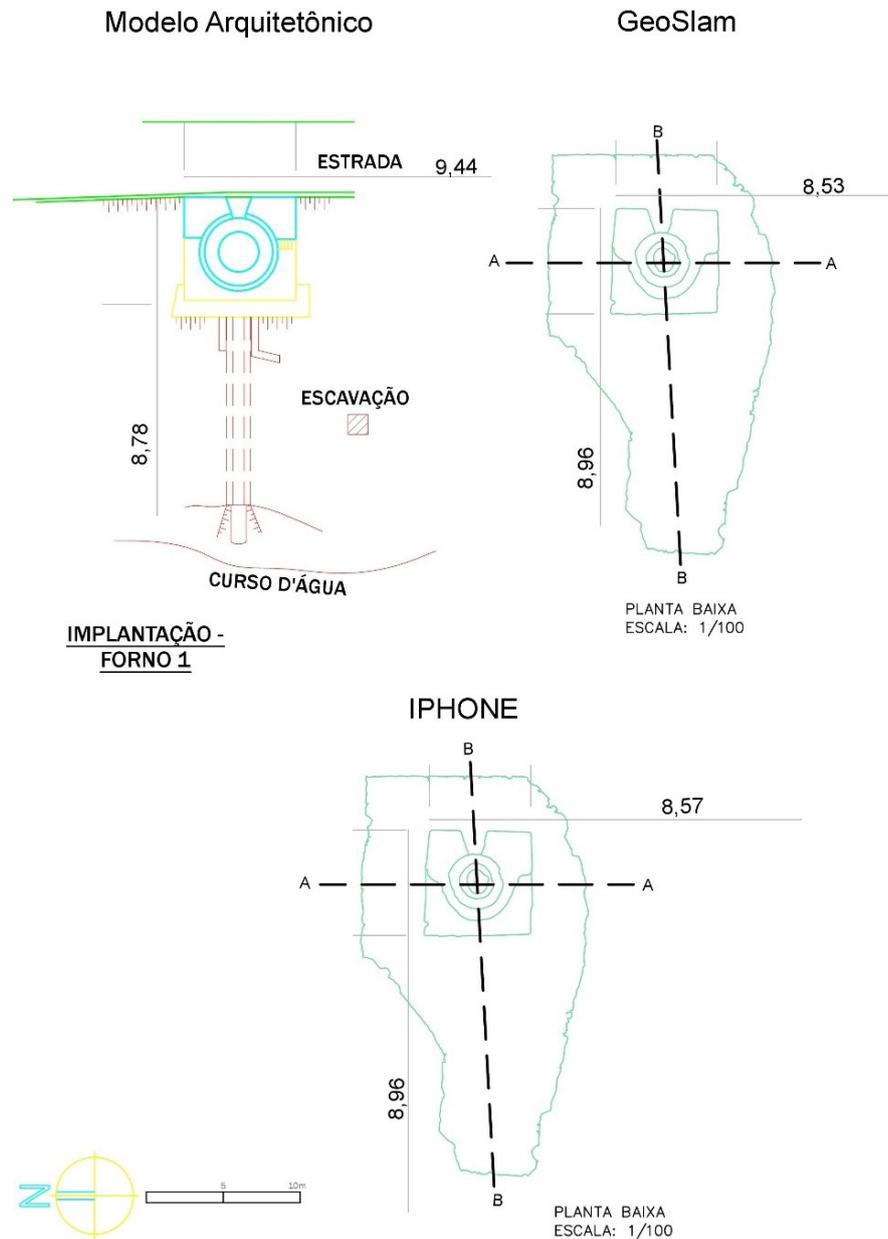


Fonte: Brandt (2023).

Resultados do escaneamento da estrutura: dimensões

Como forma de balizamento dos resultados obtidos por meio de diferentes métodos de registro, os modelos foram projetados em planta baixa, evidenciando de forma objetiva as dimensões alcançadas (Figura 8).

Figura 8. Comparativo da representação dos resultados em planta baixa.



Nota: Dimensões registradas em metros.

Fonte: Brandt (2023).

Por meio das representações feitas em projeção de planta baixa, notou-se que entre o levantamento do Zebgo e o do iPhone há uma diferença de aproximadamente quatro centímetros na largura total do Forno de Cal 1, o que representa variação inferior a 0,5%, retratando a similaridade geométrica nesse modelo de representação da estrutura. Além da diferença proporcionalmente baixa em largura, a variação de volume total

também apresentou baixa variabilidade, com resultado inferior a 0,07% em quantitativos volumétricos (Tabela 1).

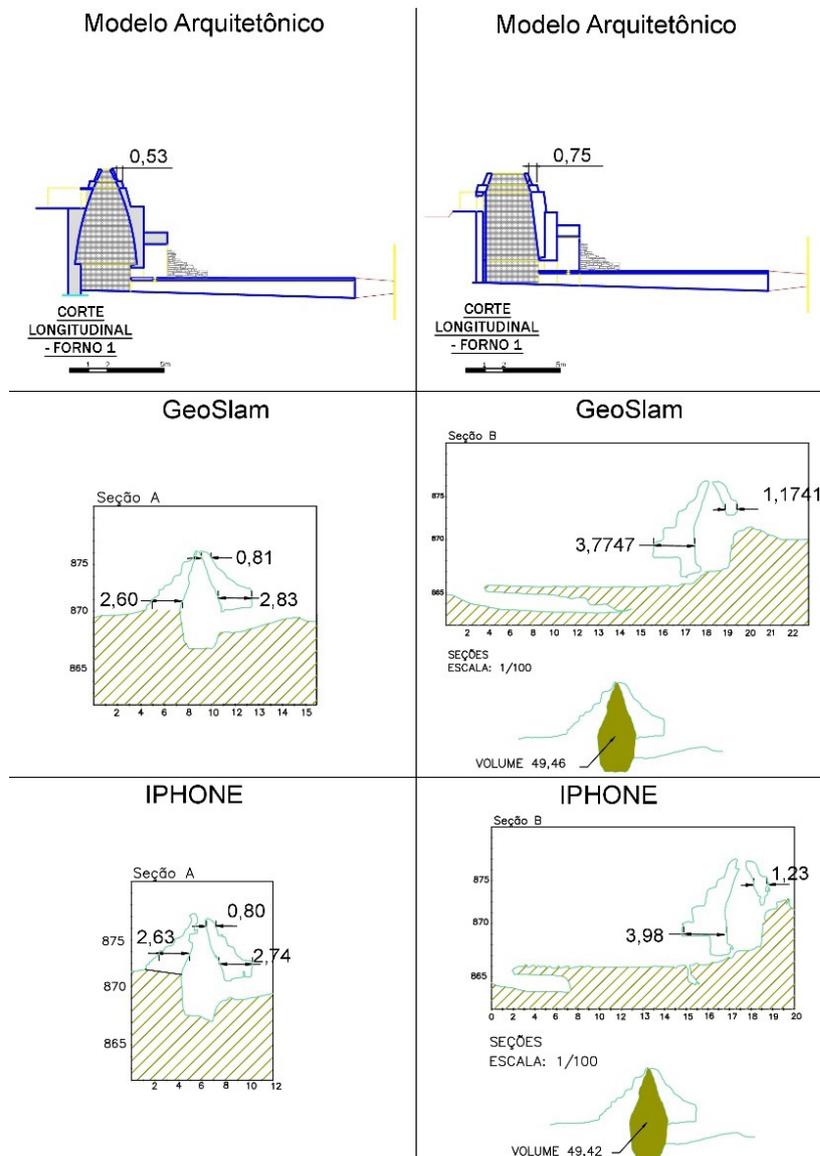
Tabela 1. Comparativo de dimensões e volume.

TÉCNICA/ SENSOR	Volume do Forno (m ³)	Altura (m)	Largura (m)
Desenho Arquitetônico	-	8,78	9,44
Zebgo-Geoslam	49,456	8,96	8,53
iPhone 12 Pro Max	49,423	8,96	8,57

Fonte: Brandt (2023).

As medidas de trechos das seções transversais também foram comparadas, conforme representação da Figura 9:

Figura 9. Comparativo da representação dos resultados em seções.



Fonte: Brandt (2023).

De acordo com esses resultados, a diferença de medidas entre os dois métodos de mapeamento com varredura por meio do sensor LiDAR foi de no máximo 21 centímetros (Seção B – Lado Esquerdo). Além disso, observa-se que não houve padrão de variação ou uniformidade locacional e concentrada em parte direcionada da estrutura (Tabela 2).

Tabela 2. Comparativo de dimensões e volume.

TÉCNICA/ SENSOR	Seção A – Esquerda (m)	Seção A – Direita Superior (m)	Seção A – Direita Inferior (m)	Seção B – Esquerda (m)	Seção B – Direita (m)
Desenho Arquitetônico	-	0,53	-	-	0,75
Zebgo-Geoslam	2,6	0,81	2,83	3,77	1,17
iPhone 12 Pro Max	2,62	0,8	2,74	3,98	1,23

Fonte: Brandt (2023).

Com base nas perspectivas apresentadas, observa-se que as principais análises comparativas envolvem os dados obtidos por meio do sensor LiDAR (Zebgo e iPhone). Quando comparados com a projeção do desenho arquitetônico, os resultados desses métodos apresentam uma variação considerável, o que pode ser atribuído às diferentes capacidades dos sensores de representar a realidade.

É importante ressaltar que as medidas obtidas com a trena a laser, utilizadas como referência para a elaboração do desenho arquitetônico, são baseadas na emissão de um único feixe direcionado a um ponto específico. Isso significa que o equipamento não cobre a totalidade da estrutura, o que limita sua precisão. Por outro lado, o uso do LiDAR, que realiza uma varredura mais abrangente e captura informações tridimensionais detalhadas, oferece uma representação mais precisa e completa da realidade.

DISCUSSÕES: EM PERSPECTIVA O MÉTODO DE REGISTRO ARQUITETÔNICO E AS POTENCIALIDADES E LIMITES DAS TÉCNICAS DO SENSORIAMENTO REMOTO: CASO DO FORNO DE CAL 1

Mediante uma abordagem interdisciplinar que integra arqueologia, arquitetura e análises espaciais, que abrange, por sua vez, atividades teóricas, de campo e processamento de dados, foi possível elucidar o uso dos fornos do sítio Caieira Três Irmãos, bem como os aspectos das técnicas construtivas e da geração de registros imagéticos de alta qualidade. A conjugação dos dados arqueológicos e arquitetônicos com a tecnologia LiDAR proporcionou uma compreensão aprofundada das estruturas analisadas, resultando em uma maior clareza quanto aos aspectos espaciais, estruturais e temporais.

A documentação arquitetônica tradicional é um bom instrumento para levantamento e reconhecimento de estruturas arquitetônicas. Entretanto, como instrumento, tem suas limitações. Em formas mais complexas, irregulares ou devido ao mau estado de conservação, alguns dados não são documentados com tanta precisão (Groetelaars, 2016). Desse modo, os avanços em ferramentas de processamento e gerenciamento de dados têm se tornado essenciais para a documentação e a disponibilização de dados visando a disseminação e a preservação de bens culturais materiais.

Os resultados dos sensores com tecnologia LiDAR possibilitam a varredura terrestre e a consequente modelagem das estruturas em alto nível de detalhamento e, ainda, a possibilidade de criações e representações realistas, proporcionando experiências do mundo real e cálculo das dimensões estruturais.

Os recursos do LiDAR, aliados aos dados arqueológicos e arquitetônicos (mesmo como métodos tradicionais), geram produtos que podem ser inseridos na perspectiva da arqueologia virtual, com potencialidade de se inserir na ciberarqueologia, quando programado para possibilitar a interação dos usuários (Martire, 2017). Como explicita Martire (2017), esses produtos atendem a dois objetivos: produção de conhecimento (coleta de dados em campo em meio digital, produção de modelos tridimensionais das atividades de campo) e divulgação dos resultados da pesquisa e/ou utilização como recurso didático-educativo.

No campo da produção de conhecimento, os dados gerados pelo sensor LiDAR são fundamentais para fornecer informações detalhadas sobre as estruturas arqueológicas, a morfologia da superfície dos sítios e as dimensões e volumes precisos dessas estruturas. Além disso, o LiDAR permite a distinção de camadas e subestruturas, ampliando as possibilidades de aplicação em ambientes computacionais, como a rotação multidimensional e a manipulação virtual (Chase *et al.*, 2012). Em comparação com registros fotográficos e representações arquitetônicas em planta, que são limitados à escala bidimensional, o LiDAR oferece um registro tridimensional mais próximo da materialidade, visível ao pesquisador mediante coloração, texturas e volumes. Nesse sentido, o primeiro objetivo da publicação é apresentar um resultado planialtimétrico preciso, com detalhes sobre a composição morfológica da estrutura.

Ainda no contexto da divulgação dos resultados da pesquisa arqueológica e da socialização do patrimônio, o material gerado pelo LiDAR não apenas enriquece a experiência do pesquisador, mas também potencializa a imersão, permitindo um contato mais profundo da sociedade com a estrutura. Esse processo amplia o acesso, a difusão e a interação no campo da realidade virtual, com a premissa de que os resultados sejam adaptáveis para um acesso amplo e disseminado por intermédio de dispositivos conectados à internet (computadores, *tablets* e celulares). Dessa forma, diversos públicos podem interagir com o patrimônio arqueológico em diferentes contextos.

Um outro campo de contribuições dos produtos virtuais deve ser discutido: o auxílio na gestão e preservação do patrimônio (Chase *et al.*, 2012). Como bens materiais não móveis, impactados e sujeitos a impactos pelo empreendimento, os registros realizados permitem uma espécie de resgate virtual do sítio, como dissemos, ao disponibilizar seu acesso. Ainda, em termos de gestão, os registros possibilitam um mapeamento mais preciso da evolução dos agentes tafonômicos e de seus efeitos sobre o patrimônio, com mensuração do ritmo e da intensidade desses agentes, facilitando a proposição de medidas de conservação.

Para que o potencial dos sensores LiDAR seja totalmente aproveitado na arqueologia virtual, na pesquisa arqueológica e na divulgação e socialização do patrimônio, é essencial avaliar as melhores opções para cada contexto. Neste estudo, por exemplo, tanto o sensor Zebgo quanto o iPhone se mostraram boas alternativas para análises e representações, mas cada um tem limitações específicas. O Zebgo, por exemplo, não gera nuvens de pontos colorizadas, o que restringe a percepção da realidade, enquanto o iPhone tem limitações de alcance, especialmente em áreas remotas ou de difícil acesso.

É importante destacar que, devido ao rápido avanço tecnológico e à crescente disseminação do uso de sensores LiDAR, novas alternativas para aprimorar os resultados já surgiram entre o levantamento realizado para este estudo e a data de revisão. Um exemplo disso é o equipamento Slam 100, fabricado pela CHC e lançado em 2023, que se destaca por sua alta densidade de pontos, precisão subcentimétrica e longo alcance. O principal avanço desse sensor está na capacidade de captar nuvens de pontos colorizadas por meio de três câmeras de cinco megapixels, mantendo

ao mesmo tempo o longo alcance e alta frequência de varredura. Esse cenário evidencia a constante evolução da tecnologia voltada para sensores Slam móveis, com a tendência de um uso cada vez mais frequente e resultados cada vez mais precisos e realistas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos desempenham um papel significativo no enriquecimento do conhecimento arqueológico sobre as estruturas e do sítio em estudo, proporcionando aos leitores uma compreensão dimensional e volumétrica precisa. Ademais, os produtos resultantes do escaneamento realizado com o sensor LiDAR viabilizam a criação de dinâmicas em ambientes de realidade virtual, destacando-se como uma ferramenta promissora para a divulgação, conscientização, proteção e gestão do Patrimônio Arqueológico.

Contudo, apesar da incrementação dessa tecnologia de sensoriamento remoto baseado em laser scanner nos estudos de arqueologia no Brasil, sua aplicação encontra-se ainda em fase inicial. O LiDAR, por exemplo, tem contribuído significativamente nos estudos arqueológicos, principalmente na varredura e escaneamento de estruturas em áreas remotas ou com impossibilidade de visualização pela cobertura vegetal, de modo que seus resultados podem apresentar grandes índices de qualidade sobre as paisagens naturais e/ou construídas por antigas ocupações humanas, ou seja, as anomalias decorrentes dessas ocupações na paisagem são passíveis de mapeamento por meio dessa técnica.

Alguns estudiosos comparam essa técnica de mapeamento à magnitude da revolução paradigmática gerada pelo desenvolvimento do método de datação C^{14} , com as revoluções que a aplicação do sensor LiDAR têm causado na pesquisa arqueológica (Inomata *et al.*, 2018).

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à InterCement Brasil S/A pelo fomento e pela confiança.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APPLE. Manual do Usuário do iPhone 14 Pro Max, 2022. Disponível em: <https://support.apple.com/pt-br/guide/iphone/welcome/18.0/ios>. Acesso em: 1 maio 2025.
- APPLE. *Polycam: LiDAR & 3D Scanner*. [S. l.: s. n.], c2025. Disponível em: <https://apps.apple.com/br/app/polycam-lidar-3d-scanner/id1532482376>. Acesso em: 25 nov. 2023.
- BRANDT MEIO AMBIENTE. *Programa de Salvamento e Resgate Arqueológico e Programa de Educação Patrimonial na Área do Empreendimento do Complexo Minerário de Ijaci*. [S. l.: s. n.], 2021. Manuscrito.
- BRANDT MEIO AMBIENTE. *Relatório do Programa de Salvamento e Resgate Arqueológico e Programa de Educação Patrimonial na área do Empreendimento do Complexo Minerário de Ijaci*. [S. l.: s. n.], 2022. Manuscrito.
- BRANDTMEIOAMBIENTE. *Diagnóstico interventivo arqueológico complementar do complexo minerário de Ijaci*. Nova Lima, 2017. Disponível em: https://sei.iphan.gov.br/sei/modulos/pesquisa/md_pesq_documento_consulta_externa.php?yPDSzXhdoNcWQHJaQIHJmJIqCNXRK_Sh2SMdn1U-tzOvKVnGNGzcsQ4e-eQePsq-a0GmHT-OwOwuiRyKZdfM80KuztbDbB6sjlNSL7eKxnhOvWyHzMvGaybvTbB7v8qi. Acesso em: 30 abr. 2025.

CAPANEMA, Guilherme S. de. Os sambaquis. *Ensayos de Ciencias*, v. 1, p. 79-91, 1876.

CHASE, Arlan F.; CHASE, Diane Z.; FISHER, Christopher T.; LEISZ, Stephen J.; WEISHAMPEL, John F. Geospatial revolution and remote sensing LiDAR in Mesoamerican Archaeology. *PNAS*, v. 109, n. 32, p. 12916-12921. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1205198109>.

- COELHO, Ana Zulmira G.; TORGAL, F. Pacheco; JALAI, Said. *A cal na construção*. Lisboa (Portugal): Publidisa, 2009.
- CUSTÓDIO, Paulo. *Os fornos de cal do baixo Guadiana: contributo para um estudo arquitetónico*. Dissertação (Mestrado Integrado em Arquitetura) – Escola de Artes, Universidade de Évora, Évora, 2015.
- DE WAELE, Jo; FABBRI, Steffano; SANTAGATA, Tommaso; CHIARINI, Veronica; COLUMBU, Andrea; PISANI, Luca. Geomorphological and speleogenetical observations using terrestrial laser scanning and 3D photogrammetry in a gypsum cave (Emilia Romagna, N. Italy). *Geomorphology*, v. 319, p. 47-61, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.07.012>.
- FISHER, Christopher T.; FERNANDEZ-DIAZ, Juan Carlos; COHEN, Anna S.; CRUZ, Oscar N.; GONZLES, Alicia M.; LEISZ, Stephen J.; PEZZUTTI, Florencia; SHRESTHA, Ramesh; CARTER, William. Identifying ancient settlement patterns through LiDAR in the Mosquitia Region of Honduras. *PLoS ONE*, v. 11, n. 8, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0159890>.
- GEOSLAM. ZEB-GO User Guide 2021. Disponível em: https://device.report/m/f5310f333c75f6f2c4c19c3dd2612544477023faa4aaa7cf08e320e53c31a48d_optim.pdf. Acesso em: 1 maio 2025.
- GOLLOB, Christoph; RITTER, Tim; KRAŠNITZER, Ralf; TOCKNER, Andreas; NOTHDURFT, Arne. Measurement of forest inventory parameters with Apple iPad Pro and integrated LiDAR technology. *Remote Sensing*, v. 16, p. 3129, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13163129>.
- GOMES, Diego; SIMAS, Alexandre Gabriel. *Scanner tridimensional a laser*. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Tecnologia em Mecatrônica Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.
- GROETELAARS, Natalie Johanna. *Criação de modelos BIM a partir de “nuvens de pontos”*: estudo de métodos e técnicas para documentação arquitetônica. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2016.
- INOMATA, Takeshi; TRIADAN, Daniela; PINZÓN, Flory; BURHAM, Melissa; RANCHOS, José Luis; AOYAMA, Kasuo; HARAGUCHI, Tsuyoshi. Archaeological application of airborne LiDAR to examine social changes in the Ceibal Region of the Maya Lowlands. *PLoS ONE*, v. 13, n. 2, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0191619>.
- JOHN, Vanderley M.; PUNHAGUI, Katia R. Garcia; CINCOTTO, Maria Alba. Indústria da cal. In: TONETO JR., Rudinei; PINHO, Marcelo (coord.). *Economia de baixo carbono: impactos de novos marcos regulatórios e tecnologias sobre a economia brasileira*. Ribeirão Preto: Funec Editora, 2014. p. 371-399.
- KÜHL, Beatriz Mugayar. Algumas questões relativas ao patrimônio industrial e à sua preservação. *Revista do IEEE América Latina*, v. 4, p. 1-10, 2006.
- MARTIRE, Alex da S. Ciberarqueologia: o diálogo entre realidade virtual e arqueologia no desenvolvimento de Vipasca antiga. *Cadernos do LEPAARQ*, v. 14, n. 27, p. 29-52, 2017. DOI: <https://doi.org/10.15210/lepaarq.v14i27.10391>.
- MEDEIROS, José A. D. M. Cimento Portland na Ilha Tiriri: história, vestígios e caracterização de materiais. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019.
- MOKROŠ, Martin; MIKITA, Tomáš; SINGH, Arunima; TOMAŠTÍK, Julián; CHUDÁ, Juliána; WEŻYK, Piotr; KUŽELKA, Karel; SUROVÝ, Peter; KLIMÁNEK, Martin; ZIĘBA-KULAWIK, Karolina; BOBROWSKI, Rogerio; LIANG, Xinlian. Novel low-cost mobile mapping systems

- for forest inventories as terrestrial laser scanning alternatives. *International Journal of Earth Applied Observation and Geoinfomation*, v. 104, p. 102512, 2021.
- MUÑOZ JIMÉNEZ, José Miguel; SCHNELL QUIERTANT, Pablo. Los hornos de cal del Zanco en Vegas de Matute (Segovia). *De Re Metallica: Revista de la Sociedad Española para la Defensa del Patrimonio Geológico y Minero*, n. 6, p. 75-82, 2006.
- NETO, Ladislau. A origem dos sambaquis. *Revista da Exposição Antropológica Brasileira*, p. 37-38, 1882.
- PEREIRA, Luana dos Santos; FERREIRA, Gilson, E. A indústria da cal no Brasil. *Anais da XVII Jornada de Iniciação Científica*, p. 178-184, 2009.
- PUCCI, B.; MARAMBIO A. Olerdola's Cave, Catalonia: a virtual reality reconstruction from terrestrial laser scanner and GIS data. In: ISPRS INTERNATIONAL WORKSHOP 3D-ARCH, 2009, Trento (Itália). *Proceedings* [...]. [S. l.: s. n.], 2009. Disponível em [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/9187/Pucci_Marambio_%20LTS%20Cova%20de%20Olerdola%20\[Modalitat%20compatibilitat\].pdf](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/9187/Pucci_Marambio_%20LTS%20Cova%20de%20Olerdola%20[Modalitat%20compatibilitat].pdf). Acesso em: 25 nov. 2023.
- PUCHOL, Oreto G.; MCCLURE Sarah B.; BLASCO SENABRE, Joseph; COTINO VILLA, Fernando; PORCELLI, Vito. Increasing Contextual information by merging existing archaeological data with state of the art laser scanning in The Prehistoric Funerary Deposit of Pastora Cave, Eastern Spain. *Journal of Archaeological Science*, v. 40, n. 3, p. 1593-1601, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jas.2012.10.015>.
- SAINT-HILAIRE, Auguste de. *Segunda viagem ao interior do Brasil: Espírito Santo*. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 1936.
- SANTOS, José Américo dos. Depósitos de conchas nos arredores do Rio de Janeiro. *Revista de Engenharia*, p. 4-7, 1880.
- SILVA, José Otávio. *Perfil da cal*. Brasília, DF: MME, 2009. Disponível em: https://antigo.mme.gov.br/documents/36108/449811/P46_RT72_Perfil_do_Cal.pdf/683f97eb-faa3-0c8f-7473-1dbd9f818157?version=1.0. Acesso em: 6 nov. 2023.
- SOUTO, Judite Paiva. “Uma vasta caieira”: um estudo sobre os fabricantes de cal da Freguesia da Ilha do Governador (1861-1900). Dissertação (Mestrado em História Social) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2015.
- VITA, Soraya; LUNA, Fernando J.; TEIXEIRA, Simonne. Descrições de técnicas da química na produção de bens de acordo com os relatos dos naturalistas viajantes no Brasil colonial e imperial. *Química Nova*, v. 30, n. 5, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422007000500055>.