

## ALICERCE: PLATAFORMA INTELIGENTE E MULTIMODAL PARA GESTÃO INTEGRADA DE OBRAS

TIAGO DOS SANTOS MARTINS<sup>1</sup>; KAIO MURILO<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Engenheiro Ambiental e Engenheiro de Segurança do Trabalho, Dracena-SP, e-mail: tiago@compia.tech;  
<sup>2</sup>[formação profissional], [instituição], [cidade-UF], e-mail: kaio murilo29@gmail.com.

**RESUMO:** A transformação digital da construção civil exige integrar dados de campo, planejamento, materiais e custos. Este trabalho apresenta o Alicerce, plataforma B2B multi-tenant para gestão integrada de obras, concebida para capturar dados no canteiro e transformá-los em informação rastreável para decisão de engenharia. A solução combina aplicação web/PWA offline-first, backend serverless, PostgreSQL com segurança em nível de linha, mídia georreferenciada, Captura Guiada, processamento multimodal e arquitetura multiagente em operação. Agentes como Agente Orçamentista, Agente Fiscal de Medição, Agente Almoxarife, Agente de Planejamento e Agente de Segurança do Trabalho atuam com dados da própria obra e referências técnicas, normativas e legais aplicáveis. Foram implementados módulos de obras, RDO, medição de materiais e serviços, estoque, financeiro e KPIs. Como prova de integração, implementou-se o Índice de Aderência de Consumo (IAC), que reconcilia orçamento, avanço medido e consumo. Em Monte Carlo, IAC>1,10 apresentou 2,5% de falso alarme sob variabilidade semanal de 5% e detectou 87,9% dos sobreconsumos sustentados de 20%, alcançando 99,8% em 25%. Os resultados indicam viabilidade da arquitetura, limitada por validação em cenários controlados.

**PALAVRAS-CHAVE:** canteiro digital; sistemas multiagentes; rastreabilidade; operação offline; reconciliação de dados.

## ALICERCE: INTELLIGENT AND MULTIMODAL PLATFORM FOR INTEGRATED CONSTRUCTION MANAGEMENT

**ABSTRACT:** The digital transformation of construction requires integration of field, planning, material and cost data. This paper presents Alicerce, a multi-tenant B2B platform for integrated construction management designed to capture jobsite data and transform them into traceable information for engineering decisions. The solution combines an offline-first web/PWA application, serverless backend, PostgreSQL row-level security, georeferenced media, Guided Capture, multimodal processing and an operational multi-agent architecture. The Budgeting Agent, Measurement Inspector Agent, Warehouse Agent, Planning Agent and Occupational Safety Agent operate with project-specific data and applicable technical, regulatory and legal references. Modules for projects, daily site reports, material and service measurement, inventory, finance and KPIs were implemented. As proof of integration, the Consumption Adherence Index (CAI) reconciles budgeted quantities, measured progress and consumption. In Monte Carlo simulation, CAI>1.10 produced a 2.5% false-alarm rate under 5% weekly variability and detected 87.9% of sustained 20% overconsumption cases, reaching 99.8% at 25%. Results support the feasibility of the architecture, limited to controlled validation scenarios.

**KEYWORDS:** digital jobsite; multi-agent systems; traceability; offline operation; data reconciliation.

## INTRODUÇÃO

A gestão de uma obra exige articulação entre planejamento, produção, suprimentos, medições, registros de campo e controle financeiro. Quando esses dados permanecem dispersos entre planilhas, mensagens e documentos, cresce o esforço de consolidação e diminui a capacidade de perceber desvios durante a execução. A medição sistemática do desperdício e da variabilidade de materiais é relevante para compreender o desempenho do processo construtivo (FORMOSO et al., 2002).

A digitalização amplia a capacidade de registrar e relacionar eventos. Na construção, técnicas de inteligência artificial vêm sendo aplicadas à detecção de padrões, previsão e otimização, mas dependem da disponibilidade e qualidade dos dados (PAN; ZHANG, 2021). Métodos de acompanhamento físico-financeiro também reforçam a necessidade de confrontar realizado e planejado para apoiar decisões gerenciais (CZEMPLIK, 2014).

Neste contexto, foi desenvolvido o Alicerce, uma plataforma cuja premissa é capturar a informação na origem e mantê-la vinculada à obra, frente de serviço, autor e momento do registro. Sua arquitetura reúne operação offline, sincronização, controle de acesso multi-tenant, mídia georreferenciada, processamento multimodal, captura orientada, integração entre módulos e agentes especialistas. A especialização não decorre apenas do modelo de IA: cada agente recebe o contexto daquela obra, seus registros e evidências e, quando pertinente, as referências técnicas, normas e requisitos legais aplicáveis ao domínio analisado.

O objetivo deste trabalho é apresentar a arquitetura tecnológica embarcada no Alicerce, descrever seus módulos e demonstrar como captura multimodal, agentes especialistas e integração analítica transformam dados de campo em informação contextualizada. Como evidência quantitativa dessa integração, apresenta-se uma aplicação experimental de reconciliação entre orçamento, medição física e consumo de materiais. Não se pretende, neste estágio, demonstrar redução de custos, desperdícios ou prazos em obra real.

## MATERIAL E MÉTODOS

O estudo possui natureza aplicada e foi conduzido como desenvolvimento tecnológico com verificação funcional em produção e experimento controlado. A implementação foi organizada em cinco camadas: infraestrutura, captura, operação, análise e inteligência. Nesta última, agentes de diferentes domínios utilizam um mecanismo comum de execução, porém com contexto, referências e contratos de saída próprios. Foram tratados como resultados apenas componentes implementados no produto ou no experimento versionado. A organização dessas camadas e o fluxo dos dados são apresentados na Figura 1.

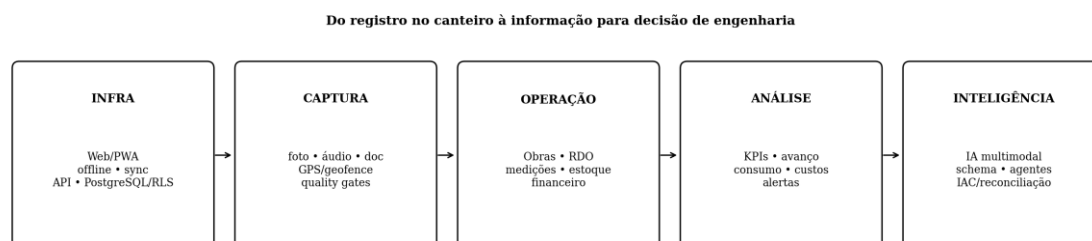


Figura 1: Arquitetura tecnológica e fluxo de dados do Alicerce.

Fonte: Elaborado pelos Autores, 2026.

Na infraestrutura, o front-end foi desenvolvido em React/Vite, com suporte PWA e base móvel por Capacitor. O modo offline usa IndexedDB/Dexie com sincronização posterior. O backend serverless utiliza Edge Functions em Deno/Hono e PostgreSQL; políticas de Row Level Security (RLS) isolam dados por organização e obra na própria camada de banco.

A camada operacional integra cadastro de Construtoras e Obras, RDO digital, medição de materiais, medição de serviços, estoque, financeiro por obra e KPIs. Os registros são associados à obra ativa e, quando aplicável, à frente de serviço, permitindo reutilização do dado entre processos e formando o contexto operacional da camada de inteligência.

A camada de captura recebe imagem, áudio e documentos e registra, quando disponível, obra, frente, autor, data/hora e GPS. A Captura Guiada orienta a fotografia e aplica verificações preliminares de borrão, luminosidade, reflexo e enquadramento. O piloto foi integrado à medição de materiais para captura de nota fiscal, com persistência de GPS e geofence. Os limiares dos quality gates ainda requerem calibração em dispositivos físicos e não são tratados como critérios validados.

Na camada de inteligência, o Alicerce utiliza arquitetura multiagente com especialistas integrados aos processos da obra: Agente Orçamentista, Agente de Compras e Suprimentos, Agente Almoxarife, Agente Fiscal de Medição, Agente de Qualidade, Agente de Segurança do Trabalho, Agente de RDO, Agente de Resíduos, Agente de Planejamento, Agente Financeiro e Agente Gerente. Cada agente utiliza o contexto da obra e da frente de serviço - registros, documentos, evidências, medições, orçamento e estoque - e as normas, requisitos legais e referenciais técnicos aplicáveis ao domínio. As saídas estruturadas são validadas por schema, com degradação controlada em caso de falha. O Agente Gerente consolida informações dos especialistas para relacionar eventos entre módulos. A decisão de engenharia e a responsabilidade técnica permanecem humanas. A Tabela 1 sintetiza as principais camadas tecnológicas.

**Tabela 1: Tecnologias embarcadas e função operacional.**

| Camada tecnológica                    | Função no sistema                                                                                                                                                    |
|---------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Offline-first + sincronização         | Mantém coleta e registro no canteiro mesmo com conectividade instável e sincroniza posteriormente.                                                                   |
| PostgreSQL + RLS multi-tenant         | Isola dados por organização/obra na própria camada de banco e sustenta a rastreabilidade dos registros.                                                              |
| Mídia + GPS/geofence                  | Vincula evidências ao local, obra, frente, autor e momento da captura.                                                                                               |
| Agentes especialistas + IA multimodal | Processa áudio, imagem e documentos no contexto da obra e do domínio técnico, com referências normativas/legais aplicáveis, saída estruturada e fallback controlado. |
| Integração analítica                  | Combina orçamento, medição, estoque e financeiro para produzir KPIs, alertas e reconciliações.                                                                       |

Fonte: Elaborado pelos Autores, 2026.

Como prova de integração entre módulos, implementou-se o mecanismo  $\text{Orçado} \times \text{Medido} \times \text{Consumido}$ . Para cada frente e insumo:  $\text{CE} = \text{QO} \times (\text{AM}/100) \times (1 + \text{PE}/100)$ , em que CE é o consumo esperado, QO a quantidade orçada, AM o avanço medido e PE a perda esperada;  $\text{IAC} = \text{CR}/\text{CE}$ , sendo CR o consumo real acumulado. O avanço prioriza boletins aprovados/pagos e o consumo corresponde às saídas de estoque da frente. No experimento, QO foi parametrizada a partir de referências adaptadas do SINAPI (CAIXA; IBGE, 2026), enquanto

PE permaneceu parâmetro explícito, sem caráter normativo, considerando a relevância das perdas de materiais no controle da produção (FORMOSO et al., 2002).

Adotaram-se os limiares:  $IAC < 0,75$  (subconsumo),  $0,75 \leq IAC \leq 1,10$  (OK),  $1,10 < IAC \leq 1,25$  (alerta) e  $IAC > 1,25$  (crítico). O caso ponta a ponta utilizou a frente “Alvenaria de Vedação - Torre A”, dez boletins semanais de 8% e três insumos: bloco cerâmico (QO=10.000 un; PE=10%), argamassa (QO=6.000 kg; PE=15%) e areia (QO=12 m<sup>3</sup>; PE=10%). As saídas semanais receberam variação aleatória limitada a  $\pm 3\%$ , semente 42. A sensibilidade foi avaliada por Monte Carlo (2.000 execuções/cenário; semente 42), com ruído normal de média 1,0, truncado inferiormente em 0,5, e  $\sigma$  de 3%, 5% e 8%. Em H1, sobreconsumos de 5% a 30% iniciaram na semana 5; em H2, o avanço foi inflado em 10%, 20% e 30%.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A implementação resultou em plataforma operacional com infraestrutura própria e módulos centrais de gestão integrados. O usuário seleciona uma obra ativa e registra RDO, medições, movimentações de materiais, lançamentos financeiros e indicadores dentro da mesma hierarquia. A arquitetura offline-first mantém dados locais e sincronizáveis, enquanto o RLS restringe o acesso por organização. Na camada de inteligência, os agentes especialistas operam com contexto da obra e de seus respectivos domínios, apoiados por infraestrutura de transcrição de áudio, armazenamento de mídia, processamento multimodal, autenticação, isolamento entre organizações, validação de saída estruturada e fallback controlado.

A Captura Guiada foi aplicada à medição de materiais. A fotografia de nota fiscal passou a ser realizada no componente de captura, preservando o processamento existente e acrescentando GPS e situação do geofence. O arquivo passa, assim, a carregar contexto de obra, local e momento, reutilizável pelo agente especialista e por processos subsequentes. Como a calibração dos limiares de qualidade em Android/iOS reais ainda não foi concluída, não se atribui a esses gates desempenho de campo validado.

A reconciliação demonstrou a capacidade de transformar registros de três módulos em um indicador de engenharia. No estudo ponta a ponta, o bloco cerâmico, com +20% de sobreconsumo desde a semana 5, retornou  $IAC=1,119$  (Alerta); a argamassa, controle sem desvio,  $IAC=0,991$  (OK); e a areia, sem apontamento de consumo desde a semana 3,  $IAC=0,200$  (Subconsumo). A Tabela 2 resume os resultados. O último caso mostra que  $IAC$  baixo pode indicar falha de registro ou avanço incompatível, e não necessariamente economia.

**Tabela 2: Resultado ponta a ponta da reconciliação no produto.**

| Insumo         | Condição experimental          | IAC final | Status     |
|----------------|--------------------------------|-----------|------------|
| Bloco cerâmico | +20% desde semana 5            | 1,119     | Alerta     |
| Argamassa      | Sem desvio (controle)          | 0,991     | OK         |
| Areia          | Sem apontamento desde semana 3 | 0,200     | Subconsumo |

Fonte: Elaborado pelos Autores, 2026.

Em H0, o falso alarme para  $IAC > 1,10$  foi de 0,0%, 2,5% e 12,1% para  $\sigma$  de 3%, 5% e 8%. Em H1 ( $\sigma=5\%$ ), a detecção foi de 2,7% (+5%), 3,0% (+10%), 30,4% (+15%), 87,9% (+20%), 99,8% (+25%) e 100,0% (+30%), com atraso mediano de três semanas em +20% e duas a partir de +25%. As taxas de +5% e +10% ficaram próximas ao falso alarme de 2,5%, indicando que, neste cenário, desvios de até 10% não foram distinguíveis da variabilidade normal.

Esses percentuais não representam acurácia em obras reais. O conjunto sintético não reproduz transferências de estoque, mudanças de projeto, atrasos de lançamento, retrabalho ou variações de produtividade. A associação dos três vértices usa atualmente o rótulo textual da frente (work\_front\_label), sujeito a divergências de nomenclatura em escala e, portanto, dependente de futura chave canônica. Em H2, a detecção por subconsumo foi de 0,0%, 2,5% e 47,1% para avanço inflado em 10%, 20% e 30%. O desempenho do limiar inferior de 0,75 confirma que o IAC não deve ser usado isoladamente para medição superestimada e justifica testar limites alternativos combinados a evidências independentes de avanço.

A principal contribuição do experimento não é um limiar universal, mas a interoperabilidade interna: orçamento, medição e estoque, quando corretamente vinculados à mesma obra e frente, produzem um novo indicador de engenharia. O mesmo princípio sustenta os agentes especialistas, que combinam fontes dentro de contexto técnico definido. Como extensão, propõem-se IAC incremental, evidência fotográfica de avanço, chave canônica de frente e inclusão de mão de obra.

## CONCLUSÃO

O Alicerce demonstrou a viabilidade de uma arquitetura integrada para gestão de obras, combinando módulos operacionais, funcionamento offline, sincronização, segurança multi-tenant, mídia georreferenciada, processamento multimodal e arquitetura multiagente com agentes especialistas contextualizados. A tecnologia embarcada mantém vínculo entre dado, obra, frente, autor, localização e histórico, permitindo que cada agente opere dentro de um domínio definido e considere referências técnicas, normativas e legais aplicáveis ao processo.

O IAC mostrou que orçamento, medição e estoque podem gerar alertas de divergência. Sob variabilidade semanal simulada de 5%, o limiar superior manteve falso alarme de 2,5% e detectou 87,9% dos sobreconsumos sustentados de 20%. Os resultados restringem-se a cenários controlados. Como continuidade, indicam-se validação em canteiros, calibração cross-device da Captura Guiada, chave canônica de frente e ampliação para mão de obra, resíduos e evidências independentes de avanço.

## REFERÊNCIAS

- CAIXA ECONÔMICA FEDERAL; IBGE. SINAPI - Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil. 2026.
- CZEMPLIK, A. Application of Earned Value Method to Progress Control of Construction Projects. *Procedia Engineering*, v. 91, p. 424-428, 2014. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.12.087.
- FORMOSO, C. T.; SOIBELMAN, L.; DE CESARE, C.; ISATTO, E. L. Material Waste in Building Industry: Main Causes and Prevention. *Journal of Construction Engineering and Management*, v. 128, n. 4, p. 316-325, 2002. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9364(2002)128:4(316).
- PAN, Y.; ZHANG, L. Roles of artificial intelligence in construction engineering and management: A critical review and future trends. *Automation in Construction*, v. 122, 103517, 2021. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103517.