PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS

ESCOLA POLITÉCNICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU EM SISTEMAS DE INFRAESTRUTURA URBANA

FELIPE RIBEIRO TAKAHASHI

CONCRETOS AUTO-ADENSÁVEIS COM AGREGADOS LEVES E NÃO CONVENCIONAIS: DESEMPENHO FÍSICO E MECÂNICO

CAMPINAS
2025

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS

ESCOLA POLITÉCNICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO STRICTO SENSU EM SISTEMAS DE INFRAESTRUTURA URBANA

CONCRETOS AUTO-ADENSÁVEIS COM AGREGADOS LEVES E NÃO CONVENCIONAIS: DESEMPENHO FÍSICO E MECÂNICO

Texto apresentado para defesa de Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana da Escola Politécnica, da Pontifícia Universidade Católica de Campinas.

Orientadora: Profª. Drª. Lia Lorena Pimentel

CAMPINAS
2025

Sistema de Bibliotecas e Informação - SBI
Gerador de fichas catalográficas da Universidade PUC-Campinas
Dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Takahashi, Felipe Ribeiro

T136c CONCRETOS AUTO-ADENSÁVEIS COM AGREGADOS LEVES E NÃO CONVENCIONAIS : DESEMPENHO FÍSICO E MECÂNICO / Felipe Ribeiro Takahashi. - Campinas: PUC-Campinas, 2025.

102 f.

Orientador: Lia Lorena Pimentel.

Dissertação (Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana) - Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana , Escola Politécnica, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2025.
Inclui bibliografia.

1. Concreto auto adensável. 2. Agregados não convencionais. 3. Condutividade térmica. I. , . II. , . III. Pimentel, Lia Lorena. IV. Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Escola Politécnica. Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana . V. Título

FELIPE RIBEIRO TAKAHASHI

Concretos Auto-Adensáveis com Agregados Leves e Não Convencionais: Desempenho Físico e Mecânico

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana, da Escola Politécnica, da Pontifícia Universidade Católica de Campinas, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Sistemas de Infraestrutura Urbana.
Área de Concentração: Sistemas de Infraestrutura Urbana.
Orientador (a): Profa. Dra. Lia Lorena Pimentel

Dissertação defendida e aprovada em 24 de outubro de 2025 pela Comissão Examinadora constituída dos seguintes professores:

Profa. Dra. Lia Lorena Pimentel
Orientador da Dissertação e Presidente da Comissão Examinadora
Pontifícia Universidade Católica de Campinas

Profa. Dra. Claudia C. Pezzuto
Pontifícia Universidade Católica de Campinas

Rosa C C Lintz

Profa. Dra. Rosa C. C. Lintz
UNICAMP - FT

DEDICATORIA

Dedico o trabalho ao meu pai Pedro Miyoshi Takahashi, por todo apoio na minha educação e pelos sacrifícios que fez para que eu conseguisse chegar a este momento.

Gostaria também de dedicar e agradecer a minha mãe Maria Cecilia Ribeiro Takahashi, que sempre insistiu na minha formação e se dedicou ao máximo em tudo que fez por mim.

A minha Tia Rita de Cassia Ribeiro da Silva, minha segunda mãe, pela dedicação para comigo, me ensinando o básico da minha formação acadêmica.

AGRADECIMENTO

Para a conclusão deste trabalho foi necessário muito esforço, muitas horas de dedicação e ajuda, nada seria possível sem ajuda e compreensão das pessoas a minha volta.

Primeiramente agradeço a minha orientadora, Professora Doutora Lia Lorena Pimentel pelo incentivo na continuidade do meu estudo, pelo tempo e disposição e orientação dados a mim, por cada contribuição, sugestão e correção.

Aos técnicos de laboratórios da PUC-Campinas Diogo Rodrigues de Bonfim e Igor Citrângulo.

A Professora Doutora Diana Cristina Gonzalez Gonzalez pelas sugestões, auxílio e aprendizado que obtive durante a confecção do equipamento.

Ao senhor Edson Pereira da Silva pelo auxílio técnico na construção do equipamento.

Ao meu amigo Marlon Marcos Lobo Pereira e ao meu irmão Rodrigo Ribeiro Takahashi pelo auxílio na confecção dos traços de concreto e ensaios em estado fresco.

Aos meus chefes, Fabio Borioli Yancovitz e Jairo Yancovitz pela compreensão e flexibilidade no horário de trabalho que me permitiram conduzir os estudos.

RESUMO

Nos últimos anos, verifica-se um aumento expressivo na adoção do sistema construtivo em paredes de concreto, com o emprego do concreto autoadensável (CAA), que proporciona maior uniformidade, qualidade de acabamento e eficiência executiva. Contudo, essa tecnologia impõe o desafio de atender aos requisitos de desempenho térmico. Nesse contexto, a incorporação de materiais e soluções que reduzam a condutividade térmica do concreto constitui estratégia relevante para aprimorar o desempenho térmico global das edificações, contribuindo para a eficiência energética, a sustentabilidade urbana e o atendimento aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 3, 9, 11, 12, 13 e 15), ao proporcionar ambientes mais saudáveis, confortáveis e ambientalmente responsáveis. Este estudo investiga o uso de CAA com substituição parcial de agregados convencionais por reciclados mistos, resíduos cerâmicos e argila expandida, visando aprimorar as propriedades térmicas e mecânicas do material. A metodologia envolveu a caracterização dos materiais, formulação de diferentes misturas com substituições em diversas proporções e a realização de ensaios de condutividade térmica pelo método da placa quente protegida, em conformidade com a norma ISO 8302, além de análises de resistência mecânica, massa específica e absorção de água. Os resultados indicam redução da condutividade térmica nos traços com agregados leves/cerâmicos e efeito dependente da heterogeneidade do agregado reciclado misto, confirmando correlação inversa entre densidade, porosidade e condutividade; as evidências obtidas são suficientes para orientar decisões de dosagem e projeto com foco em conforto térmico e eficiência energética, preservando a aderência aos requisitos normativos aplicáveis às paredes de concreto. Apesar de não ter reduzido significativamente a condutividade térmica em relação ao traço referência, o traço com substituição de 75% de louça sanitária foi tecnicamente validado quanto às características físicas de um CAA, sendo que sua resistência a 28 dias não apresentou variância significativa, mostrando possível aplicação em placas paredes.

Palavras-chave: Concreto leve auto-adensável; Agregados leves; Condutividade térmica; materiais não convencionais; caracterização do concreto

ABSTRACT

In recent years, there has been a significant increase in the adoption of the concrete wall construction system, particularly with the use of self-compacting concrete (SCC), which provides greater uniformity, surface quality, and execution efficiency. However, this technology presents the challenge of meeting thermal performance requirements. In this context, the incorporation of materials and solutions that reduce the thermal conductivity of concrete constitutes a relevant strategy to improve the overall thermal performance of buildings, contributing to energy efficiency, urban sustainability, and compliance with the Sustainable Development Goals (SDGs 3, 9, 11, 12, 13 and 15), by promoting healthier, more comfortable, and environmentally responsible environments. This study investigates the use of SCC with partial replacement of conventional aggregates by mixed recycled aggregates, ceramic waste, and expanded clay, aiming to improve the thermal and mechanical properties of the material. The methodology included material characterization, formulation of different mixtures with various substitution ratios, and thermal conductivity testing using the guarded hot plate method in accordance with ISO 8302, as well as mechanical strength, density, and water absorption analyses. The results indicate a reduction in thermal conductivity for mixtures containing lightweight or ceramic aggregates, and a dependency on the heterogeneity of the mixed recycled aggregate. An inverse correlation between density, porosity, and conductivity was confirmed. The findings provide sufficient evidence to support mix design and construction decisions focused on thermal comfort and energy efficiency while maintaining compliance with normative requirements applicable to concrete wall systems. Although thermal conductivity was not significantly reduced compared to the reference mix, the mixture with 75% sanitary ware substitution was technically validated regarding SCC physical characteristics, and its 28-day compressive strength showed no significant variance, indicating potential applicability in wall panels.

Keywords: Lightweight self-compacting concrete; Lightweight aggregates; Thermal conductivity; Non-conventional materials; Concrete characterization.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ensaios usuais para aferição das características físicas essenciais de um CAA: 24

Tabela 2 - Desempenho de concretos produzidos com resíduo cerâmico: 31

Tabela 3 - Trabalhos que pesquisaram sobre condutividade térmica de concretos com substituição de agregados graúdo:..... 46

Tabela 4 - Métodos de medição e características:..... 47

Tabela 5 - Procedimentos ABNT para caracterização dos agregados: 50

Tabela 8 - Resultados das características físicas dos agregados finos:..... 51

Tabela 9 - Resultados das características físicas dos agregados graúdos: 52

Tabela 6 - Nomenclatura e traços:..... 52

Tabela 7 - Normas para ensaios em estado endurecido: 53

Tabela 10 - Traço referência em massa para 1 metro cúbico:..... 54

Tabela 11 - Traços corrigidos para cada amostra:..... 54

Tabela 12 - Quantidade de corpos de prova para ensaios na primeira etapa:. 55

Tabela 13 - Litros para ensaios de cada traço em estado fresco:..... 56

Tabela 14 - Quantitativo de corpos de prova para cada traço: 56

Tabela 15 - Classificação da viscosidade plástica aparente sob fluxo livre: 66

Tabela 16 - Classificação de índice de estabilidade visual sob fluxo livre: 66

Tabela 17 - Resultados do ensaio slump flow T500: 67

Tabela 18 - Absorção d'água e massa específica: 68

Tabela 19 - ANOVA: Massa específica:..... 69

Tabela 20 - ANOVA: Absorção d'água: 69

Tabela 21 - Resistência a compressão axial em 3 dias: 70

Tabela 22 - Resistencia a compressão axial em 28 dias: 71

Tabela 23 - Modulo de elasticidade: 73

Tabela 24 - Resultados do ensaio slump flow T500 (segunda etapa): 76

Tabela 25 - Classificação do ensaio Caixa L: 77

Tabela 26 - Resultados do ensaio Caixa L: 77

Tabela 27 - Classes de habilidade passante do CAA em função de sua aplicação: 78

Tabela 28 - Classificação do ensaio Coluna de segregação: 79

Tabela 29 - Resultados do ensaio de Coluna de segregação:..... 79

Tabela 30 - Absorção d'água e massa específica: 80

Tabela 31 - Resistencia a compressão axial em 3 e 28 dias: 81

Tabela 32 - Modulo de elasticidade: 83

Tabela 33 - Condutividade térmica: 84

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo concretagem placa 12

Figura 2 - Ponte akashi-kaikyo e concretagem de radier 20

Figura 3 - Ensaios com normas vigentes para aferição das características do CAA: 23

Figura 4 - Formas para sistema placa parede 27

Figura 5 - Diferentes métodos de medição de condutividade térmica do concreto: 44

Figura 6 - Gráfico granulométrico dos agregados finos: 50

Figura 7 - Gráfico granulométrico dos agregados graúdos: 51

Figura 8 - Representação da placa quente protegida: 57

Figura 9 - Representação da placa quente em centímetros: 59

Figura 10 - Representação da placa fria em centímetros: 61

Figura 11 – (a) Equipamento placa quente (b) Placa quente e disposição dos termopares (c) parte frontal do equipamento (d) disposição dos conjuntos de termopares para cada placa: 62

Figura 12 - Slump flow T500 dos traços (a) 50-ARGEX e (b) 75-ARGEX: 68

Figura 13 - Crescimento da resistência ao longo dos dias: 72

Figura 14 - Slump flow T500 dos traços (a) 0-REF e (b) 75-ARGEX: 77

Figura 15 - Crescimento da resistência ao longo dos dias: 82

Figura 16 - Configuração dos pinos virtuais 99

Figura 17 - interface final do software: 100

Sumário

1.INTRODUÇÃO 12

1.1.OBJETIVO GERAL 15

1.1.1.Objetivo específico 15

2.SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL 16

3.CONCRETO AUTOADENSÁVEL 18

3.1.ENSAIOS FUNDAMENTAIS PARA CARACTERIZAÇÃO DO CAA NO ESTADO PLÁSTICO 22

4.TÉCNICAS APLICADAS A CONSTRUÇÃO CIVIL PARA MITIGAR IMPACTOS AMBIENTAIS 26

4.1.1. Agregado de louça sanitária 31

4.1.2. Agregado reciclado misto 34

4.1.3. Argila expandida 38

6.METODOLOGIA 49

6.1.DELINEAMENTO EXPERIMENTAL 49

6.1.1. caracterização dos agregados 49

6.1.2. Concreto auto adensável – proporção de mistura 52

6.2.DESENVOLVIMENTO DO EQUIPAMENTO PARA DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA 57

6.3.CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO EQUIPAMENTO PARA MEDIÇÃO DE CONCRETO 62

6.4.ANÁLISE DOS RESULTADOS 65

7.RESULTADOS 66

7.1.RESULTADOS DA PRIMEIRA ETAPA 66

7.2.CONCLUSÃO DA PRIMEIRA ETAPA 74

7.3.RESULTADOS DA SEGUNDA ETAPA 75

8.CONCLUSÃO 86

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 88

APÊNDICE A 99

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho situa-se no escopo de melhorar o padrão das edificações e do ambiente urbano no qual se inserem, por meio do estudo, análise e proposição de construções sustentáveis, incorporando as questões do reaproveitamento dos resíduos sólidos, da utilização de materiais alternativos, inovadores e não convencionais aplicados à construção civil, e do conforto térmico. Essa diretriz é também coerente com a Agenda 2030, especialmente com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável 3, 9, 11, 12, 13 e 15 ao promover ambientes construídos mais salubres, eficientes e resilientes, que reduzam impactos ambientais e contribuam para a qualidade de vida nas cidades.

Devido à grande competição no mercado imobiliário, impulsionada pela crescente valorização dos terrenos nas principais áreas urbanas e pelo déficit habitacional, desenvolveu-se o modelo de construção de paredes de concreto, também conhecido como "moldagem em caixão", muito utilizado para construção de conjuntos habitacionais, pois método permite uma construção mais rápida, eficiente e econômica, atendendo à demanda por empreendimento ao mesmo tempo em que otimiza o espaço disponível (Gonçalves *et al*., 2013).

O método das placas paredes é executado utilizando formas metálicas para a produção de paredes maciças de espessura em torno de 15 cm (Figura 1), isso demanda o uso do CAA que pode fluir entre espaços com elevadas obstruções, este método é considerado uma das grandes revoluções na tecnologia do concreto para a construção nas últimas décadas.

Figura 1 - Processo concretagem placa



Fonte: Geoplast (esquerda); Formwork (direita)

Nas últimas décadas o setor de construção reconheceu a importância dos gastos de recursos naturais limitados, como os agregados finos e grossos, frequentemente utilizados na criação de estruturas, sendo assim, estudos foram conduzidos para explorar a utilização de agregados reciclados provenientes de resíduos industriais ou de demolição, visando preservar os recursos naturais. Em vez de depender exclusivamente de recursos naturais, os pesquisadores estão direcionando seus esforços para a utilização de resíduos reciclados (Kumar; Pasla; Saravanan, 2023).

Essa prática não apenas atende às necessidades de construção, mas também ajuda a preservar o meio ambiente e a promover uma economia circular, em que os resíduos são vistos como recursos valiosos. É um exemplo notável de como a pesquisa e a inovação podem desempenhar um papel fundamental na promoção da sustentabilidade na indústria da construção civil.

O panorama mais recente indica que o Brasil gerou cerca de 44 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição (RCD) em 2023, mantendo a pressão sobre infraestrutura urbana e ecossistemas e reiterando a urgência de soluções que privilegiem prevenção, segregação na origem, rastreabilidade e reintrodução de materiais no ciclo produtivo, especialmente quando o objetivo é conciliar produtividade, desempenho e redução de impactos no envelope térmico das edificações (ABREMA, 2023).

Inserida nesse horizonte, a técnica de placa-parede torna-se plataforma propícia para padronizar fluxos, controlar perdas e especificar insumos com qualidade mensurável, aproximando a gestão de resíduos das metas dos ODS 11 e 12 e do regime de desempenho (Nascimento; Morais; Lopes, 2022; ABREMA, 2023).

Quando a cadeia logística inclui triagem, beneficiamento e uso de agregados reciclados em traços de concreto com ênfase em CAA para viabilizar ciclos rápidos e acabamento superior, os ganhos deixam de ser retóricos: reduzem-se extrações primárias, encurta-se o balanço de materiais e abre-se espaço para calibrar massa específica e condutividade térmica (λ) sem sacrificar requisitos estruturais e de durabilidade. A literatura recente no país evidencia que a efetividade desse caminho depende de caracterização rigorosa (pureza, granulometria, absorção, compatibilidade química) e de governança reológica na

dosagem do CAA, sob pena de converter “resíduo” em variável de risco em vez de ativo de desempenho. Em termos operacionais, o sistema placa-parede com fôrmas e escoras metálicas reutilizáveis e alto grau de repetição oferece as condições de controle e repetitividade necessárias para que o reaproveitamento de materiais se traduza em obra, com métricas de consumo de água, energia e perdas acompanhando as decisões de traço e execução (Oliveira *et al*., 2020; Nascimento; Morais; Lopes, 2022).

Estudos sobre as propriedades do concreto usando agregados reciclados apontam que existe uma relação inversa entre porosidade do agregado e sua resistência, e que esta propriedade também tem influência em diversas propriedades do concreto produzido, entre elas, massa específica, resistência a compressão, absorção da água e módulo de elasticidade (Di Domenico *et al*., 2018; Silva; Brito, 2010).

A maior porosidade permite maior absorção de água do agregado produzido com resíduos de concreto e indicam o aumento desta característica física no concreto produzido com agregado reciclado, implicando no maior número de vazios o que demonstra maior facilidade de sofrer ataques por agentes agressivos que penetram no concreto, prejudicando assim, sua durabilidade (Rizzo, 2018).

Por outro lado, a maior porosidade implica em maior teor de ar, o que implica em menor massa específica e menor condutividade térmica (Castro; Peixoto, 2019; Marie, 2017).

Buscar melhorar as propriedades térmicas dos materiais, pode resultar em economia significativa no consumo de energia e redução das emissões de gases. E a reutilização de resíduos de construção na produção de concretos, minimizando o consumo de bens naturais, pode tornar viável a redução da condutividade térmica, frente a porosidade destes resíduos, no entanto, são poucos os trabalhos abordando as características de transmissão de calor de concretos produzidos com agregados reciclados cerâmicos e agregado reciclado misto (ARM).

O desenvolvimento econômico e social é muito importante no mundo inteiro, porém, com o crescimento desenfreado gera-se uma grande poluição

ambiental, visto que a construção civil tem grande impacto ambiental, desde a extração de matérias-primas, fabricação, transporte dos materiais, execução das obras e na geração de resíduos. A reciclagem dos resíduos de concreto e sua reutilização em novos concretos em forma de agregado permite a redução desses impactos (Araújo, 2020).

Os compósitos cimentícios tradicionais são amplamente utilizados na construção de edifícios, porém possuem uma condutividade térmica relativamente alta, dificultando o atendimento à norma de conforto térmico sem a utilização de um grande consumo de energia para a refrigeração e aquecimento do ambiente (Carvalho, 2017).

Com o crescimento da população e a demanda por edifícios com diversas finalidades, o aumento do consumo de energia e da emissão de gases de efeito estufa é constatado ano após ano (Herling, 2025).

Sendo assim, esse trabalho visa responder ao seguinte questionamento “A substituição de agregados convencionais por agregados reciclados de menor massa específica, contribuem para a redução da condutividade térmica do concreto?”

1.1. Objetivo geral

O objetivo deste projeto é analisar as possíveis influências da substituição dos agregados convencionais por agregados reciclados e agregado leve nas propriedades físicas e mecânicas de concretos.

1.1.1. Objetivo específico

- Avaliar concretos produzidos com substituições de 25%, 50% e 75% de agregado convencional por argila expandida, agregado reciclado misto e resíduos de louça sanitária;
- Avaliar a condutividade de concretos produzidos com agregado reciclado misto (ARM), agregado reciclado cerâmico e argila expandida;
- Confecção do equipamento placa quente protegida.

2. SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL

A construção civil desempenha papel central no desenvolvimento urbano, mas também é responsável por elevado consumo de recursos naturais e significativa geração de resíduos. Nesse cenário, a busca por materiais sustentáveis e técnicas construtivas inovadoras surge como estratégia essencial para reduzir impactos ambientais, aumentar a eficiência energética e promover o uso racional de recursos (UNEP, 2024).

Soluções como a incorporação de resíduos em novos materiais, o desenvolvimento de concretos de baixo impacto, sistemas construtivos industrializados e o aproveitamento de tecnologias que ampliem a durabilidade das edificações contribuem não apenas para a mitigação de impactos ambientais, mas também para ambientes mais saudáveis e confortáveis (Guessoum; Boukhelf; Khadraoui, 2023).

Tais iniciativas estão diretamente alinhadas a ODS 9 (Indústria, inovação e infraestrutura), ao introduzir possíveis inovações aos meios construtivos, a ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis), ao apoiar a criação de espaços urbanos mais inclusivos, resilientes e sustentáveis, a ODS 12 (Consumo e produção responsáveis) ao gerar uma economia cíclica.

Indiretamente pode auxiliar na ODS 3 (Saúde e bem-estar) promovendo espaços mais saudáveis e confortáveis, a ODS 13 (Ação contra a mudança global do clima) promovendo ações mais sustentáveis na construção e ODS 15 (Vida terrestre) reduzindo degradação para captação de matéria prima.

A compreensão contemporânea de sustentabilidade na construção civil desloca o foco de soluções pontuais para uma leitura sistêmica do ciclo de vida do edifício, na qual decisões de projeto, materiais e processos de canteiro se articulam a metas ambientais, econômicas e sociais. Nesse horizonte, a técnica de placa-parede de concreto surge como um arranjo produtivo que, ao industrializar etapas em obra, cria condições para incorporar materiais não convencionais e resíduos com rastreabilidade e controle, aproximando o setor das diretrizes de cidades e comunidades sustentáveis e de padrões responsáveis de produção e consumo (Dantas, 2024).

O ponto de partida, é reconhecer que métodos e tecnologias só fazem sentido quando mediados por critérios de desempenho e por um plano de gestão que reduza perdas, consuma menos recursos e gere menor volume de resíduos, sem comprometer a qualidade e a segurança (Nascimento; Morais; Lopes, 2022).

O desafio imediato, portanto, é duplo: fortalecer protocolos de caracterização e de dosagem que permitam a incorporação segura de resíduos em concretos e consolidar métricas de desempenho que conectem escolhas materiais a resultados térmicos, energéticos e de qualidade do ar interior.

3. CONCRETO AUTOADENSÁVEL

As demandas do mercado e as técnicas construtivas exigem variedades de concreto com características especiais, como alta resistência, alto desempenho, alto adensamento, incorporação de fibras, altos teores de adições pozolânicas, acabamento aparente, coloração, brancura e sustentabilidade, entre outras. Em resposta a essa demanda crescente, houve um avanço significativo na tecnologia do concreto nas últimas décadas. Um exemplo deste avanço é o desenvolvimento do CAA no Japão em 1988. Esse tipo de concreto é capaz de se auto nivelar nas formas e preencher os espaços designados sem a necessidade de vibração ou compactação externa, representando uma evolução marcante na eficiência e na versatilidade dos materiais de construção (Tutikian; Molin, 2008).

O concreto autoadensável (CAA) surge como um divisor de águas na evolução das tecnologias de construção, rompendo com a dependência histórica de vibração mecânica para a obtenção de estruturas livres de vazios e descontinuidades. Ao dispensar recursos externos de adensamento, mensura-se sua eficácia por meio de três propriedades fundamentais: fluidez, habilidade passante e resistência à segregação, conforme define EFNARC (2002) e reitera Tutikan e Dal Molin (2008): “Um concreto só será considerado autoadensável se três propriedades forem alcançadas simultaneamente: fluidez, coesão necessária para que a mistura escoe intacta entre barras de aço (ou habilidade passante) e resistência à segregação” (Tutikan; Dal Molin, 2008).

Bertolani (2017, p. 13) enfatiza que desde a década de 90, onde o professor da Universidade de Tóquio, Sr. Okamura, passa a identificar que os concretos utilizados na época, são de baixo desempenho, trazendo diversas patologias, provenientes dos meios em que estão atuando, devido ao adensamento inadequado do material.

Uma das primeiras aplicações de grande impacto ocorreu na ponte Akashi-Kaikyo, inaugurada em 1998, no Japão, considerada até hoje um caso exemplar do uso do CAA em estruturas de grandes dimensões.

Bertolani (2017, p.13) menciona que a ponte “foi construída no Japão [...] simplesmente pela alta taxa de armadura, onde necessitavam de um concreto

eficaz, evitando erros de compactação", demonstrando a influência do fator construtivo na adoção do material.

Ainda no contexto japonês, a transição do chamado "concreto de alto desempenho" (*high performance concrete*) para o "concreto autoadensável", propriamente dito, envolveu um refinamento gradativo das propriedades de fluidez, coesão e resistência à segregação. Não se trata de uma inovação recente: ainda nos anos 1980 e 1990, pesquisadores e engenheiros buscavam respostas para dificuldades de adensamento em locais de alto congestionamento de armaduras, ao mesmo tempo em que se queriam eliminar patologias associadas à vibração inadequada das misturas (Zhu; Bartos, 2000).

A fluidez, entendida como a capacidade inerente da mistura em fluir sob ação exclusiva da gravidade, impõe um desafio de engenharia na dosagem de materiais. A correta proporção de finos, aditivos superplastificantes e modificadores de viscosidade estabelece o equilíbrio entre dispersão e retenção de água, evitando tanto a rápida segregação quanto a lentidão de escoamento. Nesse contexto, o emprego de ensaios como o slump-flow e o V-funnel torna-se imprescindível para calibrar a consistência e a viscosidade da pasta cimentícia antes da aplicação em campo (EFNARC, 2002).

Já a habilidade passante refere-se à aptidão do CAA para transpor densas armaduras sem gerar obstruções ou canais preferenciais de escoamento. O L-box, teste que simula condições próximas àquelas encontradas em estruturas armadas, permite aferir a mobilidade da massa em situações reais, assegurando que até radiers e lajes com elevado índice de armaduras recebam concretagem uniforme. A obtenção de valores de L-box adequados revela a eficácia do projeto de mistura em manter coesão durante o percurso por entre as barras de aço (Domone, 2006).

A resistência à segregação, por sua vez, compromete diretamente a homogeneidade microestrutural do concreto endurecido. Sob ação da gravidade, a mistura tende a separar-se, cedendo ao peso dos agregados graúdos que afundam na massa fluida. A introdução de agentes modificadores de viscosidade, como o Welan Gum, (goma Welan que é um exopolissacarídeo usado como modificador de reologia auxiliando na manutenção da integridade do sistema particulado, garantindo que a distribuição granulométrica permaneça

estável desde o lançamento até o início do processo de pega (Zhu; Bartos, 2003).

Além da qualidade intrínseca do CAA, destaca-se o impacto operacional no canteiro de obras. Bartos e Söderlind (2000) demonstraram que o ruído decorrente da concretagem autoadensável corresponde a cerca de 10% do nível sonoro gerado pelos vibradores convencionais, reduzindo riscos à saúde ocupacional e minimizando perturbações ambientais em espaços sensíveis. A eliminação de vibrações também diminui a pressão exercida sobre as fôrmas, prolongando sua vida útil e proporcionando economia nos custos de manutenção e substituição de cofragens.

Do ponto de vista projetual, o CAA alarga as fronteiras da criatividade arquitetônica e estrutural. Sua elevada deformabilidade permite preenchimento de moldes sinuosos, seções reduzidas e geometrias complexas que seriam impraticáveis com concretos convencionais. Exemplos internacionais, como a concretagem in loco de colunas curvas em edifícios de alto padrão, evidenciam a sinergia entre liberdade formal e excelência técnica proporcionada por esta tecnologia (Domone, 2006).

A Figura 2 demonstra obras que se utilizaram de concreto autoadensável em sua construção.

Figura 2 - Ponte akashi-kaikyo e concretagem de radier



Fonte: Awa Comercial



Fonte: Tagliani (2024).

Bertolani (2017, p. 15) traz exemplos práticos que reforçam a historicidade da aplicação do CAA, evidenciando “a construção de túneis no Japão e no Chile, a execução de barragens e até o reparo de estruturas antigas no Reino Unido”.

Bartos (2000, p. 1) destaca que “o emprego de concretos com características autoadensáveis em pontes mais antigas já era de grande valia, pois facilitava o preenchimento de seções estreitas e propiciava melhor durabilidade ao longo do tempo”.

Em sintonia, a ABNT NBR 15823 (2017) estabelece diretrizes que permitem caracterizar o CAA a partir de três requisitos essenciais: habilidade de preenchimento, habilidade passante e resistência à segregação.

Com esses isso bem definido, o concreto deixou de ser apenas “altamente fluido” para se tornar efetivamente autoadensável, o que implicou pesquisas conduzidas sobre a composição de aditivos, a escolha de agregados e a proporção de cimento (Tutikian; Dal Molin, 2008).

A introdução no Brasil, por sua vez, desenrolou-se em ritmo mais modesto. Nas décadas iniciais dos anos 2000, poucas construtoras investiam na adoção sistemática do CAA, em grande parte devido aos custos de aditivos, à falta de mão de obra treinada e ao desconhecimento geral sobre as potencialidades do material (Borja, 2011).

Como resultado, a tecnologia foi restrita, sobretudo, às indústrias de pré-moldados, onde a diminuição da vibração mecânica e o elevado nível de acabamento representavam claras vantagens competitivas.

No entanto, conforme Tutikian (2008), a difusão do CAA gradualmente se ampliou à medida que engenheiros e projetistas percebiam seus benefícios na redução de patologias e no acréscimo de produtividade.

Bertolani (2017, p. 14) explica que desde a concepção do conceito, a motivação técnica sempre esteve acompanhada de uma preocupação em resolver problemas práticos, como a falha de adensamento em elementos muito armados.

O crescimento da credibilidade técnica do CAA revelou, adicionalmente, seus impactos econômicos e sociais: a menor exigência de vibração reduz

problemas de ruído e, por consequência, melhora as condições de trabalho no canteiro de obras (Tutikian; Dal Molin, 2008).

Ainda que alguns autores, como Ho *et al.* (2001), ressaltem o risco de encarecimento do CAA em função do uso intensivo de aditivos superplastificantes, em muitas situações o custo total acaba compensado pela redução de mão de obra e pela mitigação de patologias futuras.

Portanto, a história do concreto autoadensável se relaciona com a busca por durabilidade e qualidade superior, objetivos centrais de uma engenharia civil mais sustentável e econômica (Okamura; Ouchi, 2003).

3.1. Ensaios fundamentais para caracterização do CAA no estado plástico

O conjunto de ensaios destinados à caracterização do concreto autoadensável no estado plástico fundamenta-se na aferição concomitante de três atributos essenciais: a fluidez, a habilidade passante e a resistência à segregação. Tais propriedades garantem que a mistura, sob ação exclusiva da gravidade, preencha fôrmas complexas, escoe de maneira íntegra entre armaduras e mantenha-se estável sem sofrer separação de fases (Tutikian; Dal Molin, 2008, p. 46).

A Figura 1 ilustra os ensaios mais consagrados nessa caracterização, apresentando o slump-flow, slump-flow T_{50}, V-funnel, L-box e U-box, além de testes como o J-ring, Fill-box, U-pipe, Orimet e J-ring, cuja aplicabilidade varia conforme o grau de restrição de armadura e o ambiente de execução.

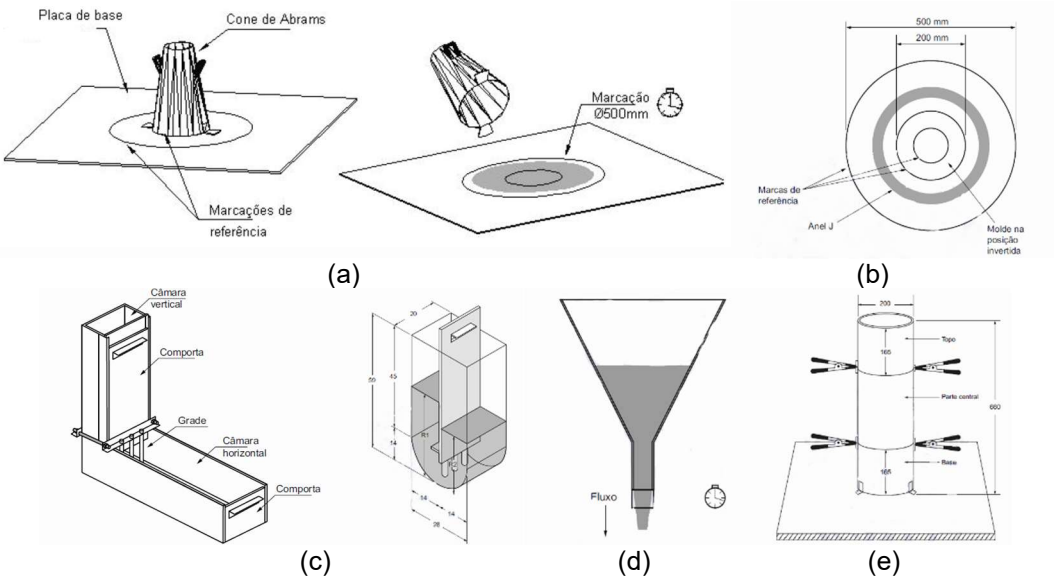
As ilustrações (a) a (e) da Figura 1 apresentam esquemas simplificados de cada equipamento, evidenciando privilégios e limitações. O slump-flow (a) mostra o cone de Abrams sobre placa base marcada em 500 mm, enquanto o J-ring (b) adiciona a moldura de obstáculos ao redor do cone invertido.

A caixa L e U (c) explicita dimensões e formas que simulam passagens estreitas, o funil V (d) destaca o fluxo gravitacional e o tempo de escoamento e, por fim, a coluna de segregação (e) quantifica a proporção de material fines versus agregados graúdos após repouso.

O funil V (V-funnel) avalia o tempo de escoamento de um volume padronizado de mistura sob ação gravítica, sendo particularmente sensível à resistência interna ao escoamento e, portanto, à coesão do CAA. Sua versão estendida, V-funnel 5 min, distingue-se pela mensuração da consistência após repouso, evidenciando possíveis mudanças reológicas por hidratação inicial ou segregação.

Outros ensaios de caracterização são o L-box e o U-box, que reproduzem condições de confinamento por meio de um trilho horizontal e uma câmara vertical interligados, medindo a relação de altura entre a mistura que transpõe a restrição de armadura (grade) e a massa remanescente. Esses testes são cruciais para assegurar que o CAA enfrentará armaduras densas sem obstruções no fluxo.

Figura 3 - Ensaios com normas vigentes para aferição das características do CAA:



Onde: (a) corresponde a *slump flow* e *slump flow* T500 (ABNT NBR 15823-2, 2017), (b) corresponde a *J-ring* (ABNT NBR 15823-3, 2017), (c) corresponde a caixa L e caixa U (ABNT NBR 15823-4, 2017), (d) corresponde a funil V (ABNT NBR 15823-5, 2017) e (e) corresponde a coluna de segregação (ABNT NBR 15823-6, 2017).

Entre os ensaios representados na **Tabela 1** o slump-flow figura como método primário para quantificar o espalhamento livre do CAA, fornecendo diâmetros típicos entre 600 e 800 mm quando adequadamente dosado. O slump-flow T_{50}, variante temporal deste ensaio, registra o tempo decorrido para que a

mistura alcance metade de seu diâmetro final, apontando variações de viscosidade que podem não ser perceptíveis no slump-flow convencional (EFNARC, 2002).

A Tabela 1, adaptada de Tutikan e Dal Molin (2008) oferece um panorama crítico da recomendação de cada ensaio em laboratório e em canteiro, bem como sua eficácia na mensuração de fluidez, habilidade passante e coesão.

Observa-se, por exemplo, que o slump-flow e o slump-flow T_{50} gozam de alta recomendação tanto para fluidificar a mistura (XXX) quanto para avaliar sua coesão (X), ainda que não captem diretamente a habilidade passante (N). Já o L-box e o U-box, que simulam fluxos confinados por armaduras, apresentam robustez no indicador de habilidade passante (XXX), embora sejam menos sensíveis à fluidez extrema (N).

Tabela 1 - Ensaios usuais para aferição das características físicas essenciais de um CAA:

Ensaios	Fluidez	Habilidade passante	Coesão
Slump-flow	XXX	N	X
Slump-flow T_{50}	XXX	N	X
V-funnel	XX	N	XXX
V-funnel (5 min)	XX	N	XXX
L-box	X	XXX	XX
U-box	N	XXX	XX
Coluna de segregação	N	N	XX

Fonte: Adaptado de Tutikian; Molin, (2008, p. 46)

.

No tocante à coesão, o J-ring, também representado na utiliza um anel de perfis metálicos sobre a base de slump-flow, avaliando o espalhamento após percurso por entre obstáculos padronizados. Ele complementa os dados de fluidez e habilidade passante ao revelar a tendência a formar caminhos preferenciais ou canais de vazamento.

Com a consolidação das normas brasileiras para o CAA, os testes representados na Figura 1 passaram a integrar a série ABNT NBR 15823, subdividida em partes que estabelecem requisitos e procedimentos para cada ensaio: (a) slump-flow e slump-flow T_{50} (NBR 15823-2:2017), (b) J-ring (NBR 15823-3:2017), (c) caixas L e U (NBR 15823-4:2017), (d) funil V (NBR 15823-5:2017) e (e) coluna de segregação (NBR 15823-6:2017).

Outro marco na consolidação histórica do concreto autoadensável recai sobre os protocolos de ensaio para avaliar a fluidez e a resistência à segregação.

O teste de espalhamento por tronco de cone, citado por Bertolani (2017) e difundido pelos manuais da EFNARC (2002), tornou-se um padrão para mensurar o “slump flow” e verificar se o concreto manteria sua coesão.

Em paralelo, o “L-Box test” agregaram informações acerca da habilidade passante, assegurando que, ao final, o agregado graúdo não se separasse da matriz cimentícia durante o lançamento. Esses ensaios sistematizaram a prática e permitiram comparar concretos formulados sob diferentes condições, o que foi importante para a padronização internacional.

4. Técnicas aplicadas a construção civil para mitigar impactos ambientais

Pesquisas nacionais e internacionais indicam que a substituição parcial de agregados naturais por reciclados, desde que precedida de criteriosa caracterização quanto à pureza, granulometria, absorção e compatibilidade química, pode reduzir a pressão sobre jazidas e, em muitos casos, diminuir a massa específica do compósito, variável decisiva para a condutividade térmica e, por consequência, para as cargas de resfriamento e aquecimento ao longo da vida útil da edificação (Dalvi, 2014; Brasileiro; Matos, 2015; Roque; Pierri, 2019; Nascimento; Morais; Lopes, 2022; Rizzo, 2020; Furian *et al*., 2022).

O método placa-parede potencializa essa agenda porque racionaliza consumos desde a base: paredes moldadas in loco na espessura final, alta repetitividade geométrica, compatibilização prévia de instalações e redução de camadas de revestimento. Em vez de sucessivas fases úmidas com alto índice de retrabalho, passam a prevalecer ciclos curtos de montagem, concretagem, cura e desforma, nos quais a previsibilidade favorece o controle de perdas e a medição de desempenho (Dantas, 2024).

Segundo a ABNT NBR 16055 (2022) a cada ciclo de execução, as paredes da edificação são concretadas em uma única etapa; após a desforma, já permanecem conformadas as aberturas de portas e janelas, as passagens para manutenção e os elementos de fixação para coberturas e demais componentes, quando aplicável, assim potencializando a execução.

A ABNT NBR 16055 (2022) ainda especifica que para paredes moldadas in loco, adota-se: para alturas ≤ 3 m, espessura mínima de 10 cm; admite-se 8 cm apenas em paredes internas de edificações com até dois pavimentos; para alturas > 3 m, espessura mínima igual a h/30. A redução local de espessura por frisos ou rebaixos pode, a critério dos projetistas, não ser computada, desde que a profundidade seja ≤ 1/10 da espessura e a largura ≤ 10 cm, preservando-se os cobrimentos das armaduras. Permite-se um único friso/rebaixo horizontal por pavimento e exige-se espaçamento entre frisos/rebaixos verticais > 30 × a espessura.

Nesse arranjo, o uso de fôrmas e escoras ocupa papel central, pois sistemas modulares com alto número de reuso diminuem a demanda por madeira, estabilizam a qualidade geométrica e reduzem patologias de origem executiva. A repetição controlada de painéis acelera a curva de aprendizado das equipes, encurta prazos e facilita a integração de resíduos como matéria-prima porque assegura ambientes de concretagem com menos variabilidade. A amortização ambiental e econômica de fôrmas metálicas ao longo de vários empreendimentos constitui uma das vias mais tangíveis de economia material em obras com tipologias repetitivas, como as habitações de interesse social (Francisco; Ortenzi, 2023).

A ABNT NBR 16055 (2022) trata o conjunto de fôrmas como um sistema projetado que deve resistir à pressão do concreto fresco e manter rigidez, aprumo e planeza, assegurando espessuras, vãos e alinhamentos de projeto; o projeto das fôrmas deve prever juntas, chanfros e cantoneiras, painéis, escoramentos, aprumadores e alinhadores, pontos de ancoragem e insertos, compatibilizados com armaduras, embutidos e passagens, além da sequência de montagem, da taxa de lançamento e dos procedimentos de adensamento e cura; o uso de desmoldante deve evitar manchas e não pode comprometer a aderência de revestimentos; o sistema deve permitir limpeza, inspeção e substituição de painéis a cada ciclo, com controle de reuso, registros de não conformidades e rastreabilidade.

Figura 4 - Formas para sistema placa parede



Fonte: Fundiferro (esquerda); Neoformas (direita)

O CAA é o pivô técnico que conecta produtividade e sustentabilidade no sistema placa-parede. Ao dispensar vibração, diminui ruído ocupacional, reduz defeitos de adensamento e melhora acabamento, mitigando retrabalhos e perdas. A elevada fluidez exige, entretanto, governança sobre os parâmetros reológicos para que a incorporação de resíduos não se traduza em segregação, exsudação ou descontrole de consumo de água (Bellei, 2015).

Do ponto de vista térmico, a literatura reporta que a redução da massa específica do concreto, efeito plausível da introdução de agregados leves ou reciclados cerâmicos, tende a diminuir a condutividade térmica do material, contribuindo para a atenuação das cargas térmicas transmitidas pelas paredes (Angelin, 2014).

No caso do concreto propriamente dito estabelece-se uma relação clara entre massa específica e condutividade: O estudo de Shan *et al*. (2023) avaliou a condutividade térmica de concretos ultraleves preparados com partículas ocas de cinza volante, utilizando o método da placa quente protegida, observou uma relação direta entre a densidade e a condutividade: o concreto comum, com densidade de aproximadamente 2250 kg/m³, apresentou condutividade de 1,98 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$, enquanto os compósitos ultraleves, com densidades entre 966 e 1303 kg/m³, exibiram valores entre 0,28 e 0,40 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$. Essa redução de cerca de 80% evidencia que a menor massa específica e o aumento do volume de poros reduzem significativamente a transferência de calor.

Salienta-se que a sustentabilidade no canteiro depende menos de soluções espetaculares e mais de processos bem desenhados, com indicadores para água, energia e materiais desde a concepção (Araújo, 2009; Carvalho; Sposto, 2012; Marques; Gomes; Brandli, 2017).

A economia de materiais no sistema placa-parede não se limita às fôrmas, o encurtamento de cadeias de acabamento, a menor espessura de argamassas e a coordenação modular entre arquitetura e sistema de fôrmas reduzem cortes, sobras e retrabalhos. Estudos evidenciam que, decisões geométricas aparentemente banais, como a paginação de pisos e revestimentos alinhada a módulos racionais, têm potencial de reduzir significativamente o resíduo gerado,

mostrando que a sustentabilidade nasce no desenho, não na caçamba (Martins, 2018; Nascimento; Morais; Lopes, 2022; Dantas, 2024).

O gerenciamento de resíduos, por sua vez, revela o elo entre práticas de canteiro e infraestrutura urbana. A experiência de usinas públicas e parcerias municipais no beneficiamento de RCD, como a USIBEN, no estado da Paraíba, mostra que cadeias de reciclagem são viáveis técnica e economicamente quando há segregação na origem, logística previsível e demanda para os produtos resultantes, sobretudo em pavimentação e artefatos de concreto. Essa engrenagem fecha o ciclo dos 3Rs e amplia a circularidade ao reintroduzir, com rastreabilidade, materiais que sairiam como rejeito (Tavares *et al*., 2016).

Sob a ótica dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável, a técnica de placa-parede com CAA e incorporação de resíduos dialoga diretamente com metas de água e saneamento, energia limpa e acessível, indústria-inovação-infraestrutura e cidades sustentáveis. Essa convergência se traduz em menos consumo de água por unidade construída, menor demanda de energia embutida pela economia de materiais, redução de resíduos destinados a aterros e ambientes internos mais saudáveis, quando o envelope é projetado para reduzir cargas térmicas e dependência de climatização ativa. Trata-se de aproximar a construção civil do vocabulário da política pública, em vez de circunscrevê-la a soluções técnicas descontextualizadas (Lopes; Oliveira; Abreu, 2017; Sobotka; Sagan, 2016).

A crítica de Antiqueira e Sekine (2020) à cultura do desperdício, atualizada pela experiência pandêmica, adiciona um horizonte ético à pauta dos 3Rs. Mais do que reduzir, reutilizar e reciclar, é preciso reorganizar fluxos, reparar redes de produção e resgatar laços com o território, de modo que o canteiro deixe de ser uma ilha extrativista e passe a operar como nó de uma economia urbana de baixo carbono.

O mérito do enfoque recomendado por Nascimento, Morais e Lopes (2022) está precisamente em tensionar essas variáveis sem sacrificar a visão de totalidade: sustentabilidade é resultado de equilíbrio, não de um único indicador otimizado (Araújo, 2009; Carvalho; Sposto, 2012).

Em síntese densa, a sustentabilidade na construção civil, lida a partir do prisma da placa-parede com CAA e materiais não convencionais, é menos um atributo de um componente isolado e mais um efeito de orquestra: desenho modular que reduz cortes e sobras; fôrmas e escoras metálicas de alto reuso que estabilizam geometrias; traços com resíduos que calibram massa específica e condutividade; rotinas de canteiro que monitoram água e energia; cadeias urbanas de reciclagem que fecham ciclos materiais; e instrumentos de gestão e certificação que solidificam compromissos.

4.1. Influência dos agregados não convencionais nas propriedades do concreto

Segundo a Resolução CONAMA 307 (2002), os resíduos da construção e demolição são provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, da preparação e da escavação de terrenos e podem ser compostos de diversos materiais desde cerâmicos, plásticos, madeira e cimentício.

No desenvolvimento de proporções de mistura de concreto, em torno de 70% do volume é ocupado por agregados, consequentemente suas propriedades influenciam as propriedades do concreto (Pimentel, 2020).

Os agregados reciclados e os agregados leves apresentam normalmente, maior capacidade de absorção de água que os agregados tradicionais, isso exige um maior controle da quantidade de água de amassamento, uma vez que esta pode ser absorvida pelo agregado alterando a consistência do concreto no estado fresco.

A aceitação dos agregados reciclados para uso em compósitos cimentícios ou produtos à base de cimento é fortemente condicionada ao atendimento de requisitos de natureza física, química e de pureza, tal como preconizado pela ABNT NBR 15116 (2021).

Os agregados reciclados são divididos em três subclasses a partir da sua composição, são eles, Agregado Reciclado Cimentício (ARCI), onde existe

predominantemente materiais cimentícios diversos podendo incluir até 10% de cerâmica vermelha ou branca, Agregado Reciclado de Concreto (ARCO), composto por resíduos de concreto e o ARM, constituído por uma mistura de materiais cimentícios com até 40% de materiais cerâmicos (ABNT NBR 15116, 2021).

Quando o agregado reciclado for utilizado para preparo de materiais com função estrutural é indicado usar apenas agregados de subclasse ARCO, neste caso a substituição deve ser limitada a apenas 20% do agregado natural utilizado no preparo total, porem quando não houver função estrutural a substituição pode ser de até 100% do agregado dependendo do caso, muitos trabalhos desenvolvidos têm como metodologia analisar a proporção ideal de substituição, autores como Pelissari (2016), Rizzo (2018), Gonçalves (2001) e Ferreira (2013) propuseram em seus estudos avaliar a variação da porcentagem de substituição do agregado.

Tabela 2 - Desempenho de concretos produzidos com resíduo cerâmico:

Autor	Tipo de resíduo	Porcentagem de substituição	Porcentagem de aumento da resistência
Almeida et al., (2019)	Louça Sanitária - agregado graudo	100%	Não alterou significativamente
Rashid et al., (2017)	Cerâmica vermelha - agregado graúdo	30%	17%
Ortigara et al., (2022)	Louça Sanitária - agregado miúdo	40%	18%
Ahmad *et al.* , 2023)	Louça Sanitária como agregado graúdo	30%	9,30%

Fonte: Autoria própria (2024).

4.1.1. Agregado de louça sanitária

A louça sanitária é produzida com a argila plástica de alto desempenho, conhecida como *ball clays.* Esta argila é encontrada em camadas lenticulares de pequenas dimensões, dificultando a constância de suas propriedades e qualidade, sendo assim, tem-se uma grande diversidade deste material (Cabral *et al*., 2010).

Os resíduos cerâmicos da construção civil enquadram-se como Classe A, conforme a Resolução CONAMA 307 e alterações, sendo passíveis de reaproveitamento e reciclagem no próprio setor. Entre os usos recomendados, destacam-se a aplicação como agregado em camadas de e na produção de concreto sem função estrutural.

Como a indústria cerâmica abastece o mercado com tijolos, blocos, telhas e placas de revestimento, além de itens como isoladores elétricos e louças sanitárias, o volume de resíduos gerados é significativo (Steck; Pimentel, 2022).

O reaproveitamento desses resíduos seria uma alternativa benéfica para o meio ambiente, pois permitiria a redução de áreas de deposição destes resíduos. Podem ser usados como agregados para produção de concreto e argamassas ou como pozolanas, dependendo do tipo de argila usado na fabricação e sendo estes resíduos finamente moídos.

Steck e Pimentel (2022) investigou o emprego de resíduo de louça sanitária finamente moído como adição em concreto de ultra-alto desempenho com aproximadamente 16 % de substituição volumétrica do cimento por louça sanitária moída, o material manteve a resistência à compressão em patamar semelhante aos 28 dias e a tração na flexão apresentou ganho pontual. O módulo de elasticidade permaneceu da mesma ordem de grandeza. Aos 90 dias, as propriedades físicas foram semelhantes entre composições, com índice de vazios entre 1,63 e 2,68%, absorção entre 0,6 e 1,2% e massa específica entre 1,872 e 2,441 g/ cm^3.

Esses resultados sustentam a afirmação de que resíduos cerâmicos finamente moídos podem ser empregados como pozolanas, mantendo o desempenho global e produzindo benefício pontual em flexão, quando a mineralogia é favorável.

No estudo de Ortigara *et al*. (2022) a substituição volumétrica da fração miúda por resíduo de louça sanitária em concretos autoadensáveis, nos teores de 20 %, 40 %, 60 % e 80 %, provocou redução do diâmetro de espalhamento, aumento dos tempos de escoamento e diminuição da capacidade de passagem entre armaduras. Em contrapartida, observou-se melhora da coesão e da estabilidade visual, especialmente nas formulações com 60 % e 80 %, com

distribuição uniforme dos agregados e ausência de exsudação, o que indica maior resistência à segregação no estado fresco enquanto no estado endurecido, a resistência à compressão elevou-se ao aumentar a substituição de 20 % para 40 %, aos 28 dias. A resistência à tração por compressão diametral não exibiu variações estatisticamente relevantes entre as composições. Quanto às propriedades de transporte, verificou-se tendência de queda da absorção de água com o acréscimo do resíduo, embora o índice de vazios sugira incremento de poros não interligados nas faixas de 60 % e 80 %.

Enquanto Medina *et al*. (2013) analisou concretos em que 20 % e 25 % do agregado graúdo natural foi substituído, por resíduo cerâmico de louça sanitária. No estado fresco, todas as misturas mantiveram consistência plástica; observou-se redução do abatimento e da massa específica aparente do concreto à medida que aumentou a fração cerâmica, coerente com a maior absorção de água, maior índice de forma lamelar e menor densidade do agregado reciclado. No estado endurecido, a resistência à compressão e a resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias cresceram com o teor de substituição, alcançando, no traço com 25 % de resíduo, ganhos aproximados de 11 % (compressão) e 25 % (tração) em relação ao concreto de referência.

O trabalho de Meena *et al*. (2022) conclui que empregar louça sanitária como agregado no concreto reduz a massa específica no estado fresco e no estado endurecido de forma aproximadamente linear com o aumento do teor cerâmico e diminui a trabalhabilidade pela maior demanda de água e angularidade dos grãos; esse efeito é documentado quando a louça sanitária substitui o agregado miúdo em 20 %, 50 % e 100 % em volume. Quanto ao desempenho mecânico, teores moderados podem igualar ou superar o concreto de referência, com relatos de acréscimos de aproximadamente 24,74 % em resistência à compressão e 34,25 % em resistência à tração por compressão diametral, além de melhoras até cerca de 20 % quando a substituição do agregado graúdo cerâmico é limitada a 0–25 %; em algumas séries, 50 % no agregado miúdo resultou na maior resistência à compressão observada.

Estudos como o de Almeida *et al*., (2019) apontam que a utilização de resíduos de louças sanitárias como agregados reciclados proporciona significativas vantagens técnicas, econômicas e ambientais. Além disso, o

concreto produzido com esses agregados reciclados apresenta uma resistência superior às variações de temperatura em comparação ao concreto que utiliza agregados naturais.

Essa prática não apenas contribui para a sustentabilidade, mas também melhora o desempenho do material em condições climáticas diversas (Medina; Sánchez De Rojas; Frías, 2013).

4.1.2. Agregado reciclado misto

Conforme a ABNT NBR 15116 (2021), o agregado reciclado misto (ARM) é obtido do beneficiamento de resíduos Classe A e resulta da combinação de componentes cimentícios — concreto, argamassa, blocos e pré-moldados — com componentes cerâmicos — tijolos, blocos e telhas —, admitindo traços residuais de solo e impurezas dentro de limites. Pode ser fornecido nas frações miúda e graúda. A norma exige controle da composição para distinguir o ARM dos agregados reciclados predominantemente cimentícios e fixa limites para contaminantes: materiais indesejáveis inferiores a 1 %, argila em torrões inferior a 3 %, sulfatos até 0,10 % e cloretos máximos de 0,20 % para concreto simples, 0,10 % para concreto armado e 0,01 % para concreto protendido, além de requisitos de absorção de água usualmente até 12 % para ARM conforme classe e fração. Esses controles asseguram homogeneidade, rastreabilidade e aptidão de uso em argamassas e concretos sem função estrutural, desde que atendidos os demais requisitos granulométricos e de desempenho definidos na norma.

Pesquisas recentes evidenciam que a substituição de agregados naturais por ARM não é uma questão meramente binária. Rodríguez-Robles et al. (2015) e Santos e Milani (2023) verificaram que, com 50% de substituição, as perdas de resistência à compressão situam-se na faixa de 7% a 20%.

Orioli *et al*. (2018) apontam que, apesar de se tratar de um indicador geral, a aplicação prática segue demandando ensaios que confirmem se o teor efetivo se adequa à especificidade do traço e do tipo de obra pretendida. Em contextos estruturais, portanto, a recomendação é ainda mais restritiva, pois os fragmentos cerâmicos com porosidade elevada podem comprometer, em maior grau, a resistência do compósito.

Peixoto (2023) investigou que o concreto autoadensável com agregado reciclado misto, o estado fresco manteve autoadensabilidade com diâmetro de espalhamento na faixa de 730 a 763 mm, T500 entre 2,10–2,28 s, , anel-J entre 20,0 a 23,3 mm e caixa-L de aproximadamente 0,83, indicando fluxo e passagem compatíveis com os critérios da NBR 15823 (2017) em relação à referência, observou-se menor espalhamento e maior tempo no funil-V, atribuídos à maior absorção e rugosidade dos grãos reciclados, enquanto no estado endurecido, a resistência à compressão apresentou reduções de 18,8% a 7 dias, 14,9% a 28 dias e 21,0% aos 28 dias em comparação à mistura de referência.

A heterogeneidade, aliada aos diversos ambientes de origem do entulho, justifica essas discrepâncias; ainda assim, Xie *et al*. (2018) observam que aditivos específicos e processos de pré-tratamento dos agregados podem atenuar consideravelmente o impacto na resistência.

Não se pode desassociar, por outro lado, o debate sobre absorção de água do ARM. Martínez-Lage, Vázquez-Burgo e Velay-Lizancos (2020) documentaram valores médios de 8,79% para agregados cerâmicos entre 4 mm e 12 mm, e de 5,89% para agregados de concreto reciclado na mesma faixa granulométrica, enquanto os agregados naturais tradicionais costumam oscilar entre 0,5% e 2%.

Essa discrepância leva a uma dificuldade natural em se estabelecer a relação água/cimento efetiva, pois parte da água adicionada no amassamento é retida pelos fragmentos porosos antes mesmo de reagir com o cimento.

Procedimentos de pré-saturação, tais como a submersão dos agregados por 30 minutos e posterior secagem superficial, têm sido mencionados em Pelissari (2016) e Rizzo (2018) como uma forma de minimizar a variabilidade na mistura. Entretanto, há uma consideração prática de escala industrial que nem sempre permite esse tipo de manuseio prolongado — a logística do canteiro e o ritmo acelerado das produções nem sempre se adequam com métodos laboratoriais mais elaborados.

Não obstante, a relação inversa entre porosidade e resistência, destacada por Gidrão (2015) e Silva e Brito (2010), permeia toda a discussão sobre o ARM.

Tanto a dureza quanto o módulo de elasticidade do produto final também se ressentem, pois o agregado, quando dotado de porosidade excessiva, se torna o elo fraco na matriz do concreto, influenciando diretamente o comportamento à compressão e à tração.

Em canteiros onde o entulho seja majoritariamente cerâmico, a absorção será elevada; já em locais onde predomina concreto, a absorção tende a ser menor, mas ainda acima dos valores típicos de um granito ou basalto de jazida virgem. O comportamento no estado fresco também sofre alterações evidentes. Gerin, Sales e Nardin (2019) e Gomes (2021) indicam quedas no abatimento (slump) quando aumentam as frações de ARM, resultando em concretos mais “secos” que, frequentemente, demandam maior aditivo plastificante para manter o nível de trabalhabilidade.

Esse maior consumo de aditivos gera impacto econômico e, em alguns casos, pode desencadear instabilidades de segregação se não houver um controle. Em adição, o uso de superplastificantes sem uma compensação adequada de água livre pode levar a efeitos colaterais, como exsudações pontuais.

Apesar desses entraves, nem tudo se traduz em desvantagens. Há uma evolução considerável na qualidade do ARM ao longo dos últimos anos. Quando Leite (2001) iniciou pesquisas sobre agregados mistos, havia pouco controle sobre a triagem dos resíduos e quase nenhuma padronização do processo de reciclagem.

Pelissari (2016), por sua vez, já relata resultados mais promissores, com perdas menores de resistência, mostrando que os métodos de beneficiamento e de preparação do entulho estão se aperfeiçoando. Em alguns casos, a literatura indica que é possível empregar ARM em concretos estruturalmente relevantes, desde que o percentual de substituição e o teor de cerâmica sejam controlados.

Salgado e Silva (2021) trouxeram contribuições significativas nesse sentido, indicando que 20% de substituição de agregado, com até 20% de cerâmica, pode gerar perdas de resistência à compressão perfeitamente gerenciáveis, qualificando o concreto para uso em elementos de menor complexidade.

Desse modo, “embora a norma atual apenas permita que isso aconteça com o concreto produzido com o ARM, os dados encontrados mostram que o concreto com o agregado reciclado teve uma perda relativamente baixa de sua resistência” (Salgado; Silva, 2021, p. 28).

Há, ainda, a dimensão ambiental e econômica que torna o ARM especialmente atrativo. A capacidade de reutilizar entulho de obras e demolições reduz a pressão sobre jazidas naturais e diminui o volume de descarte em aterros.

Dessa forma, a adoção crescente de agregados mistos integra a lógica de sustentabilidade, algo cada vez mais requisitado em certificações ambientais e em políticas de resíduos sólidos.

Entretanto, é essencial o estabelecimento de parcerias com usinas de reciclagem que mantenham um padrão elevado de segregação e limpeza, pois os benefícios ecológicos não justificam uma queda abrupta de desempenho. Segundo Orioli *et al.* (2018, p. 68):

> Por se tratar de uma mistura de componentes, as características podem variar de acordo com o local e finalidade da construção em que foi retirada; a ABNT NBR 15116 (2021) aconselha o limite de teor de cerâmica em até 40% para ARM. A substituição de 50% do agregado natural por ARM resulta em uma redução na resistência à compressão entre 7% e 20%, enquanto a substituição total por ARM causa uma diminuição entre 10% e 45%. Porém, a magnitude do decréscimo depende diretamente da qualidade do agregado e dos aditivos utilizados, bem como dos processos de pré-tratamento aplicados.

Em termos de horizonte de pesquisa, a tendência é que se multipliquem estudos sobre tratamentos superficiais, como impregnação com silanos ou soluções poliméricas, objetivando reduzir a absorção de água dos fragmentos e, por conseguinte, melhorar a aderência e a durabilidade do concreto produzido.

Outra possibilidade são técnicas de carbonatação ou envelhecimento acelerado, já utilizadas em alguns países da Europa, como relatado por Martínez-Lage *et al.* (2020), que analisam a reação da pasta aderida com dióxido de carbono, estabilizando quimicamente o agregado antes de sua incorporação.

4.1.3. Argila expandida

O uso de argilas expandidas vem de um histórico que remonta à década de 1930, quando se buscava produzir cubos leves na Escandinávia. Em seu processo de fabricação, a argila, ao ser aquecida em torno de 1150 °C em forno rotativo, expande a um tamanho até quatro ou cinco vezes maior, formando pellets com estrutura porosa no interior (Corinaldesi; Moriconi, 2015).

Tal estrutura, para fins de agregação em concretos, implica uma atenção redobrada à fase de mistura, uma vez que os poros abertos aumentam a demanda de água, assim como podem prejudicar a resistência final caso não exista um balanceamento adequado de aditivos e um pré-encharcamento do agregado, quando necessário.

A argila expandida, conforme discutida por Scobar (2016), tem sido adotada em múltiplas frentes industriais devido a atributos técnicos relevantes, incluindo elevada resistência à compressão em relação a outros agregados leves.

O emprego de agregados leves, como a argila expandida, é recorrente para reduzir a densidade do concreto, aliviando cargas estruturais e aprimorando o isolamento térmico; no âmbito dos concretos com agregados reciclados mistos, investigar a sinergia entre esses materiais desponta como via promissora para estudos de condutividade térmica em concretos autoadensáveis que combinam fragmentos residuais e agregados leves, baseando-se em evidências práticas que apontam desafios de porosidade, absorção de água e desempenho mecânico.

Embora o ARM decorra do reaproveitamento de entulho de construção e demolição (eventualmente contendo cerâmica vermelha, argamassa e concreto), a argila expandida se distingue por ser um agregado leve de origem industrial controlada, com granulometria muitas vezes esferoidal e menor variação composicional.

Em um recorte prático, estudos como os de Tayeh *et al.* (2021) e Ahmad; Chen; Farasat Ali Shah (2019) já apontam para variações substanciais de densidade e resistência nos concretos que empregam argila expandida,

chegando a intervalos de densidade de 739 kg/m³ a mais de 2000 kg/m³, e resistências à compressão que podem oscilar de 6,5 MPa a 41 MPa.

Nessa perspectiva, a argumentação de Scobar (2016, p.32) se mostra convergente, pois “a utilização desse material pode resultar em economias significativas, como uma diminuição de até 50% nos gastos com aquecimento e resfriamento em edifícios que incorporam Agregado de Argila Expandida Leve”, evidenciando o benefício energético atrelado ao menor fluxo térmico pela envoltória. Ainda, segundo o mesmo autor:

> [...] a expansão das matérias-primas naturais pode ser obtida, basicamente, através de dois processos industriais: sinterização ou forno rotativo. A sinterização consiste num processo onde a matéria-prima é misturada com uma quantidade adequada de combustível, que pode ser coque ou carvão moído, e sofre expansão com o aumento da temperatura devido à formação de gases, porém esse método cria poros abertos, o que faz com que o produto resultante absorva mais água. No processo de forno rotativo, a massa de argila se funde formando uma massa viscosa e a outra parte se decompõe liberando gases, derivando um agregado com uma camada de proteção externa e o interior poroso (Scobar, 2016, p.16).

Isso só reforça a ideia de que há distintos métodos de produção da argila expandida, com implicações diretas na quantidade de água retida pelo agregado. Assim, uma edificação que opte por essa composição pode usufruir de inércia térmica moderada, reduzindo custos de climatização, e ainda contribuir para a economia circular ao empregar resíduos.

Vervloet *et al*. (2019) estudou o concreto autoadensável com argila expandida, para tal executou medidas de controle específicas para evitar exudação e segregação, baseadas no domínio da absorção e na estabilidade reológica da mistura, o agregado graúdo leve foi previamente saturado para não extrair água da pasta, a dosagem manteve proporções rigorosas de água, finos e aditivo superplastificantes. Em comparação ao concreto de referência, o emprego de argila expandida resultou em reduções claras e quantificáveis: a massa específica caiu cerca de 31,07% no estado fresco e 28,77% aos 28 dias enquanto a resistência à compressão reduziu 52,87% aos 28 dias e 56,20% aos 91 dias.

Souza e Carvalho (2017) propôs o desenvolvimento de um concreto autoadensável de baixa densidade para painéis pré-fabricados e registra

reologia estável sem exsudação nem segregação após ajustes de dosagem com finos (incluindo sílica ativa), superplastificante em teor superior ao do traço de referência e incorporação de pó de argila ao miúdo para elevar coesão da matriz. No estado endurecido, a massa específica seca do concreto leve reduziu 32,30% enquanto a resistência à compressão aos 28 dias atingiu 23,29 MPa, cerca de 30,30% inferior em relação à referência.

O estudo realizado por Ahmad; Chen; Farasat Ali Shah, (2019) utilizou a argila expandida variando seu volume entre 20,1% a 49,4% na formulação de concreto leve auto-adensável. A densidade dos concretos variou de 739,04 kg/m³ a 1315,69 kg/m³, e as resistências à compressão para diferentes misturas variaram de 6,5 MPa a 24,3 MPa, dependendo da proporção, mostrando uma variação significativa de acordo com a densidade. Os concretos foram submetidos a ensaios de condutividade térmica, com valores medidos variando de 0,228 W/m.K para misturas de menor densidade (800 kg/m³) a 0,448 W/m.K para as de maior densidade (1300 kg/m³), demonstrando uma relação direta com a densidade e resistência do concreto.

5. MÉTODOS PARA MEDIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS

As principais características térmicas que afetam o conforto nas construções são a condutividade térmica e a resistência térmica.

A definição de condutividade térmica segundo a ABNT NBR 15220-1 (2024) quantifica a capacidade de um material transmitir calor, desempenha um papel crucial na determinação do consumo de energia e conforto térmico dos edifícios, impactando diretamente fatores como conforto dos ocupantes e consumo de energia, que consequentemente ajuda na redução das emissões de gases de efeito estufa.

De acordo com Liu *et al*. (2025), a melhoria do isolamento térmico e o uso de materiais de baixa condutividade e menor absorção solar e controle térmico de janelas e coberturas na envoltória das edificações reduziram significativamente as cargas de aquecimento e resfriamento, — reduziu em 17,7 % a carga de aquecimento, 33,3 % a de resfriamento e 28,1 % o consumo total de energia.

Segundo Ordenes, Lamberts e Güths (2008) a transferência de calor no ambiente ocorre através de três mecanismos inter-relacionados:

Condução: é o processo pelo qual o calor é transferido diretamente entre partículas em um material sólido, à medida que moléculas com maior energia térmica transmitem essa energia para as moléculas vizinhas, sem que haja movimento perceptível da matéria. Esse processo é especialmente importante em materiais como metais, que possuem alta condutividade térmica, sendo relevante para o conforto térmico em ambientes construídos, onde o calor se desloca através de superfícies e paredes.

Convecção: que ocorre em fluidos, como líquidos e gases, quando o calor é transportado pelo movimento do próprio fluido, criando correntes de ar ou de líquido que distribuem o calor entre áreas com temperaturas diferentes. Isso é particularmente importante em sistemas de ventilação e climatização, tanto em ambientes internos quanto em externos.

Radiação: é a transferência de calor por meio de ondas eletromagnéticas, onde o calor pode ser transmitido sem a necessidade de um meio material, como ocorre com a radiação solar. Em cenários ao ar livre, a radiação pode ser um fator determinante no conforto térmico, sendo incorporada a modelos de previsão de conforto para otimizar a eficiência energética e o bem-estar em diversas condições ambientais.

A interação entre esses três mecanismos é fundamental para o desenvolvimento de modelos de conforto térmico que buscam prever as trocas de calor entre o corpo humano e o ambiente de forma precisa e adaptativa (Zhao; Lian; Lai, 2021).

Fu *et al*., (2020) demonstraram em um estudo de caso realizado em escritórios pré-fabricados situados em Guangzhou, China, onde se analisou o conforto térmico em um clima subtropical. Esses escritórios são amplamente utilizados no processo de urbanização devido à sua flexibilidade e praticidade, porém os resultados indicaram que, no verão, as condições internas são frequentemente percebidas como desconfortáveis, com uma faixa de temperatura confortável identificada entre 25,0°C e 28,2°C. No inverno, a aceitabilidade aumenta significativamente, com temperaturas confortáveis variando de 20,7°C a 23,3°C. O estudo também observou uma discrepância entre as respostas térmicas dos ocupantes e as previsões feitas por modelos convencionais, sugerindo a necessidade de melhorar o ambiente interno.

Quanto maior a condutividade térmica de um material, mais eficiente ele será na condução de calor, representada pela letra lambda (λ), a unidade de medida comum para a condutividade térmica é W/m. K. Isso significa que a condutividade térmica mede a quantidade de calor (em watts) que passa através de um metro de um material com uma diferença de temperatura em graus Kelvin.

Estudos anteriores demonstram que existe uma relação entre a massa específica e a condutividade térmica e que esta é influenciada pelo teor de umidade e pelas características físicas dos agregados que o compõem, tais como a porosidade (Adesina, 2021; Cavalline *et al*., 2021; Lucas; Azambuja; Scalon, 2021).

A ABNT NBR 15220-1 (2024) também explica que a resistência térmica é uma propriedade inversa a condutividade térmica, é um conceito fundamental em física e engenharia térmica que descreve a capacidade que um material ou sistema tem de resistir à transferência de calor, aumentar a resistência térmica pode melhorar a eficiência energética e minimizar a perda de calor de edifícios, é representada pelo símbolo "R". Quanto maior a resistência térmica de um material, mais difícil é para ele conduzir o calor.

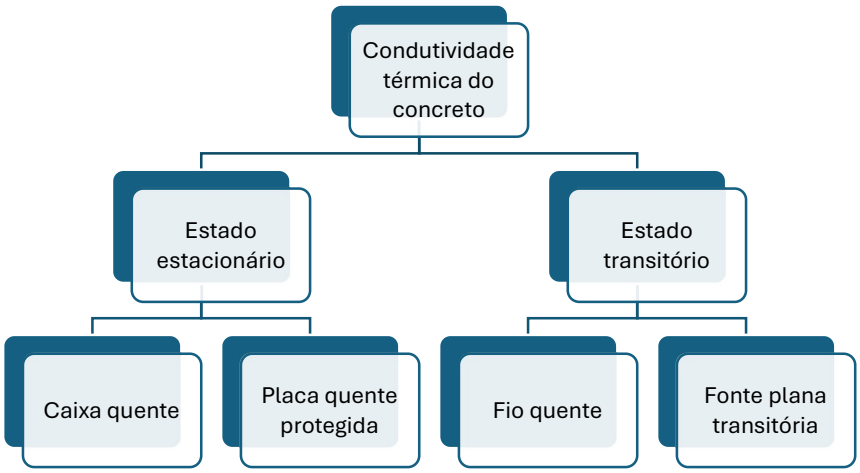
ASADI *et al*. (2018) explica que os métodos normativos para calcular a condutividade térmica de materiais são especificados em padrões técnicos e normas de diferentes organizações. Podem ser divididos em dois métodos, o transitório e o estacionário.

O estado transitório descreve uma situação em que um sistema está passando por mudanças, porém ainda não atingiu um estado de equilíbrio ou estabilidade. Em outras palavras, trata-se de uma fase de transição na qual as propriedades ou comportamentos do sistema estão evoluindo ao longo do tempo em resposta a uma perturbação inicial, neste caso o tempo é uma variável que deve ser contabilizada e analisada.

O estado estacionário descreve a condição em que um sistema atingiu um estado de equilíbrio ou estabilidade, no qual as variáveis de interesse não sofrem variações ao longo do tempo, pelo menos em uma escala de tempo observável. Nesse estado, as influências externas ou perturbações não têm interferência nos dados.

ASADI *et al*. (2018) aponta quatro métodos mais usuais para o ensaio de condutividade térmica, a Figura 5 demonstra estes ensaios subdivididos pelo tipo de estado:

Figura 5 - Diferentes métodos de medição de condutividade térmica do concreto:



Fonte: ASADI *et al*. (2018).

Alguns dos métodos normativos extremamente reconhecidos para calcular a condutividade térmica incluem:

1. ASTM C528 (2021): Esta norma da American Society for Testing and Materials (ASTM) descreve o método para medir a condutividade térmica de materiais isolantes em estado estacionário, utilizando um aparelho de Placa com fluxo de calor. É comumente utilizado para materiais de isolamento térmico;
2. ASTM C1114-06 (2019): Esta norma ASTM aborda o método de medição da condutividade térmica em estado estacionário, de materiais homogêneos, refratários em altas temperaturas, como tijolos refratários e concretos refratários;
3. ISO 8302 (1991): A Organização Internacional de Normalização (ISO) especifica um método para medir a condutividade térmica de materiais isolantes empregando o aparelho de placas quentes protegidas em estado estacionário, semelhante ao ASTM C518. É uma norma globalmente reconhecida;
4. ISO 22007-2 (2022): Esta norma ISO descreve o método para determinar a condutividade térmica de materiais pelo método da fonte de calor plana transiente, de construção e isolantes térmicos em estado estacionário,

usando uma técnica de proteção. É aplicável a uma ampla variedade de materiais;

5. BS EN 12667 (2001): Uma norma europeia que descreve o método para medir a condutividade térmica de materiais isolantes usando um aparelho de placas quente protegida e medidor de fluxo de calor similar a ASTM C518. É usado para materiais isolantes na União Europeia;
6. ASTM D5334 (2022): Esta norma ASTM aborda a medição da condutividade térmica pelo método de teste padrão para determinação da condutividade térmica em estado transiente de solo e rocha mole por procedimento de sonda de agulha térmica;
7. ISO 22007-3 (2008): Esta norma ISO baseia-se na análise de ondas de temperatura para a avaliação da difusividade térmica em materiais, como filmes finos e placas de plástico. É aplicável a plásticos em estados sólidos ou fundidos, bem como a plásticos com estruturas isotrópicas ou ortotrópicas.

Com o aumento de pesquisas sobre condutividade térmica do concreto, os métodos escolhidos para a medição variam de acordo com cada autor e finalidade, autores como Sacht; Rossignolo; Santos, (2010) utilizaram o método do fio quente transitório para estudar o comportamento térmico de concretos leves produzido com argila expandida resultou em 30% de redução da condutividade térmica, com uma redução de aproximadamente 48% de sua massa especifica seca aos 28 dias.

Banjad Pečur; Štirmer; Milovanović, (2015) estudaram o comportamento térmico de concretos produzidos com agregados reciclados de concreto e tijolo, pelo método da placa quente protegida, notaram uma redução de 13% a 27% de redução da condutividade térmica do concreto produzido com substituição de 40% e 50% dos agregados por agregado reciclado de concreto, enquanto para concretos produzidos com agregado proveniente da reciclagem de tijolo, a redução foi de 29% a 40% para a mesma porcentagem de substituição.

Zhao; Liu; Yang, (2018), adotaram o método do fio quente para estudar a condutividade térmica de concretos produzidos com agregados graúdos de concreto reciclado em substituições de 50% e 100%, que resultaram em uma

redução de 12,7% e 19,5%, respectivamente, enquanto sua massa especifica foi reduzida em 5% e 9%.

Marie, (2017), testou a condutividade térmica de concretos produzidos com substituição de 20% de agregados graúdos de concreto reciclado e agregados miúdos de borracha fragmentada, para tal estudo utilizou-se do método da placa quente protegida. A condutividade térmica foi reduzida em 27% para 20% de substituição de concreto reciclado, para a borracha fragmentada a redução foi de 28% para 20% de substituição. Contudo, o teor de borracha foi limitado a 10% e o ARCO a 20% para assegurar que a resistência à compressão permanecesse dentro de níveis aceitáveis.

O estudo de Oliveira *et al*., (2021) demonstrou que a substituição de agregados convencionais por argila expandida em concretos, nas proporções de 30% e 70%, resulta em concretos leves com melhoria no isolamento térmico. O ensaio térmico comprovou uma diferença de aproximadamente 7°C entre as placas com 70% de substituição e com o concreto de referência, reforçando o potencial da argila expandida para contribuir com o conforto térmico das edificações, além de promover a sustentabilidade ao reduzir a necessidade de climatização artificiais.

Tabela 3 - Trabalhos que pesquisaram sobre condutividade térmica de concretos com substituição de agregados graúdo:

Fonte	Tipo de Agregado	Densidade do concreto (kg/m³)	Método de medição	Condutividade térmica (W/m.k)
Sacht; Rossignolo; Santos, (2010)	Argila expandida	2.014,0-1.589,0	Fio quente paralelo	1,39-0,94
Banjad Pečur; Štirmer; Milovanović, (2015)	Agregado reciclado de concreto	2.105,0-2.064	Placa quente protegida	0,867-0,858
Zhao; Liu; Yang, (2018)	Agregado reciclado de concreto	2.243,4-2163,5	Método do fio quente	1,65-1,52
Marie, (2017)	Agregado reciclado de concreto	2.368,0-2.298,0	Placa quente protegida	1,20-0,91

Fonte: Autoria própria (2024).

A Tabela 4 demonstra o trabalho de Yüksel (2016), onde demonstra os principais métodos empregados na determinação da condutividade térmica de materiais isolantes, classificando-os em regime estacionário e regime transitório.

Tabela 4 - Métodos de medição e características:

Método	Faixa de temperatura	Incertezas	Materiais	Pontos positivos	Pontos negativos
Placa quente protegida	-180 a 1000°C	2 a 5%	Materiais de isolamento e isolantes sólidos e opacos	Alta precisão	Medição longa, tamanho de amostra grande materiais de baixa condutividade
Método do tubo	50 a 800°C	3 a 20%	Sólidos silicatos de cálcio mantas minerais e de fibras refratarias	Faixa de temperatura	Preparação de amostras, longo tempo de medição
Medidor de fluxo de calor	-30 a 80°C	3 a 10%	Isolamentos, plásticos, vidros, cerâmicas, alguns metais, rochas, polímeros e sólidos	Construção e operação simples	Medição incerta, medição relativa
Aquecimento direto	125 a 2725°C	2 a 10%	Metais, fios, varetas e tubos e condutores elétricos	Medições simples e rápidas, determinação simultânea e condutividade elétrica	Somente materiais eletricamente condutores
Fio quente	-40 a 1600°C	1 a 10%	Líquidos, vidros, sólidos, plásticos, grânulos e pós	Faixa de temperatura, rápida e preciso	Limitado a materiais de baixa condutividade
Disco quente (técnica TPS)	-240 a 930°C		Líquidos, pastas, sólidos e pós	Precisão de tempo muito curto, diferentes propriedades térmicas simultaneamente	material condutor ou isolante
Flash laser	-100 a 3000°C	1,5 a 5%	sólidos, líquidos, pós, metais líquidos, polímeros e cerâmicas	Faixa de temperatura, amostra menor, rápida, precisão em alta temperatura	Caro, não é utilizado para materiais isolantes
Foto térmico	-50 a 500°C	1 a 10%	Sólidos, líquidos, gases, filmes finos, pequenas partes da maioria dos sólidos	Utilizável para filmes finos, líquidos e gases	Fora do padrão, falta de conhecimento sobre precisão

Fonte: Yüksel (2016).

Essa sistematização permite comparar princípios de funcionamento, faixas de aplicabilidade, tempo de ensaio e limitações técnicas, servindo como referência prática para seleção do método mais adequado a cada tipo de material.

Com base na literatura técnica optou-se por utilizar o método placa quente protegida, devido ao trabalho de ASADI *et al.* (2018) que constata uma maior procura pelo método para compostos cimentícios e Yüksel (2016) que indica menor incerteza nas medições devido à complexidade do equipamento que minimiza as formas de incerteza e trabalho em estado estacionário.

6. METODOLOGIA

Para avaliar as características do concreto com agregados residuais leves, adotou-se o seguinte procedimento:

- ✓ Caracterização dos agregados
- ✓ Desenvolvimento dos traços de CAA
- ✓ Caracterização do CAA
- ✓ Desenvolvimento do equipamento Placa quente
- ✓ Caracterização da condutividade termica

Adotou-se o cimento CP V-ARI, com o propósito de fundamentar a definição dos traços de concreto e o aditivo MC-POWERFLOW 6380. Para assegurar a reprodutibilidade e a comparabilidade dos resultados, adotou-se como referência o traço comercial para resistência esperada de 25 MPa, indicado por uma usina de concreto especializada em estruturas do tipo placa-parede moldadas in loco.

Na primeira etapa de produção do CAA foram produzidos 10 traços com os agregados reciclados e a argila expandida variando em 25%, 50% e 75% de substituição ao agregado convencional.

Na segunda etapa os traços que obtiveram variação estatística em relação a sua massa específica, evidenciado pela literatura uma possível diminuição da condutividade térmica, sem afetar a resistência foram refeitos para ensaios mais detalhados quanto a suas características em estado fresco e para condutividade térmica.

6.1. Delineamento experimental

6.1.1. caracterização dos agregados

A caracterização prévia dos materiais é etapa imprescindível, pois condiciona a dosagem e a performance final do CAA. Foram utilizados dois tipos de agregado miúdo natural (areia fina e média de origem fluvial), um agregado graúdo natural beneficiado de basalto (Tipo 0, granulação máxima de 12,5 mm, ABNT NBR 7211:2019) dois tipos de agregados reciclados graúdos: agregado graúdo misto (ARM) e fragmentos de louça sanitária. Também foi utilizado um

agregado leve, a argila expandida. O cimento empregado foi o CP V-ARI, cuja norma de especificação (ABNT NBR 16697:2018) assegura ganho rápido de resistência, característica desejável em processos construtivos de desforma precoce.

A Tabela 5 elenca os procedimentos normativos para caracterização dos agregados, conforme Rizzo (2018, p. 142).

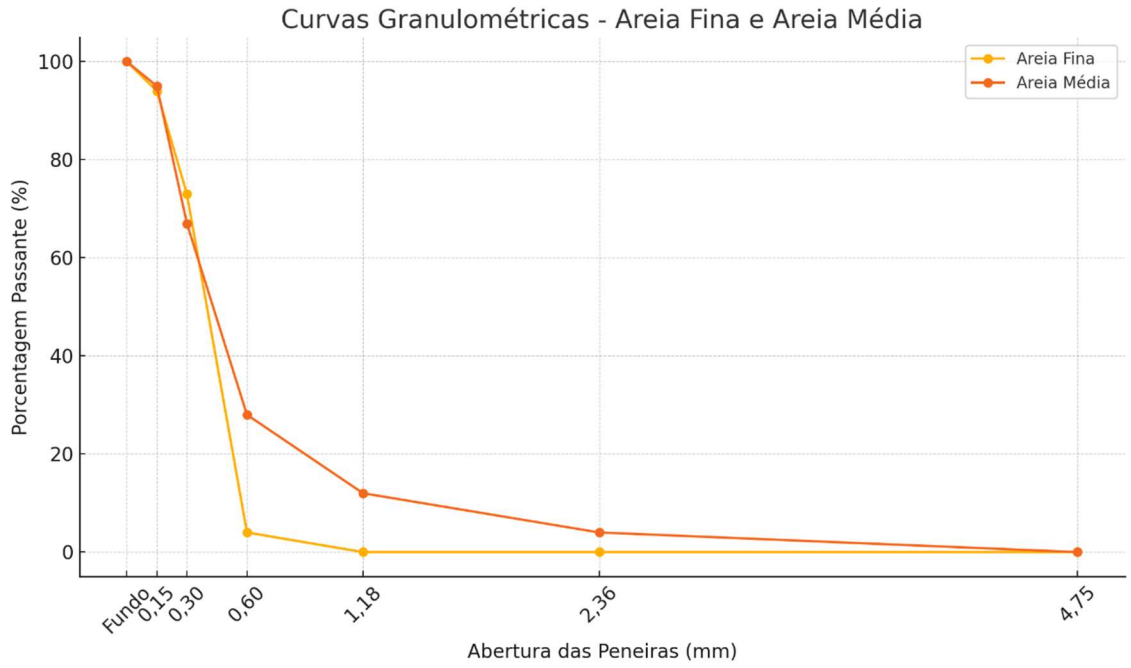
Tabela 5 - Procedimentos ABNT para caracterização dos agregados:

Característica	Miúdo	Graúdo
Granulometria	NBR 17054:2022	NBR 17054:2022
Massa especifica	NBR 16916:2021	NBR 16917:2021
Capacidade de absorção de água	NBR 16916:2021	NBR 16917:2021

Fonte: RIZZO (2018) – (adaptado).

A granulometria dos agregados foi ensaiada seguindo a ABNT NBR 17054:2022. O gráfico granulométrico para os agregados finos está demonstrado na Figura 6.

Figura 6 - Gráfico granulométrico dos agregados finos:



Fonte: autoria própria (2024).

Os agregados miúdos são classificados, segundo a NBR 7211:2022, pelo módulo de finura que reflete a distribuição granulométrica dos agregados. O

módulo de finura da areia fina foi de 1,71, e o da areia denominada de média foi de 2,06, ambas, segundo a norma, apresentam um módulo de finura na zona utilizável inferior, caracterizando-as como areia fina. Porém, com dimensão máxima da areia fina, de 0,60 mm, enquanto para a areia média foi de 2,36 mm.

A Tabela 8 demonstra a massa específica e absorção d'água dos agregados finos.

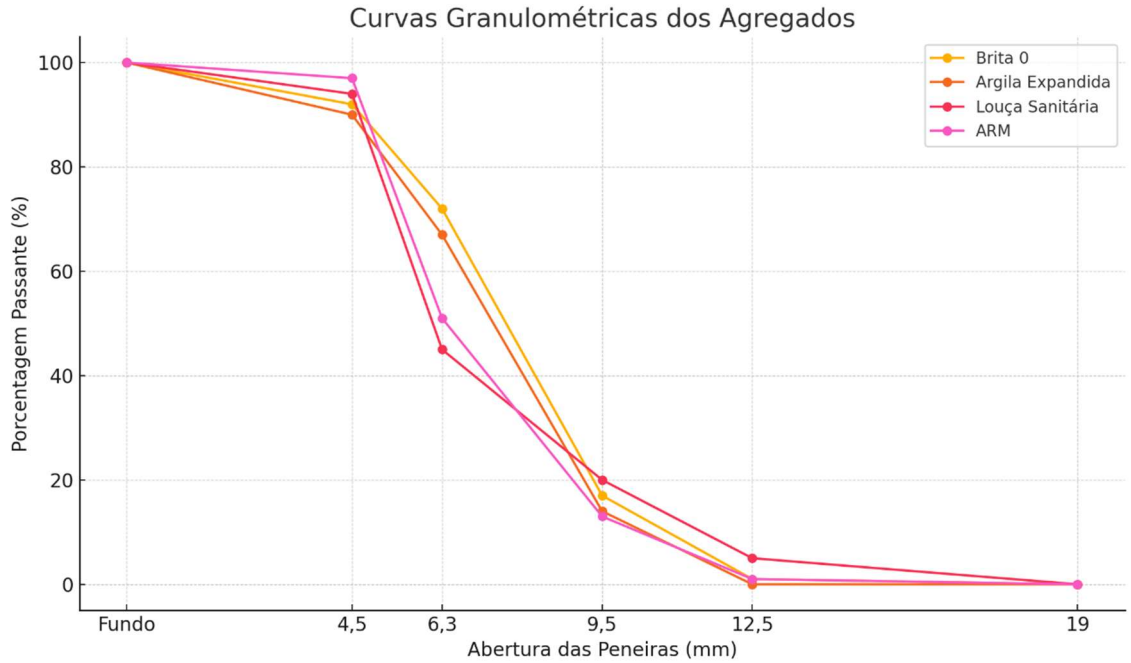
Tabela 6 - Resultados das características físicas dos agregados finos:

Agregado	Massa específica (g/cm^3)	Absorção d'água (%)
Areia fina	2,38	2,44
Areia média	2,75	2,23

Fonte: autoria própria (2024).

O gráfico de granulometria para agregados graúdos está representado na Figura 7.

Figura 7 - Gráfico granulométrico dos agregados graúdos:



Fonte: autoria própria (2024).

A dimensão máxima e composição granulométrica retida acumulada nas peneiras de todos os agregados foi de 12,5 mm correspondendo a pedriscos, o modulo de finura das peneiras normais demonstram que o pedrisco possui

modulo de finura de 5,50, enquanto a louça sanitária, argila expandida e ARM correspondem respectivamente 5,38, 5,31 e 5,49. A Tabela 9 demonstra a massa específica e absorção d'água dos agregados graúdos.

Tabela 7 - Resultados das características físicas dos agregados graúdos:

Agregado	Massa específica (g/cm^3)	Absorção d'água (%)
Brita 0/ pedrisco	2,90	1,64
Louça sanitária	2,38	2,30
ARM	2,52	8,28
Argila expandida	1,03	14,33

Fonte: autoria própria (2024).

6.1.2. Concreto auto adensável – proporção de mistura

Para investigar o efeito da substituição de agregado natural por reciclado, definiram-se três níveis de incorporação: 25 %, 50 % e 75 %, conforme estudos internacionais. A Tabela 6 apresenta a nomenclatura atribuída a cada traço, facilitando o rastreamento ao longo dos ensaios.

Tabela 8 - Nomenclatura e traços:

Nomenclatura	Agregado	Porcentagem de substituição
0-REF	Agregado natural	0
25-ARGEX	Argila expandida	25
50-ARGEX	Argila expandida	50
75-ARGEX	Argila expandida	75
25-LOSAN	Louça sanitária	25
50-LOSAN	Louça sanitária	50
75-LOSAN	Louça sanitária	75
25-ARM	Agregado reciclado misto	25
50-ARM	Agregado reciclado misto	50
75-ARM	Agregado reciclado misto	75

Fonte: autoria própria (2024).

A produção das misturas seguiu método de dosagem em massa com controle de volume de pasta e relação água/pó, respeitando-se a sequência de mistura e a incorporação fracionada do superplastificante para estabilizar a

viscosidade antes dos ensaios no estado fresco. O lançamento foi realizado sem vibração, em consonância com a natureza do CAA.

Imediatamente após a mistura, executaram-se os ensaios de fluidez (slump-flow e slump-flow T_{50}, ABNT NBR 15823-2:2017), de habilidade passante (L-box, ABNT NBR 15823-4:2017) e de resistência à segregação (coluna de segregação, ABNT NBR 15823-6:2017).

Para o estado endurecido, foram moldados e curados corpos de prova foram cilíndricos de 100 × 200 mm, conforme ABNT NBR 5738:2015. Os traços foram caracterizados conforme indicado na Tabela 7.

Tabela 9 - Normas para ensaios em estado endurecido:

Característica	Norma
Compressão axial	ABNT NBR 5739:2018
Módulo de elasticidade	ABNT NBR 8522: 2017
Massa específica aparente	
Absorção de água	ABNT NBR 9778:2005
Índice de vazios	

Fonte: autoria própria (2024).

Para análise térmica, empregou-se o método da placa quente protegida, conforme adaptado da ISO 8302:1991, em placas de 30 x 30 x 2,5 cm.

O equipamento foi construído previamente calibrado para manter gradiente térmico uniforme, e o foi fabricado em alumínio com isolação lateral, garantindo fluxo unidimensional de calor. A condutividade térmica foi medida em temperatura controlada de 25 °C, repetindo cada ensaio três vezes para assegurar reprodutibilidade estatística.

Essa abordagem permitiu identificar, com confiança metrológica, o traço que concilia melhor as propriedades reológicas, mecânicas e térmicas, cumprindo os objetivos propostos para o desenvolvimento de concretos autoadensáveis sustentáveis e termicamente eficientes.

Para assegurar a reprodutibilidade e a comparabilidade dos resultados, adotou-se como referência o traço comercial para resistência esperada de 25 MPa, indicado por uma usina de concreto especializada em estruturas do tipo placa-parede moldadas in loco. Esse traço padrão, calibrado para produção de

1 m³ de CAA, baliza não apenas a composição em massa dos constituintes — cimento, água, agregados miúdos e graúdos, aditivos superplastificantes e modificadores de viscosidade — mas também serve de base para as substituições parciais por agregados reciclados que serão avaliados. Ressalta-se que a ABNT NBR 16055 (2022) não especifica uma resistência mínima para CAA, apenas uma resistência máxima de 40 MPa.

Tabela 10 - Traço referência em massa para 1 metro cúbico:

Traço referência			
Material	**Especificação**	**Traço unitário**	**Traço (kg/m³)**
Cimento	CPV - ARI	1	350
Areia 1	Areia fina	0,9	314
Areia 2	Areia média	2,09	732
Brita	Brita 0	2,45	8856
Água	-	0,59	207
Aditivo	MC-POWERFLOW 6380	0,0071	2,50

Em uma etapa preliminar, produziu-se lotes de 25 L de cada traço visando ajustar a consistência frente às variações de capacidade de absorção de água dos diferentes materiais. A pré-molhagem dos agregados reciclados e da argila expandida foi feita considerando 80 % de sua capacidade de absorção, conforme recomendado na literatura para minimizar alterações no teor efetivo de água na pasta (RIZZO, 2018). A Tabela 11 sintetiza as correções de dosagem aplicadas em cada amostra para compensar diferenças de massa específica e absorção.

Tabela 11 - Traços corrigidos para cada amostra:

	Cimento	**Agregado graúdo natural**	**Agregado graúdo leve**			**Agregado fino natural**		**Água**	**Aditivo**
Traço	**CP V ARI**	**Brita 0**	**Argila expandida**	**Louça sanitária**	**ARM**	**Areia fina**	**Areia média**		**MC-POWERFLOW 6380**
0-REF	8,75	21,40	-	-	-	7,85	18,30	5,175	0,0625
25-ARGEX	8,75	16,05	1,90	-	-	7,85	18,30	5,175	0,0625

50-ARGEX	8,75	10,70	3,80	-	-	7,85	18,30	5,175	0,0625
75-ARGEX	8,75	5,35	5,70	-	-	7,85	18,30	5,175	0,0625
25-LOSAN	8,75	16,05	-	4,39	-	7,85	18,30	5,175	0,0625
50-LOSAN	8,75	10,7	-	8,79	-	7,85	18,30	5,175	0,0625
75-LOSAN	8,75	5,35	-	13,18	-	7,85	18,30	5,175	0,0625
25-ARM	8,75	16,05	-	-	4,65	7,85	18,30	5,175	0,0625
50-ARM	8,75	10,7	-	-	9,30	7,85	18,30	5,175	0,0625
75-ARM	8,75	5,35	-	-	13,95	7,85	18,30	5,175	0,0625

Fonte: autoria própria (2024).

Com os lotes ajustados, procedeu-se à avaliação imediata do estado fresco em 6 L de cada mistura, executando o slump-flow T_{50} segundo ABNT NBR 15823-2:2017. Essa quantidade garante volume suficiente para a condução do ensaio combinado e de eventuais repetições, sem comprometer a homogeneização da amostra.

Simultaneamente, moldaram-se nove corpos de prova cilíndricos (Ø 100 × 200 mm) por traço para os ensaios de resistência à compressão axial aos 3 e 28 dias, massa específica e absorção de água.

Tabela 12 - Quantidade de corpos de prova para ensaios na primeira etapa:

Traço	Resistência a compressão a 3 dias (ABNT NBR 5739:2018)	Resistência a compressão a 28 dias (ABNT NBR 5739:2018)	Absorção de água por imersão (ABNT NBR 9778:2005)	Módulo de elasticidade (ABNT NBR 8522-1:2021)	Massa específica (ABNT NBR 9778: 2005)	Condutividade térmica (ISO 8302: 1991)
Por traço	2	2	2	3	2	2

Fonte: autoria própria (2024).

Na segunda fase, selecionaram-se opta-se por aqueles traços que apresentaram menor massa específica sem prejuízo do desempenho mecânico, isto é, que atenderam à resistência esperada de 25 MPa.

Para essas misturas, executou-se nova rodada de ensaios de fluidez (slump-flow T_{50}) e habilidade passante (L-Box, ABNT NBR 15823-4:2017), além de coluna de segregação (NBR 15823-6:2017) para aferir coesão. A Tabela 13 apresenta o volume de concreto necessário para os ensaios no estado fresco.

Tabela 13 - Litros para ensaios de cada traço em estado fresco:

	Slump flow T500 (ABNT NBR 15823-2:2017)	Caixa L (ABNT NBR 15823-4:2017)	coluna de segregação (ABNT NBR 15823-6:2017)
Por traço	6	48	21

Fonte: autoria própria (2024).

Foram determinadas as propriedades físicas e mecânicas e de condutividade térmica, conforme Tabela 14, que apresenta também a quantidade de corpos de prova para cada traço.

Em síntese, o delineamento contempla ajuste fino da proporção de mistura, verificação sistemática das propriedades reológicas no estado fresco e caracterização completa das propriedades físicas, mecânicas e térmicas no estado endurecido, permitindo avaliar de forma integrada o impacto das substituições de agregado natural por reciclado na performance global do concreto autoadensável.

Tabela 14 - Quantitativo de corpos de prova para cada traço:

Traço	Resistência a compressão a 3 dias (ABNT NBR 5739:2018)	Resistência a compressão a 28 dias (ABNT NBR 5739:2018)	Absorção de água por imersão (ABNT NBR 9778:2005)	Módulo de elasticidade (ABNT NBR 8522-1:2021)	Massa específica (ABNT NBR 9778:2005)	Condutividade térmica (ISO 8302:1991)
Por traço	2	2	2	3	2	2

Fonte: autoria própria (2024).

Essa estratégia assegura robustez estatística aos dados de resistência, massa específica, absorção de água e condutividade térmica, avaliados posteriormente pelo método da placa quente protegida. Os corpos de prova foram mantidos em câmara úmida (ABNT NBR 5738:2015).

6.2. Desenvolvimento do equipamento para determinação da condutividade térmica

O método da placa quente protegida, formalizado pela ISO 8302:1991, estabelece-se como referência para a determinação da condutividade térmica de materiais em regime estacionário, devido à sua elevada precisão e repetibilidade. A técnica fundamenta-se na imposição de um fluxo de calor unidirecional através de uma amostra prismática ou cúbica, confinada lateralmente por isolantes térmicos. Conforme Silva e Zanette (2021), a construção de um equipamento de placa quente protegida pode ser viabilizada com componentes de uso corrente em laboratórios de construção, desde que respeitados os critérios de isotermia e equilíbrio térmico preconizados pelas normas.

O protótipo desenvolvido segue o conceito clássico de três subsistemas interdependentes, ilustrados esquematicamente na Figura 8: a placa quente central, o anel de guarda e as placas frias de condicionamento térmico.

Figura 8 - Representação da placa quente protegida:



Fonte: Silva; Zanette, (2021).

A placa quente, confeccionada em alumínio, apresenta espessura de 15 mm para otimizar a uniformidade de temperatura e minimizar gradientes transversais. No seu interior, duas resistências elétricas tubulares são distribuídas de forma concêntrica, sendo alimentadas por reguladores de tensão

independentes que asseguram estabilização rápida e controle fino da temperatura no núcleo e no anel de guarda.

No diagrama esquemático da Figura 8 pode-se observar as duas placas frias (azuis) em contato com a amostra.

As amostras ficam em contato, em suas faces opostas, com o anel de guarda (vermelho) que envolve a placa quente central.

O isolamento térmico (amarelo) ao redor de todo o conjunto, tem a função de isolar o sistema de forma que não haja interferência externa do fluxo de calor.

Essa montagem foi adaptada de Silva e Zanette (2021) para caber na estrutura de bancada do Laboratório de Materiais de Construção e Estruturas da PUC-Campinas.

O anel de guarda, foi projetado para reduzir perdas laterais e garantir que o calor flua predominantemente na direção perpendicular às superfícies. Sua temperatura é monitorada por oito termopares posicionados na interface com a placa quente, permitindo ajustes dinâmicos no fornecimento de energia elétrica ao circuito secundário de resistências. Essa estratégia, discutida por Silva e Zanette (2021), maximiza a precisão das medições ao manter o anel e a placa central praticamente isotérmicos durante o ensaio.

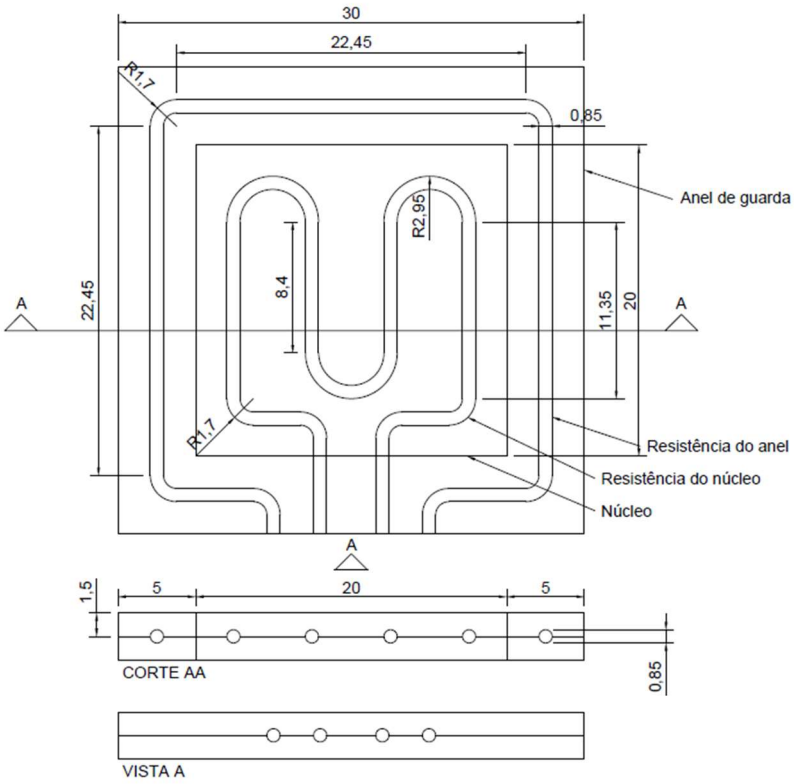
A placa quente foi concebida em duas partes: o núcleo e o anel de guarda, ambos usinados em alumínio de alta condutividade e espessura uniforme de 15 mm. O núcleo mede 200 × 200 mm e apresenta recortes semicirculares em suas faces para alojar resistências tubulares de 8,5 mm de diâmetro; sua geometria garante distribuição isotérmica no centro da amostra.

Já o anel de guarda, com dimensões externas de 300 × 300 mm e abertura interna correspondente ao perfil do núcleo, abriga uma segunda resistência que acompanha a borda do núcleo, permitindo controle independente da temperatura periférica.

Cada resistência elétrica foi projetada para encaixe preciso nos cortes semicirculares, assegurando afastamento mínimo entre o elemento gerador de calor e o metal da placa, fator importante para reduzir gradientes locais de temperatura. A independência de alimentação — núcleo e anel de guarda ligados

a reguladores de tensão distintos — possibilita ajustar finamente o equilíbrio térmico, seguindo recomendações de Silva e Zanette (2021).

Figura 9 - Representação da placa quente em centímetros:



Fonte: autoria própria (2024).

As placas frias de condicionamento, conforme ilustrado na Figura 10, foram usinadas em alumínio com canais internos em espiral para circulação de fluido refrigerante. Um sistema de recirculação por bomba de vazão constante assegura gradiente térmico estável, enquanto quatro sensores de temperatura por placa registram a diferença entre entrada e saída de calor. Esse arranjo favorece a manutenção de condições de fronteira isotérmicas na parte fria do conjunto, requisito essencial para a interpretação correta do fluxo unidirecional de calor na amostra.

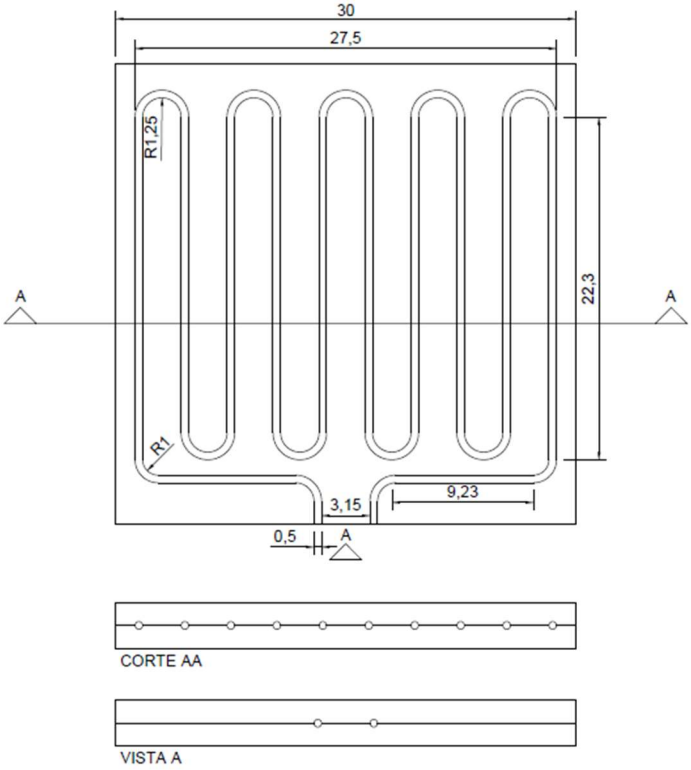
A integração dos subsistemas fundamenta-se em um bloco de montagem arrebitado, que acomoda as duas metades da placa quente, o anel isolante e as chapas frias. Em cada superfície da placa quente e do anel de guarda, oito termopares tipo DS18B20 trabalham em redundância, garantindo capturas de temperatura em pontos estratégicos que permitem avaliar a distribuição térmica e detectar eventuais zonas de não-uniformidade.

Na Figura 10 observa-se a concepção das placas frias, com dimensões iguais às do anel de guarda visando facilitar o encaixe da amostra em sanduíche. Cada placa possui canais internos em espiral, usinados em alumínio, para circulação de fluido refrigerante; esse design promove fluxo balanceado e uniforme. A bomba de vazão constante garante manutenção de temperatura próxima à do ambiente, fixando a condição de fronteira isotérmica fria necessária ao método.

Para completar a instrumentação térmica, sensores tipo DS18B20 estão distribuídos ao longo da seção A–A — sendo oito em cada face da placa quente (quatro no núcleo e quatro no anel de guarda) e quatro em cada placa fria, além de um termopar medindo a temperatura da água que circula a placa fria — gerando até 25 leituras simultâneas.

O conjunto é envolto por um isolamento lateral de 200 mm de espuma expandida e apoiado sobre uma base de compensado. Conforme recomenda a literatura normativa, tal espessura elimina perdas de calor para o ambiente e preserva a condição de regime estacionário. A carcaça externa foi projetada em compensado revestido, conferindo rigidez mecânica ao sistema sem comprometer seu desempenho térmico.

Figura 10 - Representação da placa fria em centímetros:

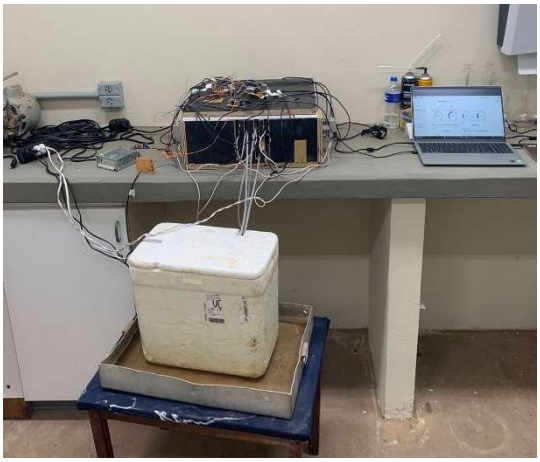


Fonte: autoria própria (2024).

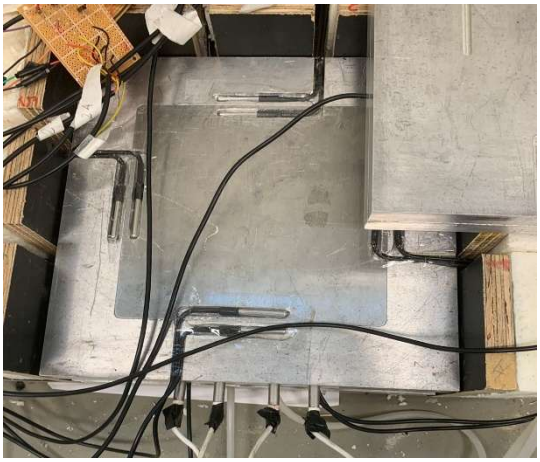
A instrumentação eletrônica, apoiada por um microcontrolador de alta resolução, faz a aquisição e registro das leituras de até 25 termopares simultaneamente, com taxa de amostragem configurável. Um software de controle, desenvolvido em linguagem Python, automatiza a rampa de temperatura e a coleta de dados, permitindo que o pesquisador atue apenas na calibração inicial e no monitoramento remoto do ensaio.

A Figura 11 demonstra o equipamento finalizado, a placa quente com a disposição dos termopares, a parte frontal do equipamento e os termopares separador por placas.

Figura 11 – (a) Equipamento placa quente (b) Placa quente e disposição dos termopares (c) parte frontal do equipamento (d) disposição dos conjuntos de termopares para cada placa:



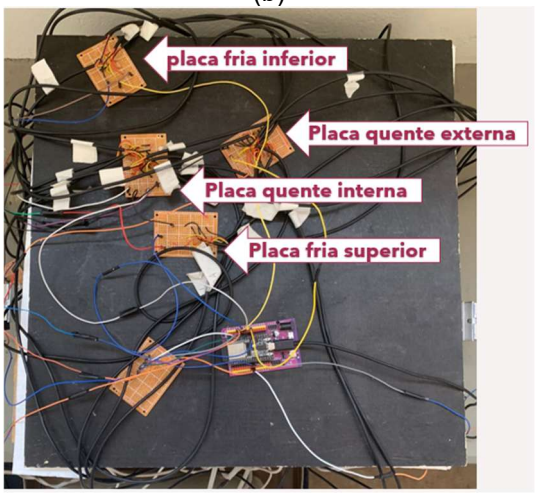
(a)



(b)



(c)



(d)

6.3. Calibração e validação do equipamento para medição de concreto

Para a calibração do equipamento foi necessário entender a fórmula de condutividade e como os dados seriam coletados.

A condutividade térmica é expressa pela equação:

$$\lambda = \frac{q/A}{\Delta T/e}$$

Onde:

λ = Condutividade térmica [W/m.K];

q = Fluxo de calor por condução [W];

A = Área [m²];

ΔT = diferença de temperatura entre faces [K];

e = espessura do corpo de prova [m];

A área que a fórmula descreve é a do núcleo do equipamento (ISO 8302:1991). Na delimitação do projeto considerou-se as medidas interna em 20x20 cm.

Em métodos estacionários a espessura influencia diretamente as incertezas, amostras muito finas amplificam a fração de resistência de contato e erros de espessura, enquanto amostras muito espessas reduzem o fluxo de calor para um ΔT dado, prolongando o tempo até o regime e pioram a razão sinal-ruído. Em ambos os extremos aumentam a incerteza, portanto, adotou-se a espessura da placa e = 2,5 cm como configuração operacional do equipamento, garantindo boa relação sinal-ruído e tempos de estabilização viáveis, sem penalizar a exatidão por contato, prática alinhada às diretrizes de ASTM C177/ ISO 8302.

Para regularizar o fluxo e limitar o aquecimento, empregou-se controle por relé (liga/desliga) nas duas resistências. O cálculo do fluxo de calor médio considera a potência elétrica efetiva dissipada quando o relé está ligado, sendo que o fluxo de calor se dá pela equação:

$$q = \frac{Wr}{\left(\frac{\mathrm{T\ ligado}}{T\ total}\right)}$$

Onde:

q = Fluxo de calor por condução [W];
Wr = Potência nominal da resistência [W]
T ligado = Tempo total em que o relé ligou durante a estabilidade térmica [s];
T total = Tempo total do experimento [s];

O tempo total do experimento em estado estacionário segundo a ISO 8302:1991 é contado por 20 repetições a cada 60 segundos totalizando 1200 segundos.

Em métodos estacionários do tipo placa quente protegida aumentar demasiadamente a potência térmica imposta tende a ampliar a incerteza por três motivos principais:

(i) Cresce a parcela radiativa e a dependência do resultado com a diferença de temperatura;
(ii) Aumentam as perdas de borda e a sensibilidade a pequenos desajustes entre placa de medição e guardas;
(iii) Alonga-se o tempo de condicionamento até um regime estável verdadeiramente unidimensional.

Por isso, adota-se faixa térmica moderada (ΔT) e temperaturas próximas da ambiência, em linha com ISO 8302/ASTM C177 e com as condições de referência para propriedades térmicas de materiais de construção.

Segundo Zhang e Li (2022) no caso do concreto, manter a placa quente igual ou abaixo de 50 °C é comumente aceito para evitar migração de umidade, não linearidades e erro por radiação, preservando a comparabilidade entre amostras no mesmo envelope operacional.

Evidenciando que o experimento é indicado para materiais homogêneos e o concreto é um material heterogêneo, levar as considerações da literatura se mostra importante para evitar erros e possíveis incertezas na coleta de dados. Porém limitar a faixa de temperatura que se trabalha indica que os materiais que podem ser usados na calibração tornam-se limitados.

Por isso foi decidido usar para a calibração o traço 0-REF, que foi ensaiado diversas vezes, configurando o código a cada ensaio, procurando por pontos de melhorias.

Durante esta etapa foi importante perceber que a faixa em que o código considera a estabilidade térmica (49 e 51°C) não pode ser a mesma faixa de trabalho do relé, pois o calor residual da resistência faz com que mesmo que seja desligado aos 51°C a temperatura continue a aumentar. Conforme os experimentos se estabeleceu uma faixa para a resistência interna de 49,1°C e 49,4°C, uma faixa curta onde o relé liga com uma frequência maior, porém evita o aumento extrapolado da temperatura.

Também se evidenciou que a faixa de temperatura do anel de contenção não deve ser o mesmo do núcleo, pois o efeito de borda faz com que o anel perca temperatura com maior rapidez que seu interior, sendo assim o relé interno não seria acionado, que por sua vez torna impossível calcular o valor do fluxo de

calor. Ainda assim mantendo uma temperatura próxima a do núcleo mitigando a perda de calor excessivo da borda em uma faixa de 47,6°C e 48,1°C, mantendo um fluxo unidirecional.

Após o primeiro alcance de um valor próximo ao normativo foi executado mais duas vezes sem alterar o código, conseguindo consecutivamente resultados sem diferença maior que 5% o equipamento foi considerado calibrado.

6.4. Análise dos resultados

Para investigar o efeito dos diferentes agregados na condutividade térmica do concreto autoadensável, adotou-se o método de Análise de Variância (ANOVA), que possibilita comparar as médias de múltiplos grupos e verificar se existem diferenças estatisticamente significativas entre elas (Montgomery, 2009). No presente trabalho, os grupos correspondem aos traços contendo argila expandida (CAA-AE), louça sanitária (CAA-LS) e agregado reciclado misto (CAA-ARM), além do traço-referência (CAA-N).

Antes de proceder ao ANOVA unifatorial, avaliou-se a suposição de normalidade dos resíduos por meio do teste de Shapiro–Wilk e a homogeneidade de variâncias com o teste de Levene.

7. RESULTADOS

7.1. Resultados da primeira etapa

Na primeira etapa foram desenvolvidas 10 misturas, avaliadas quanto à fluidez, massa específica e a resistência

Com relação à fluidez, conforme ensaio o slump flow T500, da ABNT NBR 15823-2 (2017), pode-se classificar o concreto em relação à viscosidade e à estabilidade,

A Tabela 15 demonstra as classes de viscosidade plástica aparente sob fluxo livre.

Tabela 15 - Classificação da viscosidade plástica aparente sob fluxo livre:

Classe	t500 s	Método de ensaio
VS 1	≤ 2	ABNT NBR 15823-2
VS 2	≥2	

Fonte: ABNT NBR 15823-1 (2017).

Enquanto a Tabela 16 classifica o índice de estabilidade por meio visual, para possíveis segregações e exsudações no concreto fresco.

Tabela 16 - Classificação de índice de estabilidade visual sob fluxo livre:

Classe	IEV	Método de ensaio
IEV 0	Sem evidência de segregação ou exsudação	ABNT NBR 15823-2
IEV 1	Sem evidência de segregação e leve exsudação	
IEV 2	Presença de pequena auréola de argamassa (≤ 10 mm) e/ou empilhamento de agregados no centro do concreto	
IEV 3	Segregação claramente evidenciada pela concentração de agregados no centro do concreto ou pela dispersão de argamassa nas extremidades (auréola de argamassa > 10 mm)	

Fonte: ABNT NBR 15823-1 (2017).

Os resultados de viscosidade e estabilidade são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 - Resultados do ensaio slump flow T500:

Traço	Slump Flow T500 (s)	Classes de viscosidade plástica aparente	Classes de índice de estabilidade visual
0-REF	2,9	VS2	IEV0
25-ARGEX	1,5	VS1	IEV1
50-ARGEX	1,3	VS1	IEV2
75-ARGEX	1,2	VS1	IEV2
25-LOSAN	2,1	VS2	IEV0
50-LOSAN	1,9	VS1	IEV0
75-LOSAN	1,9	VS1	IEV0
25-ARM	1,7	VS1	IEV1
50-ARM	1,9	VS1	IEV0
75-ARM	1,5	VS1	IEV1

Fonte: autoria própria (2024).

Para o método placa-parede, que envolve concretagem vertical de grande altura, a ABNT NBR 16055:2020 recomenda concretos coesos e estáveis, evitando exsudação e segregação. Assim, a classe adequada é VS2, sendo que o uso de VS1 é possível apenas em peças de baixa altura e sob controle rigoroso de coesão da mistura.

Nota-se uma diminuição no tempo de fluidez dos concretos com substituição dos agregados convencionais pelos analisados neste projeto, o que acarreta em uma classe de viscosidade mais baixa, porém com a análise de índice de estabilidade visual notou-se que enquanto o concreto referencial manteve sua integridade sem demonstrar segregação ou exsudação, em algumas substituições houve uma leve exsudação, enquanto as misturas de 50 e 75% de argila expandida apresentaram, inclusive, presença de pequenas auréolas de argamassa e empilhamento de agregados no centro do concreto, conforme Figura 12.

Figura 12 - Slump flow T500 dos traços (a) 50-ARGEX e (b) 75-ARGEX:



(a) (b)

Os resultados de absorção d'água e massa específica estão representados na Tabela 18.

Tabela 18 - Absorção d'água e massa específica:

Traço	Absorção d'água (%)	Massa especifica (g/cm³)
0-REF	1,42%	2,497
25-ARGEX	9,16%	2,382
50-ARGEX	14,17%	2,070
75-ARGEX	18,64%	1,921
25-LOSAN	2,96%	2,377
50-LOSAN	4,55%	2,319
75-LOSAN	6,02%	2,247
25-ARM	2,99%	2,419
50-ARM	3,88%	2,342
75-ARM	4,69%	2,245

Fonte: autoria própria (2024).

Observa-se que a absorção d'água aumentou para todos os concretos produzidos com substituição parcial e observa-se também que este aumento é maior conforme o aumento da porcentagem de substituição do agregado natural. Em relação a massa especifica os ensaios apontam o inverso, quanto maior a substituição, menor a massa específica.

A massa específica de cada traço foi analisada individualmente em relação ao traço referência por análise de variância ANOVA, a Tabela 19 demonstra os valores P do método anova aplicado nos resultados da massa específica:

Tabela 19 - ANOVA: Massa específica:

Traço	P-Value
25-ARGEX	0,23786
50-ARGEX	0,00632
75-ARGEX	0,00405
25-LOSAN	0,06704
50-LOSAN	0,04458
75-LOSAN	0,02118
25-ARM	0,46467
50-ARM	0,32951
75-ARM	0,03456

Fonte: autoria própria (2024).

Os valores destacados não apresentam variações estatísticas significantes em comparação ao traço referência, o que para a segunda etapa demonstra uma falta de interesse por parte do estudo em continuar com estas substituições, já que a massa especifica influência na condutividade térmica e a falta de variação apresenta a possível persistência dos padrões das características térmicas.

Da mesma forma foi aplicado ANOVA para valores de absorção de água, a Tabela 20 demonstra os valores P do método anova aplicado nos resultados da absorção d'água:

Tabela 20 - ANOVA: Absorção d'água:

Traço	P-Value
25-ARGEX	8,345E-05
50-ARGEX	0,00695
75-ARGEX	0,00034
25-LOSAN	0,00030
50-LOSAN	1,020E-05
75-LOSAN	0,00010
25-ARM	0,00086
50-ARM	0,10353

75-ARM	0,00046

Fonte: autoria própria (2024).

Os valores destacados não apresentam variações estatísticas significantes em comparação ao corpo de prova referência, o que para a segunda etapa demonstra uma falta de interesse por parte do estudo em continuar com estas substituições, já que a absorção d'água representa maior número de vazios, o que consequentemente diminui a massa específica que por sua vez influência nas características térmicas.

Os resultados de resistência a compressão axial em 3 dias estão apresentados na Tabela 21. Os traços que não apresentaram diferença estatística significativa foram realçados, indicando que possuem potencial para continuidade analítica da segunda etapa.

Tabela 21 - Resistência a compressão axial em 3 dias:

Traço	Resistência a compressão axial em 3 dias (MPa)	P valor
0-REF	26,05	
25-ARGEX	22,87	0,29858
50-ARGEX	18,05	0,11613
75-ARGEX	15,97	0,05282
25-LOSAN	14,55	0,03735
50-LOSAN	11,30	0,02455
75-LOSAN	20,31	0,19831
25-ARM	16,23	0,05475
50-ARM	15,53	0,06285
75-ARM	17,78	0,08254

Fonte: autoria própria (2024).

Dentre os resultados apresentados aquele que obteve a redução mais drástica de resistência foi a de louça sanitária com substituição de 50% representando uma perda de 57%, enquanto a menor perda representada foi de 12% para o traço com 25% de argila expandida.

Como o desmolde de placas paredes não tem uma resistência mínima normativa e está a critério do projetista, segundo o MC-fórum Online, (MC

Bauchimie Brasil, 2021) é comumente aceito por projetistas a desforma ocorra após o alcance de 2 MPa entre 14 e 16 horas.

Com base nos resultados da ANOVA aplicada à resistência à compressão axial aos 3 dias, identificou-se que alguns traços com materiais substituintes apresentaram diferenças estatisticamente significativas em relação ao traço de referência. Em aplicações que exigem resistência precoce, como o desmolde, a ausência de variação significativa é um critério importante para seleção de traços adequados.

Os resultados quanto a resistência a compressão axial em 28 dias está demonstrada na Tabela 22. Para facilitar a interpretação, os traços que não apresentaram variação estatística significativa em relação ao traço de referência foram realçados, destacando os traços que podem ser considerados para continuidade em uma segunda etapa analítica mais detalhada. Esses traços demonstram potencial de uso com menor impacto na resistência final do concreto.

Tabela 22 - Resistencia a compressão axial em 28 dias:

Traço	Resistência a compressão axial a 28 dias (MPa)	P-Value
0-REF	34,44	
25-ARGEX	25,66	0,10839
50-ARGEX	20,29	0,05703
75-ARGEX	21,31	0,05997
25-LOSAN	23,07	0,06691
50-LOSAN	23,03	0,06505
75-LOSAN	31,63	0,53700
25-ARM	23,93	0,08399
50-ARM	23,93	0,04422
75-ARM	23,65	0,13092

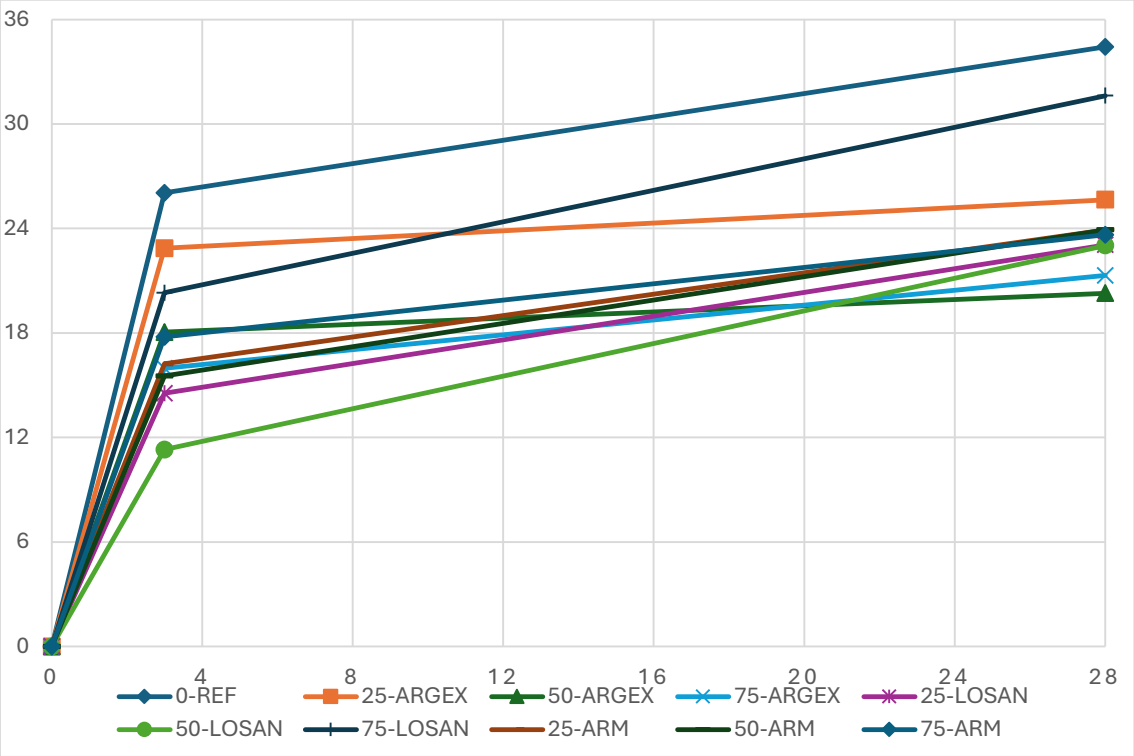
Fonte: autoria própria (2024).

Dentre os resultados apresentados nota-se que a redução de resistência de 42% para as substituições de 50% de argila expandida e 50% de ARM.

Com base nos resultados da ANOVA aplicada à resistência à compressão axial aos 28 dias, observa-se que a maioria dos traços com materiais substituintes apresentou desempenho estatisticamente equivalente ao traço de referência, indicando manutenção da resistência mecânica dentro de uma faixa aceitável. A exceção foi o traço 50-ARM, que apresentou diferença estatisticamente significativa, o que sugere perda de desempenho relevante nesse estágio de cura.

A Figura 13 demonstra o crescimento da resistência dos traços ao longo dos dias.

Figura 13 - Crescimento da resistência ao longo dos dias:



Fonte: autoria própria (2024).

Percebe-se a evolução da resistência à compressão ao longo do tempo para diferentes composições de concreto. Todas as curvas mostram um aumento na resistência, especialmente nos primeiros dias, devido ao processo de hidratação do cimento. Entre as substituições, os materiais com 25-ARGEX e 25-LOSAN mostraram desempenhos interessantes, com resistência próxima à da referência inicialmente, indicando que substituições menores podem manter

propriedades satisfatórias. Por outro lado, substituições maiores, como 75-LOSAN, apresentaram ganhos tardios significativos de resistência entre 3 e 28 dias, mostrando potencial em aplicações específicas. No entanto, substituições mais altas, como 75-ARGEX ou 75-ARM, resultaram em reduções significativas na resistência. No final do período, há uma tendência de convergência nos valores, mas a composição de referência permanece superior.

Na Tabela 23 são apresentados os resultados referentes ao modulo de elasticidade dos traços.

Tabela 23 - Modulo de elasticidade:

Traço	Modulo de elasticidade (GPa)	P-Value
0-REF	32,46	-
25-ARGEX	21,71	0,00134
50-ARGEX	20,87	0,04211
75-ARGEX	23,94	0,06655
25-LOSAN	25,85	0,00294
50-LOSAN	24,52	0,00012
75-LOSAN	31,48	0,43275
25-ARM	28,59	0,01186
50-ARM	22,47	0,00083
75-ARM	23,67	0,00282

Fonte: autoria própria (2024).

A análise dos dados da tabela sobre o módulo de elasticidade revela que o traço 0-REF apresenta o maior valor médio de módulo de elasticidade, com 32,30 GPa, indicando que os traços sem substituições possuem maior capacidade elástica. Nos traços com substituições, observa-se uma redução no módulo de elasticidade, com variações dependendo do tipo e do percentual de substituição utilizado. No caso da substituição com ARGEX, há uma redução significativa no módulo à medida que o percentual de substituição aumenta, sendo o menor valor médio registrado no traço com 50% de substituição (20,87

GPa) e o maior no traço com 75% (23,94 GPa). A substituição com LOSAN apresenta comportamento mais consistente, com valores médios próximos nos traços de 25% (25,85 GPa) e 50% (24,52 GPa), mas alcançando o maior valor médio entre os traços com substituição no traço de 75% (31,48 GPa), aproximando-se do traço de referência. Já os traços com substituição ARM mostram uma tendência variada, com o maior valor médio no traço com 50% (28,59 GPa) e o menor no traço com 75% (23,67 GPa).

De forma geral, os resultados indicam que os traços com maiores percentuais de substituição tendem a reduzir o módulo de elasticidade, com exceções como o traço LOSAN 75%, que se aproxima do valor do traço de referência. Isso sugere que a escolha do tipo de substituição e do percentual empregado impacta significativamente nas propriedades elásticas dos materiais.

7.2. Conclusão da primeira etapa

Para paredes de concreto moldadas no local, a ABNT NBR 16055:2022 fixa requisitos de projeto e execução do sistema e exige que o projetista especifique a resistência mínima necessária para a desforma na idade considerada, sem prescrever um valor numérico único — isto deve ser definido em função do projeto e do controle tecnológico adotado.

Quanto à classe resistente do concreto em serviço, vale a ABNT NBR 6118 (2023) para elementos estruturais de concreto moldado no local, a menor classe de resistência é C20. Logo, para sistemas placa-parede, o traço deve, no mínimo, atender fck ≥ 20 MPa aos 28 dias, além dos demais critérios de dimensionamento e durabilidade, porém não obteve a resistência alvo de 25 MPa do traço.

Vervloet *et al*. (2019) reportaram reduções de massa específica (~31% fresca; ~29% endurecida) e queda de resistência de ~53% aos 28 dias, quando comparado à referência. Em comparação com os resultados da 1ª etapa, as composições com ARGEX em teores elevados também reduziram a resistência aos 28 dias, chegando a aproximadamente 20–21 MPa, isto é, ainda no patamar C20, porém com penalização mecânica que exige parcimônia no teor de substituição para aplicações estruturais.

Ahmad *et al*. (2023) apresentaram faixas de 6,5–24,3 MPa com densidades entre 739 e 1 316 kg/m³; parte dessas misturas fica abaixo de C20, ilustrando que reduções agressivas de densidade tendem a comprometer o atendimento estrutural — consistente com a queda mais acentuada dos nossos traços com 75-ARGEX e 75-ARM.

Conclui-se que a segunda etapa deve concentrar-se nos traços que evidenciaram variação física relevante — redução de massa específica e/ou aumento de absorção/porosidade — por indicarem potencial de menor condutividade térmica e traços que não obtiveram perda mecânica que inviabilize o uso estrutural. Esse critério prioriza ganhos de desempenho térmico preservando a integridade do sistema placa-parede e a classe resistente de projeto. Além disso, assegura base comparável para a análise custo-benefício entre leveza, resposta térmica e capacidade portante.

Com esse enfoque, seguem para a segunda etapa os traços 0-REF, 25-ARGEX, 75-ARGEX, 75-LOSAN e 75-ARM. O 25-ARGEX foi selecionado por combinar alteração física favorável com estabilidade mecânica. 75-LOSAN agrega cenário com resíduo cerâmico de alta substituição mantendo comportamento estrutural compatível. 75-ARGEX e 75-ARM entram para mapear o limite prático de redução de densidade/elevação de porosidade ainda que com desempenho estrutural limitante, permitindo quantificar o compromisso entre leveza e resistência.

7.3. Resultados da segunda etapa

Considerando que o objetivo do projeto é avaliar a influência da substituição de agregados na redução da condutividade térmica do concreto, a escolha dos traços para a segunda etapa foi realizada com base em dois critérios principais: a identificação de variação estatisticamente significativa nas propriedades físicas, indicando potencial para melhoria do desempenho térmico, e a ausência de variação significativa na resistência à compressão, assegurando comportamento mecânico compatível com o traço de referência.

Com base nesses parâmetros, foram selecionados os traços 75% ARM, 75% ARGEX, 75% LOSAN, 25% ARGEX e o traço de referência para continuidade da análise.

Tabela 24 - Resultados do ensaio slump flow T500 (segunda etapa):

Traço	Slump Flow T500 (s)	Classes de viscosidade plástica aparente	Classes de índice de estabilidade visual
0-REF	2,3	VS2	IEV0
25-ARGEX	1,7	VS1	IEV1
75-ARGEX	1,1	VS1	IEV3
75-LOSAN	1,9	VS1	IEV1
75-ARM	2,1	VS2	IEV1

Fonte: autoria própria (2025).

A Tabela 24 apresenta os resultados do slump flow T500 dos traços da segunda etapa. O traço 0-REF obteve tempo de 2,3 s, com viscosidade mais elevada e ausência de sinais visuais de segregação. Os traços 25-ARGEX, 75-ARGEX, 75-LOSAN e 75-ARM apresentaram maior fluidez, com tempos entre 1,1 s e 2,1 s.

O traço 75-ARGEX, com menor tempo (1,1 s), apresentou o mais alto grau de instabilidade visual, indicando separação significativa entre pasta e agregados. Já os traços 25-ARGEX, 75-LOSAN e 75-ARM mantiveram estabilidade visual moderada, sugerindo coesão suficiente para evitar segregação. Os resultados indicam que a substituição por agregados alternativos influencia diretamente o desempenho reológico das misturas, exigindo equilíbrio entre fluidez e estabilidade no estado fresco. A Figura 14 demonstra a diferença entre a estabilidade visual do traço referência em relação ao 75-ARGEX.

Figura 14 - Slump flow T500 dos traços (a) 0-REF e (b) 75-ARGEX:



(a) (b)

O ensaio da Caixa L foi utilizado para avaliar a capacidade de passagem dos concretos autoadensáveis em ambientes com presença de armaduras, conforme definido na ABNT NBR 15823-2. A classificação dos resultados segue os critérios estabelecidos pela norma, conforme apresentado na Tabela 25.

Tabela 25 - Classificação do ensaio Caixa L:

Classe	Caixa L	Aplicação
PL2	≥0,80, com três barras de aço	Adequada para a maioria das aplicações correntes. Elementos estruturais com espaçamentos de armadura de 60 mm a 80 mm

Fonte: ABNT NBR 15823-2 (2020) (Adaptado).

Essa classificação orienta a aplicação das misturas com base no índice obtido no ensaio, considerando a presença de três barras de aço.

A classe PL2, por exemplo, é indicada para elementos estruturais com espaçamentos de armadura entre 60 mm e 80 mm, sendo considerada adequada para a maioria das aplicações correntes.

A Tabela 26 apresenta os resultados do ensaio Caixa L.

Tabela 26 - Resultados do ensaio Caixa L:

Traço	Caixa L
0-REF	0,71

25-ARGEX	0,88
75-ARGEX	0,98
75-LOSAN	0,82
75-ARM	0,40

Fonte: autoria própria (2025).

Tabela 27 - Classes de habilidade passante do CAA em função de sua aplicação:

Classe de habilidade passante	Caixa-L	Aplicação	Exemplo
PL 2/ PJ 1	≥0,80, com três barras de aço	Adequada para a maioria das aplicações correntes. Elementos estruturais com espaçamentos de armadura de 60 mm a 80 mm	Vigas, pilares, tirantes, indústria de pré-fabricados

Fonte: ABNT NBR 15823-1 (2017) (Adaptado).

Os traços 25-ARGEX, 75-ARGEX e 75-LOSAN atendem aos critérios da Classe PL2, sendo considerados aptos para aplicação em elementos estruturais com espaçamentos de armadura entre 60 mm e 80 mm. Esses resultados indicam desempenho satisfatório em termos de capacidade de passagem, mesmo nos traços com elevados teores de substituição por agregados alternativos.

O traço 0-REF apresentou valor inferior ao limite estabelecido para a Classe PL2, mas com aproximação ao valor mínimo exigido. Isso indica uma restrição moderada à passagem entre armaduras, podendo ser aceitável em elementos com menor densidade de armadura ou com espaçamentos superiores aos valores de referência da norma.

O traço 75-ARGEX apresentou o melhor desempenho no ensaio da Caixa L, indicando elevada capacidade de passagem. No entanto, esse mesmo traço obteve índice de estabilidade visual elevado (IEV3) no slump flow T500, o que revela tendência significativa à segregação.

Embora o tempo de escoamento reduzido evidencie alta fluidez, a baixa coesão da mistura pode comprometer a homogeneidade do concreto durante a aplicação. Portanto, apesar do bom desempenho na passagem entre armaduras,

o uso deste traço requer cautela em situações que demandem maior estabilidade no estado fresco.

A Tabela 28 apresenta os critérios de classificação das misturas de concreto autoadensável quanto à suscetibilidade à segregação por restrição à passagem, conforme a ABNT NBR 15823-2.

Essa classificação considera o percentual de material retido na peneira, a distância de lançamento e o espaçamento entre armaduras, sendo agrupada nas classes SR1 e SR2, de acordo com o nível de exigência da aplicação.

Tabela 28 - Classificação do ensaio Coluna de segregação:

Classe	Material retido na peneira %	Distância a ser percorrida (m)	Espaçamento entre armaduras (Mm)	Exemplo
SR1	≤20	<5	>80	Lajes de pequena espessura Estruturas convencionais de pouca complexidade
SR2	≤15	>5	>80	Elementos de fundações profundas Pilares, paredes e elementos estruturais complexos Elementos pré-fabricados
		<5	<80	

Fonte: ABNT NBR 15823-1 (2020).

A avaliação da estabilidade do concreto autoadensável frente à segregação por restrição à passagem foi realizada por meio do ensaio de retenção de material na peneira, conforme metodologia descrita na ABNT NBR 15823-6. Este ensaio tem por finalidade quantificar a porcentagem de partículas sólidas que se separam da matriz fluida, depositando-se no fundo do recipiente. A Tabela 29 apresenta os percentuais obtidos para cada traço avaliado, bem como sua respectiva classificação, quando aplicável.

Tabela 29 - Resultados do ensaio de Coluna de segregação:

Traço	Resultados	Classe
0-REF	18,52%	SR1
25-ARGEX	28,57%	*
75-ARGEX	23,53%	*
75-LOSAN	18,75%	SR1
75-ARM	19,26%	SR1

Fonte: autoria própria (2025).

Os traços 0-REF, 75-LOSAN e 75-ARM apresentaram valores de material retido na peneira inferiores a 20%, sendo enquadrados na Classe SR1, conforme os critérios da ABNT NBR 15823-2. Isso indica baixa suscetibilidade à segregação por restrição à passagem e torna esses traços adequados para aplicações com menor complexidade geométrica e espaçamentos de armadura mais amplos.

Já os traços 25-ARGEX e 75-ARGEX apresentaram percentuais de retenção superiores ao limite estabelecido, impossibilitando seu enquadramento na Classe SR1.

No entanto, a interpretação desses resultados deve considerar as limitações inerentes ao método de ensaio. A técnica de avaliação se baseia na massa do material retido na peneira após o escoamento do concreto, o que favorece a detecção de agregados mais densos que, por ação da gravidade, se depositam no fundo do recipiente. Não considerando o volume total de agregados deslocados nem o comportamento da fração que permanece em suspensão na região intermediária da amostra.

Os resultados de absorção d'água e massa específica da segunda etapa estão representados na Tabela 30.

Tabela 30 - Absorção d'água e massa específica:

Traço	Absorção d'água (%)	Massa especifica (g/cm³)	P valor (Massa especifica)	p-valor (Absorção d'água)
0-REF	1,61%	2,507	-	-
25-ARGEX	6,98%	2,378	0,00086	4,603E-05
75-ARGEX	17,90%	1,993	9,471E-05	8,002E-06
75-LOSAN	6,10%	2,309	0,00247	9,920E-06
75-ARM	5,39%	2,299	0,00170	0,00015

Fonte: autoria própria (2025).

Os resultados obtidos reiteram o comportamento identificado na primeira etapa do estudo, evidenciando variações significativas na massa específica em comparação ao 0-REF. As substituições promovidas nos traços 25-ARGEX, 75-ARGEX, 75-LOSAN e 75-ARM impactaram diretamente essa propriedade, demonstrando que a incorporação dos diferentes agregados altera de forma consistente a densidade do concreto.

Os resultados apresentados evidenciam variações estatisticamente significativas nos valores de absorção d'água em relação ao referencial. As substituições realizadas nos traços resultaram em diferenças consistentes, confirmando a influência dos agregados incorporados sobre essa propriedade. Esses dados corroboram as tendências já observadas em etapas anteriores do estudo.

Os resultados quanto a resistência a compressão axial em 3 e 28 dias está apresentada na Tabela 31.

Tabela 31 - Resistencia a compressão axial em 3 e 28 dias:

Traço	Resistencia a compressão axial em 3 dias (MPa)	P valor	Resistencia a compressão axial em 28 dias (MPa)	P valor
0-REF	22,25	-	28,90	-
25-ARGEX	19,83	0,41350	27,59	0,10033
75-ARGEX	15,88	0,02887	21,02	0,00892
75-LOSAN	15,06	0,00884	28,23	0,26818
75-ARM	17,16	0,00063	23,06	0,00636

Fonte: autoria própria (2025).

A segunda etapa experimental reafirmou os comportamentos observados na fase inicial quanto à resistência à compressão axial em 3 dias. As reduções em relação ao traço 0-REF variaram de 10,88% para o traço 25-ARGEX até 32,31% para o 75-LOSAN, com destaque também para os traços 75-ARGEX e 75-ARM, que apresentaram perdas de 28,63% e 22,88%, respectivamente. Esses resultados estão em conformidade com as tendências previamente identificadas, confirmando que a incorporação de agregados alternativos compromete o desempenho mecânico inicial. A consistência entre as duas etapas reforça a validade da seleção dos traços para os ensaios complementares da pesquisa.

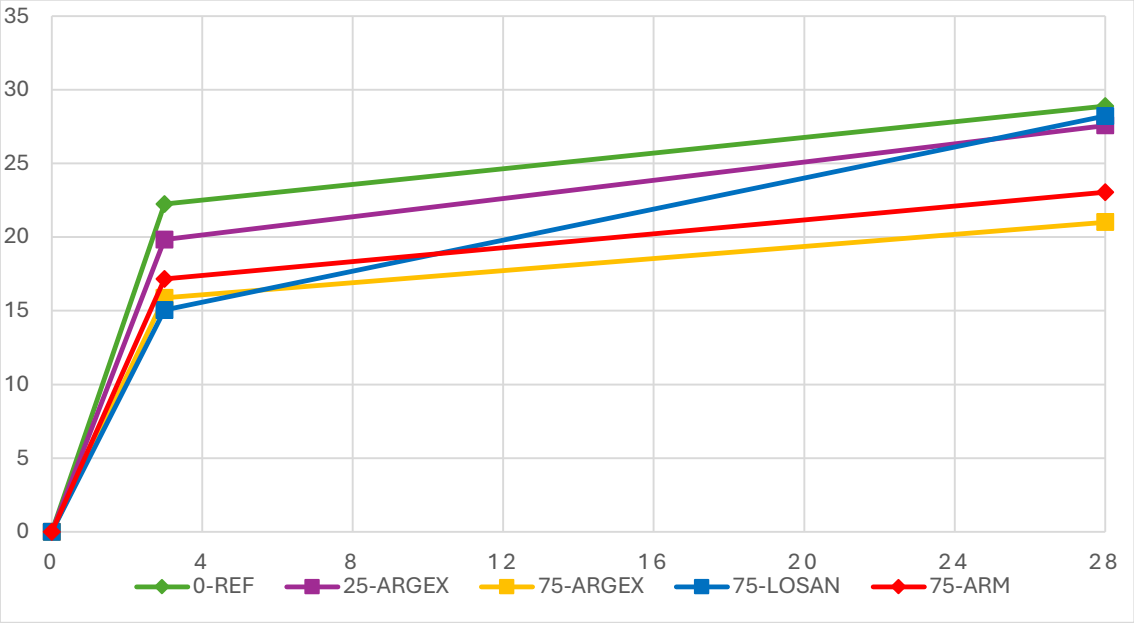
A análise estatística da resistência à compressão axial em 3 dias demonstrou que, na segunda etapa, a maioria dos traços avaliados apresentou diferenças significativas em relação ao traço de referência. Os resultados reforçam a tendência da primeira fase do estudo, indicando que o aumento no teor de substituição está associado à amplificação das variações estatisticamente relevantes. Esse comportamento confirma a sensibilidade da

resistência inicial às alterações na composição do concreto e valida a seleção dos traços utilizados na etapa subsequente da pesquisa.

A análise indicou variação estatística significativa, ao nível de 5%, para os traços 75-ARGEX e 75-ARM em relação à referência, com p-valores inferiores a 0,05. Os traços 25-ARGEX e 75-LOSAN não apresentaram diferença significativa, sugerindo desempenho equivalente ao traço 0-REF nas condições avaliadas. Esses resultados contribuem para a seleção de composições com desempenho estatisticamente inferior ou compatível ao concreto convencional.

A Figura 15 demonstra o crescimento da resistência dos traços ao longo dos dias.

Figura 15 - Crescimento da resistência ao longo dos dias:



Fonte: autoria própria (2025).

A Figura 15 demonstra a cinética de ganho de resistência e corrobora, na segunda etapa, a tendência do 75-LOSAN: incremento expressivo entre 3 e 28 dias, atingindo valor final próximo ao do traço de referência. Tal comportamento é compatível com a presença de frações finas geradas no processo de britagem do resíduo de louça sanitária, que atuam como microfíler, adensando a matriz e reduzindo vazios capilares ao longo da cura. Além do efeito físico, é plausível a contribuição de atividade pozolânica dessas frações finas — hipótese sustentada

por resultados de iniciação científica que identificaram reatividade pozolânica em resíduos de louça sanitária finamente moídos, com indicativos de formação adicional de produtos cimentícios (STECK, 2022).

A **Tabela 32** demonstra os resultados referente ao modulo de elasticidade dos traços.

Tabela 32 - Modulo de elasticidade:

Traço	Módulo de elasticidade (GPa)	P valor
0-REF	27,03	
25-ARGEX	26,92	0,891435075
75-ARGEX	17,22	0,001068954
75-LOSAN	26,51	0,626566161
75-ARM	21,48	0,000489822

Fonte: autoria própria (2025).

Os traços 25-ARGEX e 75-LOSAN apresentaram valores próximos ao do 0-REF, com 26,92 GPa e 26,51 GPa, respectivamente, indicando que, mesmo com substituições parciais ou totais por agregados alternativos, é possível manter a rigidez do concreto em níveis compatíveis com os concretos convencionais.

Em contrapartida, os traços 75-ARGEX e 75-ARM apresentaram reduções significativas no módulo de elasticidade, com valores de 17,22 GPa e 21,48 GPa, respectivamente. Essa redução está associada à menor rigidez dos agregados utilizados nesses traços, refletindo em uma matriz com menor capacidade de deformação elástica controlada. Esses resultados sugerem atenção quanto ao uso de substituições elevadas em aplicações que demandam desempenho mecânico compatível com esforços lineares e controle de deformações.

Conforme demonstrado na Tabela 39, apenas os traços 75-ARGEX e 75-ARM apresentaram variação estatística significativa em relação ao módulo de elasticidade do traço referência, o que indica redução consistente dessa propriedade. Por sua vez, o traço 75-LOSAN, mesmo com elevado teor de substituição, manteve desempenho compatível, evidenciando estabilidade no comportamento elástico.

Após a construção e configuração do equipamento de placa quente protegida, procedeu-se à determinação da condutividade térmica aparente dos concretos autoadensáveis em regime permanente, os resultados estão na Tabela 33.

Tabela 33 - Condutividade térmica:

Traço	Condutividade térmica (W/(m·K))	Valor-P
0-REF	1,867	
25-ARGEX	1,619	0,13496
75-ARGEX	1,393	0,04677
75-LOSAN	1,741	0,38262
75-ARM	1,593	0,13344

Fonte: autoria própria (2025).

A partir da análise comparativa com o traço de referência (0-REF), observa-se redução da condutividade térmica nos concretos com substituição parcial do agregado graúdo por materiais leves e residuais. As reduções percentuais em relação ao traço de referência foram de 13,28 % para o 25-ARGEX, 25,39 % para o 75-ARGEX, 6,75 % para o 75-LOSAN e 14,68 % para o 75-ARM.

A menor condutividade foi verificada no traço 75-ARGEX (1,393 W/m·K), o que indica maior capacidade de resistência à transferência de calor, resultado associado à estrutura porosa e de baixa densidade da argila expandida, conforme descrito na literatura técnica (Sacht; Rossignolo; Santos, 2010; Banjad Pečur; Štirmer; Milovanović, 2015; ASADI *et al.* 2018).

Do ponto de vista estatístico, apenas a comparação entre 0-REF e 75-ARGEX apresentou diferença significativa ($p = 0,0468$), evidenciando que o aumento do teor de argila expandida exerceu influência relevante na condutividade térmica do concreto.

Nos traços 75-LOSAN e 75-ARM, embora as reduções percentuais (6,75% e 14,68%, respectivamente) indiquem comportamento favorável, as diferenças não foram estatisticamente significativas. Essa ausência de significância pode estar associada à heterogeneidade microestrutural dos resíduos cerâmicos e mistos, os quais apresentam maior variabilidade

granulométrica e composição mineralógica irregular, influenciando a continuidade térmica do compósito. A louça sanitária reciclada, por exemplo, possui estrutura semicristalina e superfície mais lisa, que tende a aumentar a condutividade na interface pasta-agregado; já o agregado reciclado misto contém frações de argamassa e cerâmica, com poros de diferentes dimensões, que podem compensar parcialmente o efeito térmico por meio de micro vazios, mas sem atingir a estabilidade estrutural observada na argila expandida.

De modo geral, os resultados demonstram que a incorporação de agregados leves e residuais é uma estratégia eficaz para reduzir a condutividade térmica do concreto autoadensável, contribuindo para a melhoria do desempenho térmico das edificações, em consonância com os princípios estabelecidos na ABNT NBR 15575:2021 (Edificações Habitacionais – Desempenho) e na ABNT NBR 15220-1:2024 (Desempenho Térmico das Edificações).

8. CONCLUSÃO

No conjunto dos resultados apresentados, observa-se que a substituição parcial de agregados naturais por resíduo cerâmico moído, argila expandida e agregado reciclado misto promoveu redução da condutividade térmica dos concretos autoadensáveis quando comparados ao traço de referência, sendo que estatisticamente apenas a mistura de 75-ARGEX apresentou variação estatística.

Essa resposta decorre da menor densidade e do aumento de vazios efetivos introduzidos pelas fases leves, que interrompem as pontes de condução na matriz cimentícia. Nos traços com agregado reciclado misto, o efeito foi mais dependente da composição e da variabilidade do material, reforçando a necessidade de pré-beneficiamento e controle granulométrico para estabilizar desempenho.

Em termos estatísticos, as comparações entre misturas evidenciaram diferenças significativas em pares específicos, com p-valor inferior ao nível de significância adotado, validando a tendência de redução de lambda observada.

A correlação entre massa específica, porosidade e condutividade térmica mostrou-se nítida: quanto menores a densidade e a conectividade térmica da microestrutura, menor o fluxo de calor por condução.

Apesar de algumas misturas não terem reduzido a condutividade térmica em relação ao traço de referência, os percentuais de substituição adotados foram tecnicamente validados quanto às características físicas e mecânicas. Massa específica, absorção de água, índice de vazios, resistência à compressão e módulo de elasticidade permaneceram em faixas compatíveis com a aplicação em sistemas parede de concreto, viabilizando o atendimento aos requisitos de desempenho estabelecidos pela ABNT NBR 15575 quando associados a condições adequadas de projeto.

O traço 75-LOSAN demonstrou os melhores resultados para substituição do traço referência em aplicações, o fato de um concreto com 75% de agregado proveniente de resíduo que mantenha as características mecânicas se mostra muito importante para a sustentabilidade, demonstra a possível diminuição de

extração e uso de agregados naturais, uma economia cíclica onde resíduos tem nova aplicação.

As variações nas consistências dos traços em estado fresco observadas foram coerentes com a natureza dos agregados alternativos e podem ser mitigadas por ajustes de granulometria, condição de superfície seca saturada e relação água/aglomerante, sem prejuízo da trabalhabilidade do CAA. Dessa forma, mesmo na ausência de ganho térmico, as composições avaliadas mantêm aplicabilidade prática e potencial de otimização por controle tecnológico.

Embora o corpo de prova não reproduza integralmente as descontinuidades e interfaces presentes em elementos reais, e a condição estacionária do ensaio não capture efeitos transitórios de difusividade e capacidade térmica, as evidências geradas são suficientes para orientar decisões de dosagem e de projeto com foco em conforto térmico e eficiência energética, em alinhamento aos ODSs.

A continuidade natural deste trabalho inclui investigar o papel da umidade e do envelhecimento na condutividade, estimar parâmetros dinâmicos para simulações horárias do envelope e validar, em protótipos de paredes em escala real.

Em síntese, os resultados atendem aos objetivos propostos, oferecem base técnica para especificação de materiais com menor condutividade térmica e demonstram a viabilidade de integrar agregados alternativos a sistemas parede de concreto com ganhos mensuráveis de desempenho termo energético, sem descuidar das exigências normativas vigentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREMA – Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2023. São Paulo: ABREMA, 2023. 52 p. Disponível em: https://abrema.org.br/

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 5739:** Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018, 9p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 6118:** Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. Rio de Janeiro, 2023.242p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 7211:** Agregados para concreto – Requisitos. Rio de Janeiro, 2022 10p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 7218:** Agregados — Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis. Rio de Janeiro, 2010, 3p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 8522-1:** Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação - Parte 1: Módulos estáticos à compressão. Rio de Janeiro, 2021, 24p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005, 4p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 9917:** Agregados para concreto - Determinação de sais, cloretos e sulfatos solúveis. Rio de Janeiro, 2022, 12 p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 10004-2:** Resíduos sólidos – Classificação Parte 2: Sistema Geral de Classificação de Resíduos (SGCR). Rio de Janeiro, 2024, 71p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 15116:** Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland-Requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2021, 16p.

ABNT - Associação Brasileira De Normas Técnicas. **ABNT NBR 15220-3:** Desempenho térmico de edificações — Parte 3: Zoneamento bioclimático por desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2024, 21p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 15577:** Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto. Rio de Janeiro, 2018, 15p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 15823-1:** Concreto autoadensável - Parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado fresco. Rio de Janeiro, 2017, 14p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 15823-2:** Concreto autoadensável – Parte 2: Determinação do espalhamento, do tempo de escoamento e do índice de estabilidade visual – Método do cone de Abrams. Rio de Janeiro, 2017, 7p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 15823-3:** Concreto autoadensável – Parte 3: Determinação da habilidade passante – Método do anel J. Rio de Janeiro**,** 2017, 4p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 15823-4:** Concreto autoadensável – Parte 4: Determinação da habilidade passante – Métodos da caixa L e da caixa U. Rio de Janeiro, 2017, 7p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 15823-5:** Concreto autoadensável – Parte 5: Determinação da viscosidade – Método do funil V. Rio de Janeiro, 2017, 4p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 15823-6:** Concreto autoadensável – Parte 6: Determinação da resistência à segregação – Métodos da coluna de segregação e da peneira. Rio de Janeiro, 2017, 6p.

ABNT - Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 16055**: Parede de concreto moldada no local para a construção de edificações — Requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2022. 52 p

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 16697:** Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018, 12p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 16916:** Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021, 7p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 16917:** Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021, 6p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 16973:** Agregados - Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem. Rio de Janeiro, 2021, 3p.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 17054:** Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2022, 5p.

ADESINA, Adeyemi. **Overview of the influence of waste materials on the thermal conductivity of cementitious composites**. [*S. l.*]: Elsevier Ltd, 2021.

AHMAD, Shakeel *et al.* Effect of waste ceramic sanitary ware as partial replacement of aggregates and cement in concrete. **Innovative Infrastructure Solutions**, [*s. l.*], v. 8, n. 8, 2023.

AHMAD, Muhammad Riaz; CHEN, Bing; FARASAT ALI SHAH, Syed. Investigate the influence of expanded clay aggregate and silica fume on the properties of lightweight concrete. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], v. 220, p. 253–266, 2019.

ALMEIDA, Diego Henrique de *et al.* Properties of concrete manufactured with use of ceramic sanitary ware waste as aggregate. **Revista Materia**, [*s. l.*], v. 24, n. 2, 2019.

AMRAN, M.; FEDIUK, R.; MURALI, G.; VATIN, N.; KARELINA, M.; OZBAKKALOGLU, T.; KRISHNA, R. S.; SAHOO, A. K.; DAS, S. K.; MISHRA, J. Rice Husk Ash-Based Concrete Composites: A Critical Review of Their Properties and Applications. **Crystals**, v. 11, n. 2, 168, 2021. DOI: 10.3390/cryst11020168.

ANGELIN, Andressa Fernanda. **Concreto leve estrutural: desempenhos físicos, térmicos, mecânicos e microestruturais.** 2014. 126 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia e Inovação) — Faculdade de Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas, Limeira, 2014.

ANTIQUEIRA, L. M. O. R.; SEKINE, E. S. Os “erres” pós-pandemia: princípios para sustentabilidade e cidadania. Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA), v. 15, n. 4, p. 70–79, 2020. DOI: 10.34024/revbea.2020.v15.10752.

ARAÚJO, Juliano Sousa de. **Estudo de ações sustentáveis para o exercício da construção civil com base em análise dos impactos ambientais gerados**. Guaratinguetá: UNESP – FEG, 2020. Trabalho de conclusão de curso. Disponível em: http://hdl.handle.net/11449/216856

ARAÚJO, V. M. **Práticas recomendadas para gestão mais sustentável de canteiros de obras**. 2009. Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

ASADI, I.; SHAFIGH, P.; HASSAN, Z. F. B. A.; MAHYUDDIN, N. B. Thermal conductivity of concrete—A review. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 20, p. 81–93, 2018. DOI: 10.1016/j.jobe.2018.07.002.

ASTM - American Society for Testing and Materials. **ASTM C1114-06:** Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Thin-Heater Apparatus. West Conshohocke, 2019, 10p.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM C177-19:** Standard test method for steady-state heat flux measurements and thermal transmission properties by means of the guarded-hot-plate apparatus. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2019. 13 p.

ASTM - American Society for Testing and Materials. **ASTM C528-21:** Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus. West Conshohocke, 2021, 16p.

ASTM - American Society for Testing and Materials. **ASTM D5334-22:** Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Rock by Thermal Needle Probe Procedure. West Conshohocke, 2022, 10p.

Associação Brasileira De Normas Técnicas. **ABNT NBR 16055:** Parede de concreto moldada no local para a construção de edificações: requisitos e procedimentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

AWA COMERCIAL. A maior ponte suspensa do mundo. [S.l.: s.n.], [s.d.]. Disponível em: https://site.awacomercial.com.br/a-maior-ponte-suspensa-do-mundo/. Acesso em: 21 set. 2025.

AWOYERA, Paul O.; AKINMUSURU, Joseph O.; NDAMBUKI, Julius M. Green concrete production with ceramic wastes and laterite. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], v. 117, p. 29–36, 2016.

BANJAD PEČUR, Ivana; ŠTIRMER, Nina; MILOVANOVIĆ, Bojan. Recycled aggregate concrete for nearly zero-energy buildings. **Magazine of Concrete Research**, [*s. l.*], v. 67, n. 11, p. 575–584, 2015. Disponível em: https://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/macr.14.00220.

BARTOS, P. J. M.; SÖDERLIND, L. **Environment and ergonomics**. Final report (Task 8.5) — Brite EuRam project Rational production and improved working environment through using self-compacting concrete (Proposal no. BE96-3801). [S.l.]: [s.n.], 2000. 31 p.

BELLEI, Eduardo. **Influência do uso de adição do fino de areia de descarte de fundição (ADF) no controle de exsudação e segregação de concretos auto adensáveis.** 2015. 112 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2015.

BERTOLANI, Alan Gracioli. **Concreto auto-adensável: surgimento, propriedades e utilização em obras de construção civil**. 2017. 36 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) — Universidade Anhanguera, Leme, 2017.

BORJA, Edilberto Vitorino de. **Efeito da adição de argila expandida e adições minerais na formulação de concretos estruturais leves autoadensáveis**. 2011. 231 f. Tese (Doutorado em Tecnologia de Materiais; Projetos Mecânicos; Termociências) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.

BLYNK INC. Blynk Cloud [software]. [S.l.]: Blynk Inc., [s.d.]. Disponível em: https://blynk.cloud/

BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. **Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil**. Cerâmica, v. 61, n. 358, p. 178–189, 2015. DOI: 10.1590/0366-69132015613581860.

BS EN - British Standards European Standards. **BS EN 12667:2001:** Thermal performance of building materials and products. Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods. Products of high and medium thermal resistance. London, 2001, 58p.

CABRAL JUNIOR, Marsis; TANNO, Luiz Carlos; MOTTA, José Francisco Marciano; RUIZ, Mauro da Silva; COELHO, José Mário. Panorama da indústria cerâmica de sanitários no Brasil. **Cerâmica Industrial**, v. 15, n. 5-6, p. 12–18, set. /dez. 2010.

CASTRO, Júlia Mendes; PEIXOTO, Ricardo André Fiorotti. **Thermal Properties of Cement-based Composites**. [*S. l.: s. n.*], 2019.

CAVALLINE, Tara L. *et al.* Influence of Lightweight Aggregate Concrete Materials on Building Energy Performance. **Buildings**, [*s. l.*], v. 11, n. 3, p. 94, 2021. Disponível em: https://www.mdpi.com/2075-5309/11/3/94.

CONAMA 307. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. **Resolução CONAMA nº 307**, [*s. l.*], 2002.

CORINALDESI, V.; MORICONI, G. Use of synthetic fibers in self-compacting lightweight aggregate concretes. **Journal of Building Engineering**, [*s. l.*], v. 4, p. 247–254, 2015.

CAMPANA, A. C. M. B.; SILVA, D. de S. V. A. de; AGUIRRE, J. M. T.; SÍGOLI, L. de S. M.; PEREIRA, M. T. A importância do sistema de gestão ambiental para obtenção de selos sustentáveis na construção civil: uma revisão narrativa. **Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental**, v. 11, p. 03–17, 2022. DOI: 10.19177/rgsa.v11e020223-17.

CARVALHO, Milene. **Inclusão de compósitos cimentícios em blocos estruturais cerâmicos com foco em conforto térmico.** Dissertação (Mestrado em Engenharia – área: Ciência e Tecnologia dos Materiais) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

CARVALHO, M. T. M.; SPOSTO, R. M. **Metodologia para a avaliação da sustentabilidade de habitações de interesse social com foco no projeto**. 2009. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) — Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

DALVI, M. B. **A sustentabilidade como premissa para a seleção de materiais**. 2014. Dissertação (Mestrado) — Universidad del Bío-Bío, [Concepción], 2014.

DANTAS, Jéssica Andrade. **Sistema de parede de concreto moldadas no local: variáveis intervenientes na ocorrência de fissuras** [Versão corrigida]. 2024. Dissertação (Mestrado em Ciências, Área de Concentração: Inovação na Construção Civil) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

DOMONE, P. L. Self-compacting concrete: an analysis of 11 years of case studies. **Cement and Concrete Composites**, v. 28, n. 2, p. 197–208, 2006. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2005.10.003.

EUROPEAN FEDERATION FOR SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS (EFNARC). **Specification and guidelines for self-compacting concrete**. Farnham: EFNARC, 2002.

DEY, S. *et al.* State of art review on self compacting concrete using mineral admixtures. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, [*s. l.*], v. 6, n. 1, 2021.

DI DOMENICO, Paula *et al.* Influência do agregado miúdo reciclado na resistência à compressão e porosidade do concreto. **Revista Internacional de Ciências**, [*s. l.*], v. 8, n. 1, p. 129–147, 2018.

FERREIRA, Camila Carvalho; CARLO, Joyce Correna. Aplicação de experimento fatorial como método para a definição de zonas bioclimáticas a partir do conforto térmico. **PARC: Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, SP, v. 14, p. e023005, 2023. DOI: 10.20396/parc.v14i00.8669076. Disponível em: https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/parc/article/view/8669076/30994 . Acesso em: 10 set. 2025.

FERREIRA, Enildo Tales. **Contribuição ao estudo do potencial de aproveitamento de agregados reciclados de RCC produzidos na USIBEN - João Pessoa - em concreto estrutural aplicado em lajes pré-moldadas**. 2013. Dissertação - Universidade Federal Da Bahia Faculdade De Arquitetura Programa De Pós-Graduação Em Arquitetura E Urbanismo, Salvador, 2013.

FORMWORK FOR CONCRETE. Formwork design for a suspended concrete slab. 2024. Disponível em: https://formworkforconcrete.com/formwork-design-for-a-suspended-concrete-slab/. Acesso em: 21 set. 2025.

FRANCISCO, Shandy Alexandra Morassi; ORTENZI, Altibano. **Gestão do processo de logística e montagem de edificações industrializadas modulares**. [S.l.]: Editora Dialética, 2023. 172 p. ISBN 978-65-252-9933-4. Disponível em: Google Livros. Acesso em: 10 set. 2025.

FU, Chuhao *et al.* Thermal comfort study in prefab construction site office in subtropical China. **Energy and Buildings**, [*s. l.*], v. 217, 2020.

FUNDIFERRO FORMAS. Formas para parede de concreto. Disponível em: https://fundiferroformas.com.br/formas-para-parede-de-concreto/
. Acesso em: 21 set. 2025.

FURIAN, B. O.; PIMENTEL, L. L.; FORTI, N. C. S.; JACINTHO, A. E. P. G. A. Análise do comportamento mecânico de concreto com agregado reciclado e adição de fibras de aço e de vidro AR. **Matéria** (Rio de Janeiro), v. 27, n. 1, 2022. DOI: 10.1590/1517-7076-RMAT-2021-45749.

GEOPLAST. Building concrete houses. Disponível em: https://www.geoplastglobal.com/en/solutions/formwork/building-concrete-houses/. Acesso em: 21 set. 2025.

GIDRÃO, Gustavo de Miranda Saleme. **Propriedades dinâmicas do concreto e relações com sua microestrutura**. 2015. 1–132 f. Dissertação - Universidade de São Paulo escola de engenharia de São Carlos, São Carlos, 2015.

GONÇALVES, Rodrigo Dantas Casillo. **Agregados reciclados de resíduos de concreto-um novo material para dosagens estruturais**. 2001. Dissertação - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

GONÇALVES, Grégory *et al.* **Patologias em parede de concreto**. [*S. l.: s. n.*], 2013.

GUESSOUM, Meriem; BOUKHELF, Fouad; KHADRAOUI, Fouzia. Full Characterization of Self-Compacting Concrete Containing Recycled Aggregates and Limestone. **Materials (Basel)**, v. 16, n. 17, art. 5842, 2023. DOI: 10.3390/ma16175842. Disponível em: https://www.mdpi.com/1996-1944/16/17/5842

HERLING, Rachel Moraes. **Impactos das alterações climáticas globais e urbanas no desempenho termoenergético de edifícios de escritórios com modo misto.** 2025. Dissertação (Mestrado em Arquitetura, Tecnologia e Cidade) — Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Campinas, 2025

ISO - International Organization for Standardization. **ISO 8302:** Thermal insulation — Determination of steady-state thermal resistance and related properties — Guarded hot plate apparatus. Geneva, 1991, 47p.

ISO - International Organization for Standardization. **ISO 22007-2:** Plastics — Determination of thermal conductivity and thermal diffusivity. Geneva, 2022, 20p.

ISO - International Organization for Standardization. **ISO 22007-3:** Plastics — Determination of thermal conductivity and thermal diffusivity. Geneva, 2008, 16p.

KUMAR, Pawan; PASLA, Dinakar; SARAVANAN, T. Jothi. Self-compacting lightweight aggregate concrete and its properties: A review. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], v. 375, 2023.

LARUCCIA, Mauro Maia. Sustentabilidade e impactos ambientais da construção civil. **Revista ENIAC Pesquisa**, Guatulhos, v. 3, n. 1, p. 69–84, 2014.

LIU, Zhen; CHEN, Yue; WANG, Min; ZHAO, Hao; LI, Wei. Impact of exterior envelope thermal performance on energy demand and optimization strategies for university teaching-office buildings. **Scientific Reports**, v. 15, n. 2254, p. 1–12, 2025. DOI: 10.1038/s41598-025-00045-y

LÓPEZ-UCEDA, Antonio *et al.* Properties of non-structural concrete made with mixed recycled aggregates and low cement content. **Materials**, [*s. l.*], v. 9, n. 2, 2016.

LUCAS, Cláudio Nelson Mateus; AZAMBUJA, Maximiliano dos Anjos; SCALON, Vicente Luiz. Measurement of thermal conductivity in lightweight concrete produced with ground stone residue. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, [*s. l.*], v. 9, n. 74, 2021. Disponível em: https://publicacoes.amigosdanatureza.org.br/index.php/gerenciamento_de_cidades/article/view/3028.

HO, D. W. S.; A. M. M.; TAM, C. T. The sandwich concept of construction with SCC. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 10, p. 1377–1381, 2001.

LIMA, M. C. A.; SILVA, A. K. B.; SILVA JUNIOR, M. A. B. Certificação ambiental de habitações: um instrumento para ações sustentáveis na construção civil. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 16, n. 2, 2020. DOI: 10.17271/1980082716220202326.

LOPES, J.; OLIVEIRA, R.; ABREU, M. I. The sustainability of the construction industry in Sub-Saharan Africa: some new evidence from recent data. **Procedia Engineering**, v. 172, p. 657–664, 2017. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.02.077.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Técnicas de pesquisa: planejamento e execução de pesquisas, amostragens e técnicas de pesquisas, elaboração, análise e interpretação de dados**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

MARIE, Iqbal. Thermal conductivity of hybrid recycled aggregate – Rubberized concrete. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], v. 133, p. 516–524, 2017.

MARQUES, C. T.; GOMES, B. M. F.; BRANDLI, L. L. Consumo de água e energia em canteiros de obra: um estudo de caso do diagnóstico a ações visando à sustentabilidade. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 4, p. 79–90, 2017. DOI: 10.1590/s1678-86212017000400186.

MARTÍNEZ-LAGE, Isabel; VÁZQUEZ-BURGO, Pablo; VELAY-LIZANCOS, Mirian. Sustainability evaluation of concretes with mixed recycled aggregate based on holistic approach: Technical, economic and environmental analysis. **Waste Management**, [*s. l.*], v. 104, p. 9–19, 2020.

MARTINS, Bruno Soares. **A geometria das dimensões de pisos e revestimentos como fator modular de diminuição dos resíduos na construção civil.** 2018. 172 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Pato Branco, 2018. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/3584

MEDINA, César; SÁNCHEZ DE ROJAS, María Isabel; FRÍAS, Moisés. Freeze-thaw durability of recycled concrete containing ceramic aggregate. **Journal of Cleaner Production**, [*s. l.*], v. 40, p. 151–160, 2013.

MEENA, R. V.; JAIN, J. K.; CHOUHAN, H. S.; BENIWAL, A. S. Use of waste ceramics to produce sustainable concrete: A review. **Cleaner Materials**, v. 4, p. 100085, 2022. DOI: 10.1016/j.clema.2022.100085

MINAYO, M. C. S. Ciência, técnica e arte: o desafio da pesquisa social. In: MINAYO, M. C. S. (org.). **Pesquisa social: teoria, método e criatividade**. 22. ed. Petrópolis: Vozes, 2003. p. 9–29.

NASCIMENTO, E. R. do; MORAIS, D. P. F. de; LOPES, S. C. Sustainability in civil construction in Brazil: a review of the literature. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 14, p. e524111436611, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i14.36611.

NEO FORMAS. Forma metálica para concreto: preço. Disponível em: https://www.neoformas.com.br/forma-metalica-concreto-preco. Acesso em: 21 set. 2025.

NEPOMUCENO, M. C. S.; OLIVEIRA, L. A. P.; LOBO, A. V. Methodology for the mix design of self-compacting concrete using different mineral additions in binary blends of powders. **Construction and Building Materials**, v. 64, p. 82-94, 2014.

OKAMURA, H.; OUCHI, M. Self-compacting concrete. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 1, n. 1, p. 5–14, 2003.

OLIVEIRA, Gabrielli Tápia de; SCHIMANOWSKI, Eric Renã Zavitzki; PIOVESAN, Tenile Rieger; LOPES, Diorges Carlos. Isolamento térmico em placas de concreto produzido com agregado leve. **IX Encontro de Sustentabilidade em Projeto – ENSUS 2021.** Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, maio de 2021. p. 109-119.

ORIOLI, Monigleicia Alcalde; FURLAN, Ana Paula; TAVARES, André Lapa de Moraes; PEREIRA FILHO, João Domingos. Estudo do uso de agregado reciclado misto (ARM) em misturas solo-agregado. In: **Congresso De Pesquisa E Ensino Em Transportes da AMPET**, Gramado, 2018.

ORDENES, Martin; LAMBERTS, Roberto; GÜTHS, Saulo. **Transferência de calor na envolvente da edificação.** Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2008.

ORTIGARA, Yuri Vilas Boas *et al.* Influence of the use of sanitary ware waste in self-compacting concrete production. **Materials Today: Proceedings**, [*s. l.*], v. 65, p. 511–519, 2022.

PACIOS, A. Optimization of in situ constructions system to benefit from SCC technology. In: **Fourth International Rilem Symposium On Self-Compacting Concrete** (SCC 2005), Chicago, 2005. Proceedings… Bagneux: RILEM Publications, 2005.

PEIXOTO, Lorena Karla Soares. **Avaliação dos parâmetros de durabilidade frente ao ataque por íons cloreto em concreto autoadensável com uso de agregados reciclados de resíduos da construção civil**. 2023. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Natal, 2023.

PELISSARI, Viviane. **Propriedades de concretos produzido através da utilização de agregados reciclados de concreto**. 2016. Dissertação - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

PIMENTEL, L.L. Durabilidade de concreto produzido com resíduos de construção. In: Antonio Ludovico Beraldo. (Org.). **Utilização de resíduos agroindustriais na construção**. 1ed.Campinas: Editora da UNICAMP, 2020, v. 1, p. 145-174.

PINHEIRO, Karla Kamila Barros. **Estudo da condutividade térmica em concreto com diferentes densidades**. 2023. Monografia — Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Centro de Tecnologia, Maceió, 2023.

RASHID, Khuram *et al.* Experimental and analytical selection of sustainable recycled concrete with ceramic waste aggregate. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], v. 154, p. 829–840, 2017.

REAL, S.; BOGAS, J. A.; GOMES, M. G.; FERRER, B. Thermal conductivity of structural lightweight aggregate concrete. **Magazine of Concrete Research**, London, v. 68, n. 15, p. 798–808, 2016. DOI: 10.1680/jmacr.15.00424.

RIBEIRO DE CARVALHO, Aldo *et al.* **Uso do BIM para estudo de desempenho térmico aliado à análise orçamentária de sistemas construtivos em edificações**. [*S. l.: s. n.*], 2023. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/378520349.
.
RIZZO, Giovanna Falzetta. **Durabilidade de concretos com agregados reciclados.** 2018. 156 f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana) – Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2018.

ROCES, Elías *et al.* Lightweight expanded clay aggregate properties based on laboratory testing. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], v. 313, 2021.

RODRÍGUEZ-ROBLES, Desirée *et al.* Effect of mixed recycled aggregates on mechanical of recycled concrete. **Magazine of Concrete Research**, [*s. l.*], v. 67, n. 5, p. 247–256, 2015.

ROQUE, Rodrigo Alexander Lombardi; PIERRI, Alexandre Coan. Intelligent use of natural resources and sustainability in civil construction. **Research, Society and Development**, v. 8, n. 3, p. e3973803, 2019. DOI: 10.33448/rsd-v8i3.703

SOBOTKA, A.; SAGAN, J. Cost-saving environmental activities on construction site: cost efficiency of waste management: case study. **Procedia Engineering**, v. 161, p. 388–393, 2016.

TAGLIANI, Simone. Concreto Auto Adensável: como usar e quais as principais vantagens? Engenharia 360, 22 mar. 2021. Atualizado em 27 mar. 2024. Disponível em: https://engenharia360.com/o-que-e-concreto-auto-adensavel/. Acesso em: 21 set. 2025.

TAVARES, A. L. N. R.; CLAUDINO, C. M. de A.; DINIZ, M. I. L.; SENA, T. de S. **Estudo sobre usina de reciclagem de resíduos da construção civil e demolição no estado da Paraíba**. In: CONGRESSO NACIONAL DE PESQUISA E ENSINO EM CIÊNCIAS (CONAPESC), 1., 2016, Campina Grande. Anais […]. Campina Grande: Realize Editora, 2016.

SACHT, H. M.; ROSSIGNOLO, J. A.; SANTOS, W. N. Avaliação da condutividade térmica de concretos leves com argila expandida. **Matéria** (Rio de Janeiro), v. 15, n. 1, p. 31–39, 2010. DOI: 10.1590/S1517-70762010000100005.

SANTOS, Tamillys Roberta Souza; MILANI, Ana Paula da Silva. **Recomendações de uso do agregado reciclado misto em elementos construtivos para construção civil e pavimentação**. 2023. 1–16 f. - Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, MS, 2023.

SCOBAR, Renan Luna. **Concreto leve estrutural: substituição do agregado graúdo convencional por argila expandida**. 2016. 47 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2016.

SCHUMACHER, Katrin *et al.* Lightweight aggregate concrete with an open structure and a porous matrix with an improved ratio of compressive strength to dry density. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], v. 264, 2020.

SHAFIGH, Payam *et al.* A comparison study of the fresh and hardened properties of normal weight and lightweight aggregate concretes. **Journal of Building Engineering**, [*s. l.*], v. 15, p. 252–260, 2018.

SILVA, Paulo Eduardo Mezzomo da**. Desempenho térmico de edificações residenciais: análise da influência de sistemas de parede, padrões de uso e operação e métodos de modelagem para simulação**. 2021. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo, 2021.

SILVA, Pedro; BRITO, Jorge de. A influência da porosidade na durabilidade do betão auto-compactável (BAC). In: **bac2010–2º Congresso Ibérico sobre betão auto-compactável**. 2010. p. 1-10.

SILVA, Rafael Tavares da; ZANETTE, Thiago Gomes. **Projeto de um aparato experimental para obtenção da condutividade térmica em materiais de construção civil pelo método de placa quente protegida**. 2021. 1–173 f. Trabalho de conclusão de curso - Instituto do Espírito Santo, Cachoeiro de Itapemirim, 2021. Disponível em: https://repositorio.ifes.edu.br/handle/123456789/1235. Acesso em: 20 nov. 2024.

SOUZA, Amanda Silva; CARVALHO, Carlos Maviael de. Concreto autoadensável de baixa densidade para aplicação em painéis de vedação pré-fabricados. **Revista InterScientia**, João Pessoa, v. 5, n. 1, p. 75–91, 2017. ISSN 2317-7217.

STECK, A. C. A.; PIMENTEL, L. L. UHPC produzido com substituição parcial da sílica ativa por resíduo cerâmico. In: **Encontro De Iniciação Científica, 27**.; Encontro De Iniciação Em Desenvolvimento Tecnológico E Inovação, 12., 2022, Campinas.

TAYEH, Bassam A. *et al.* Effect of elevated temperatures on mechanical properties of lightweight geopolymer concrete. **Case Studies in Construction Materials**, [*s. l.*], v. 15, 2021.

TUTIKIAN, Bernardo; MOLIN, Denise. **Concreto auto-adensável**. 1. ed. São Paulo: Editora PINI LTDA, 2008.

UNEP – UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Report of the Secretary-General: "Towards the achievement of sustainable development: implementation of the 2030 Agenda for Sustainable Development, including through sustainable**

consumption and production, building on Agenda 21." [S.l.]: UNEP, 2024. 15 p. Disponível em: https://sdgs.un.org/sites/default/files/2024-08/UNEP%20inputs%20to%20the%20SG%20report.pdf

VERVLOET, Aline Lauers; BARBOZA, Lucas da Silva; SARTORTI, Artur Lenz. Concreto autoadensável: influência da argila expandida na resistência à compressão. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 11, n. 3, p. 135–149, set. 2019. ISSN 2176-7270.

VIJAYALAKSHMI, R.; RAMANAGOPAL, S. Structural concrete using expanded clay aggregate: a review. **Indian Journal of Science and Technology**, [*s. l.*], v. 11, n. 16, p. 1–12, 2018. Disponível em: https://indjst.org/articles/structural-concrete-using-expanded-clay-aggregate-a-review.

WANG, W.; LIU, Y.; ZHANG, W.; ZHANG, S. An investigation on thermal conductivity of fly ash concrete after elevated temperature exposure. **Construction and Building Materials**, v. 148, p. 148-154, 2017. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.044

XIE, Jianhe *et al.* Experimental study on the compressive and flexural behaviour of recycled aggregate concrete modified with silica fume and fibres. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], v. 178, p. 612–623, 2018.

YAN, Weishuo; CUI, Wei; QI, Lan. Effect of aggregate gradation and mortar rheology on static segregation of self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, [*s. l.*], v. 259, 2020.

Yüksel, N. The Review of Some Commonly Used Methods and Techniques to Measure the Thermal Conductivity of Insulation Materials. In: Almusaed, A.; Almssad, A. (Eds.). **Insulation Materials in Context of Sustainability**. London: IntechOpen, 2016. Cap. X, pp. 113-140. DOI: 10.5772/64157

ZHANG, Fengyan; LI, Lixin. Study on thermal conductivity of thermal insulation cement in geothermal well. **Frontiers in Earth Science**, Lausanne, v. 10, 22 fev. 2022. Art. 784245. DOI: 10.3389/feart.2022.784245.

ZHANG, P.; *et al*. **Properties of fresh and hardened self-compacting concrete containing rice husk ash**. *Reviews on Advanced Materials Science*, v. 61, n. 2, 2022.

ZHAO, Qiantao; LIAN, Zhiwei; LAI, Dayi. **Thermal comfort models and their developments: A review**. [*S. l.*]: KeAi Communications Co., 2021.

ZHAO, Hui; LIU, Faqi; YANG, Hua. Thermal properties of coarse RCA concrete at elevated temperatures. **Applied Thermal Engineering**, [*s. l.*], v. 140, p. 180–189, 2018. Disponível em: https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359431117342175.

ZHU, W.; BARTOS, P. J. M. Application of depth-sensing microindentation testing to study of interfacial transition zone in reinforced concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 8, p. 1299–1304, ago. 2000. DOI: 10.1016/S0008-8846(00)00322-7.

ZHU, W.; BARTOS, P. J. M. Permeation properties of self-compacting concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 6, p. 921–926, jun. 2003. DOI: 10.1016/S0008-8846(02)01090-6.

APÊNDICE A

Programa para captação dos dados

Se utilizássemos apenas os dados obtidos diretamente pelo ESP32 teríamos centenas de dados individuais que precisaria ser analisado linha a linha, com isso foi indicado pela professora Dr. Diana Cristina Gonzalez Gonzalez utilizar o software *Blynk Inc.* (2025) junto ao microcontrolador para garantir leitura rápida e efetiva dos dados principais.

Durante a preparação e verificação dos dados percebeu-se a necessidade de 10 informações importantes, utilizando o software e criando 10 pinos virtuais para recebimento *Wireless*.

A **Figura 16** demonstra a configuração destes 10 pinos.

Figura 16 - Configuração dos pinos virtuais

ID	Name	Pin	Color	Data Type	Units	Is Raw	Min	Max	Decimals
1	placa quente interna	V1		Double	°C	false	0	100	#.##
2	placa quente externa	V2		Double	°C	false	0	100	#.##
3	placa fria inferior	V3		Double	°C	false	0	100	#.##
4	placa fria superior	V4		Double	°C	false	0	100	#.##
5	Mensagem da água	V5		String		false			--
6	RELE1	V6		String		false			--
7	RELE2	V7		String		false			--
8	atual	V8		String		false			--
9	Tempo do RELE1	V9		Double	s	false	0	1200	#.##
10	Status do experimento	V10		String		false			--

Fonte: software *Blynk Inc.* (2025)

Onde:

1- A média das temperaturas dos 8 termopares internos;

2- A média das temperaturas dos 8 termopares externos;
3- A média das temperaturas dos 4 termopares da placa fria inferior;
4- A média das temperaturas dos 4 termopares da placa fria superior;
5- A mensagem informando situação e temperatura da água que percorre o equipamento, avisando caso precise colocar mais gelo para resfriar a temperatura;
6- Situação do relé interno, se está ligado ou desligado;
7- Situação do relé externo, se está ligado ou desligado;
8- Verifica se o equipamento chegou à estabilidade térmica;
9- Após a estabilidade conta os segundos que o relé interno ligou durante a coleta de dados;
10- Informa o término do experimento após 20 ciclos;

Após a inclusão dos pinos, foi inserido as caixas de informações personalizáveis, esta etapa é mais visual, moldando a interface final onde será apresentado os dados estipulados na etapa anterior.

A Figura 17 demonstra a interface final do software, os dados apresentados são do final de um experimento de calibração.

.

Figura 17 - interface final do software:



Fonte: software *Blynk Inc.* (2025)