



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
PIAUÍ
CAMPUS TERESINA ZONA-SUL
CURSO ENGENHARIA CIVIL**

FELIPE OLIVEIRA COSTA

**ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA DOS RESULTADOS NA PRODUÇÃO DE
CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO UTILIZANDO AGREGADOS LEVES
DE ARGILA CALCINADA**

**TERESINA-PI
2025**

FELIPE OLIVEIRA COSTA

A ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA DOS RESULTADOS NA PRODUÇÃO DE
CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO UTILIZANDO AGREGADOS
LEVES DE ARGILA CALCINADA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como exigência parcial para Disciplina de
TCC 2 Curso de Engenharia Civil do Instituto
Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
do Piauí, Campus Teresina Zona-sul.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Renê Gomes
Ferreira.

TERESINA-PI

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

Costa, Felipe Oliveira

C837a A análise bibliográfica dos resultados na produção de concreto de alto desempenho utilizando agregados leves de argila calcinada / Felipe Oliveira Costa . - 2025.

51 f.: il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Teresina Zona Sul, 2025.

Orientador: Prof Dr. Carlos Renê Gomes Ferreira.

1. concreto de alto desempenho. 2. agregados leves. 3. argila calcinada. 4. propriedades mecânicas. 5. construção civil. I. Título.

CDD - 624

Elaborado por Rudney do Carmo Paz CRB 3/1117

FELIPE OLIVEIRA COSTA

A ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA DOS RESULTADOS NA PRODUÇÃO DE
CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO UTILIZANDO AGREGADOS
LEVES DE ARGILA CALCINADA

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como exigência parcial para
Disciplina de TCC 2 Curso de Engenharia
Civil do Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus
Teresina Zona-sul.

Aprovada em: 23 / 01 / 2026.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Carlos Renê Gomes (Orientador)
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Dr. Ailton Soares Freire
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Me. Terciana Nayala Feitosa
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me conceder bastante saúde e força para enfrentar e superar os desafios que a vida proporciona, além de colocar pessoas tão valorosas na minha caminhada, que contribuem de forma significativa na minha trajetória.

À minha instituição, o Instituto Federal do Piauí (IFPI) – Campus Zona Sul, principalmente aos professores do curso de engenharia civil, pelos valiosos ensinamentos e conselhos transmitidos ao longo da minha formação, contribuindo para minha formação acadêmica e profissional.

À toda minha família, tios Aryoswaldo Costa, Marcelo Costa e Rogério Costa, tia, Iraniva Costa, à minha prima, Ingrid Emanuelle, e à minha avó, Maria Jesus, que sempre estiveram presentes em minha vida, oferecendo apoio, carinho e ensinamentos valiosos.

Em especial, agradeço aos meus pais, Maria Zeneide de Jesus Oliveira e Reginaldo Pereira Costa, por todo o amor incondicional, dedicação e esforço contínuo que foram fundamentais para minha formação individual e acadêmica, possibilitando que eu superasse os meus desafios e chegasse até aqui com dignidade e gratidão.

À minha namorada, Ana Carolina Gomes de Azevedo Marques, que esteve sempre ao meu lado em todos os momentos, me ajudando nas leituras, revisões, me dando muito amor e carinho, e principalmente pelo incentivo diário, me ajudando a crescer, amadurecer e seguir confiante.

Aos meus amigos e amigas, Erivaldo Pereira, Flávia Fernandes, Hildo Neto, Luís Ivo, Liones Júnior e Rayanderson Castro, que estiveram ao longo dessa caminhada, compartilhando momentos de alegria e felicidade, tornando essa trajetória mais leve.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Carlos Renê Gomes, pelos ensinamentos compartilhados, pela dedicação, paciência e compromisso com a formação acadêmica que foi fundamental para o meu crescimento intelectual, contribuindo de maneira essencial para a realização deste trabalho e para minha formação profissional.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente com a realização deste trabalho, os meus profundos agradecimentos.

RESUMO

O concreto é o material mais empregado na construção civil, e o avanço das tecnologias construtivas tem resultado no desenvolvimento de materiais que superam o concreto convencional em desempenho. Nesse contexto, o concreto de alto desempenho (CAD) se destaca por apresentar características superiores aos concretos convencionais, como elevada resistência mecânica, baixa permeabilidade e maior durabilidade. Logo, este trabalho tem como objetivo analisar os resultados da produção de concretos de alto desempenho com a incorporação de agregados leves de argila calcinada, comparando-o com concretos convencionais, verificando suas propriedades mecânicas, físicas e aspectos econômicos. A metodologia adotada baseou-se em uma pesquisa de natureza avaliativa e analítica, fundamentada na revisão bibliográfica de estudos científicos, normas técnicas e documentos especializados, publicados dentre o período de 2010 a 2025, com exceções pontuais de obras clássicas. Foram analisadas propriedades como resistência à compressão, massa específica e a absorção de água, além dos custos de produção dos concretos e o processo de calcinação da argila. Os resultados indicam que a utilização de agregados leves de argila calcinada contribui para a redução da massa específica do concreto, aumento da compacidade da matriz cimentícia e melhoria do desempenho mecânico, permitindo a obtenção de resistências à compressão superiores às dos concretos convencionais. Apesar do aumento no custo inicial dos insumos, o CAD apresenta vantagens relacionadas à durabilidade, redução de manutenção e maior eficiência estrutural. Conclui-se que a argila calcinada se configura como uma alternativa técnica e economicamente viável para a produção de concretos de alto desempenho, especialmente em regiões onde há disponibilidade desse material, contribuindo para o desenvolvimento de soluções mais eficientes para a construção civil.

Palavras-chave: Concreto de alto desempenho. Agregados Leves. Argila Calcinada. Propriedades Mecânicas. Construção Civil.

ABSTRACT

Concrete is the most widely used material in civil construction, and advances in construction technologies have led to the development of materials that surpass conventional concrete in performance. In this context, High-Performance Concrete (HPC) stands out for presenting superior characteristics, such as high mechanical strength, low permeability, and greater durability. This study aims to analyze the results of producing high-performance concrete incorporating lightweight aggregates of calcined clay, comparing it with conventional concrete and evaluating its mechanical and physical properties, as well as economic aspects. The adopted methodology consisted of an evaluative and analytical research approach, based on a literature review of scientific studies, technical standards, and specialized documents published between 2010 and 2025, including punctual references to classical works. The analyzed parameters included compressive strength, density, water absorption, production costs, and the clay calcination process. The results indicate that the use of lightweight calcined clay aggregates contributes to reducing concrete density, increasing matrix compaction, and improving mechanical performance, enabling compressive strengths higher than those of conventional concrete. Despite the increase in initial material costs, HPC demonstrates advantages related to durability, reduced maintenance, and structural efficiency. Therefore, calcined clay represents a technically and economically feasible alternative for the production of high-performance concrete, particularly in regions with material availability, contributing to more efficient and sustainable construction solutions.

Keywords: High-performance Concrete. Lightweight Aggregates. Calcined Clay. Mechanical Properties. Civil Construction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Agregados leves de vermiculita.....	27
Figura 2 - Agregados leves de argila expandida.....	27
Figura 3 - Classificação dos agregados leves quanto à finalidade/ massa específica.	28
Figura 4 - Argila calcinada pozzolânica.	29
Figura 5 - Argilas calcinadas de diferentes fontes de obtenção de argila.	30
Figura 6 - Etapas do procedimento de calcinação da argila.	31
Figura 7 - Fluxograma das atividades de desenvolvidas no TCC.....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades dos concretos convencionais e dos concretos de alto desempenho.....	24
Tabela 2 - Classificação dos agregados segundo à sua obtenção.	25
Tabela 3 - Comparativo de massas específicas das argilas em vários estados.	41
Tabela 4 - Absorção de água em corpos de provas de argila calcinada.	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD – Concreto de Alto Desempenho.

CC – Concreto Convencional.

MPa – Megapascal.

ACI - American Concrete Institute.

J/m² - Joule por Metro Quadrado.

NBR – Norma Brasileira.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

N – Newton.

Mm² - milímetro ao quadrado.

Kg – Quilograma.

Dm³ - Decímetro Cúbico.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	18
1.1	JUSTIFICATIVA	20
1.2	OBJETIVOS.....	21
1.2.1	OBJETIVO GERAL	21
1.2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
2	REFERENCIAL TEÓRICO	22
2.1	CONCRETO.....	22
2.2	CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO (CAD)	23
2.3	AGREGADOS.....	25
2.4	AGREGADOS LEVES	26
2.5	ARGILA CALCINADA COMO AGREGADO LEVE.....	29
2.6	PROCEDIMENTO DE CALCINAÇÃO	31
2.7	PESO ESPECÍFICO DO CONCRETO	32
2.8	PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO.....	33
2.9	ENSAIOS DE RESISTÊNCIA DO CONCRETO.....	34
2.10	TRABALHABILIDADE DO CONCRETO.....	35
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	37
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
4.1	DESEMPENHO E CARACTERÍSTICAS GERAIS	39
4.2	UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS LEVES E ARGILA CALCINADA	41
4.3	INSUMOS NA PRODUÇÃO DOS CONCRETOS	42
5	CONCLUSÃO	46
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	47
6	REFERÊNCIAS	48

1. INTRODUÇÃO

O concreto é o material de construção mais utilizado pelo homem (MEHTA e MONTEIRO, 2014), entretanto, apesar de sua ampla aplicação, apresenta limitações construtivas que podem comprometer seu desempenho em determinadas situações. Com o avanço das tecnologias construtivas é possível adicionar componentes químicos e minerais que permitem a redução da quantidade de água na composição do concreto, como também o incremento da compacidade de sua mistura. A partir disso, é viável obter concretos com resistências à compressão superiores aos concretos convencionais, com valores próximos a 100 MPa e elevado grau de durabilidade (SUPERMIX, 2025). Este tipo de concreto é denominado concreto de alto desempenho (CAD) e apresenta desempenho superior ao concreto convencional (CC), atendendo satisfatoriamente às exigências requeridas (ISAIA, 2011).

O CAD não é uma mistura nova, mas sim uma evolução do CC, utilizando praticamente as mesmas matérias-primas, com os mesmos princípios básicos de resistência, trabalhabilidade e durabilidade. No entanto, para superar os parâmetros anteriores, são necessários procedimentos especiais denominados de “alto desempenho” (ISAIA, 2011).

O princípio básico está fundamentado na diminuição da porosidade do concreto, por meio da modificação dos componentes presentes em sua mistura, reduzindo a presença de vazios, que são espaços microscópicos ocupados por água ou ar, sendo necessário a incorporação de partículas finas, menores que o próprio cimento, o que concede ao CAD coesão e microestrutura densa (ISAIA, 2011). Essas partículas finas, mais conhecidas como agregados leves, são principalmente adições minerais, como as sílicas ativas e metacaulim, contudo podem ser utilizados compostos naturais, tais como as cinzas de casca de arroz, argila expandida, dentre outros insumos. Assim, a utilização dessas adições de agregados leves mais os componentes básicos do concreto, resultam em um aumento significativo da compacidade, resistência mecânica, durabilidade e, consequentemente, do desempenho global da estrutura (ISAIA, 2011).

Segundo Maycá, Cremonini e Recena (2008) existem diversos agregados leves que podem ser utilizados em substituição total ou parcial aos agregados convencionais, incluindo a argila expandida, pumicita (pedra-pomes), vermiculita e cinza volante sintetizada. Os estudos realizados por Wasserman e Bentur (1996) e Elsharif, Cohen e Olek (2005) indicaram que a redução da espessura da zona de transição pasta/agregado melhora o desempenho das propriedades relacionadas à resistência mecânica e à durabilidade dos concretos leves.

Uma das poucas alternativas de agregados leves produzidos nacionalmente seriam os agregados de argila expandida, contudo, seu potencial de utilização está concentrado na região sudeste, que abriga a única fábrica produtora do material no Brasil, localizada no estado de São Paulo. Logo, por se tratar de uma única matriz produtora, torna-se oneroso o transporte para outras regiões, além da escassez de um mercado consolidado deste tipo de material, dificultando a disseminação deste tipo de argila em território brasileiro (FILIPE *et al.*, 2018).

No entanto, uma opção viável para propagar a tecnologia do CAD seria o agregado leve de argila calcinada, obtido através da cerâmica vermelha. Segundo a Associação Brasileira de Cerâmica (SEBRAE, 2008), no Brasil existem cerca de 11 mil empresas que utilizam este material com matéria prima, no qual, com alterações em seu processo produtivo poderiam introduzir o agregado leve de argila calcinada como mais um produto comercial (SANTIS, 2010).

Sendo assim, a utilização de argila calcinada, torna-se uma opção viável, como agregado leve, na produção de CADs. Portanto, este trabalho tem como finalidade a avaliação da influência de agregados leves de argila calcinada na fabricação do CAD, em comparação ao CC, destacando suas propriedades mecânicas, físicas e estruturais.

1.1 JUSTIFICATIVA

Com a constante evolução dos métodos construtivos, há um interesse crescente no desenvolvimento de materiais inovadores que apresentem desempenho superior aos convencionais. Logo, o principal material utilizado na construção civil é o concreto, sendo empregado de diferentes maneiras nos ambientes construtivos. Entretanto, para empreendimentos mais complexos, torna-se necessário a aplicação de melhores propriedades, que correspondam às exigências solicitadas. Diante deste cenário, observa-se a necessidade de encontrar soluções que conciliem resistência, leveza e durabilidade, contribuindo para construções mais eficientes e resistentes.

Dessa maneira, o CAD com agregados leves de argila calcinada urge como uma solução promissora para essa questão. A diminuição dos vazios existentes no CC, fornecida pelos agregados leves, resulta em uma maior compacidade e menor massa específica. Isso permite que a resistência à compressão alcance valores elevados, sem comprometer suas propriedades mecânicas. Tais características não apenas melhoram o desempenho estrutural, mas também contribuem para o aumento da durabilidade e para a melhoria do comportamento dos concretos em ambientes agressivos. Tendo isso em vista, o CAD, composto por agregados leves, tem como função atender às exigências específicas, como alta resistência à compressão, elevada durabilidade e melhor desempenho em condições extremas, mesmo sob cargas elevadas ou em ambientes agressivos.

Logo, o presente estudo objetivou avaliar, por meio de uma análise referencial, o desempenho do CAD com adição de agregados leves em relação aos concretos convencionais. Apresentando a argila calcinada como uma alternativa viável e semelhante aos agregados leve de argila expandida.

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos dessa pesquisa exercem papéis mediadores entre o tema central e as análises desenvolvidas ao longo do trabalho, orientando a investigação e a verificação das propriedades do CAD com a incorporação de agregados leves de argila calcinada. A seguir são apresentados os objetivos gerais e específicos do estudo.

1.2.1 OBJETIVO GERAL

O propósito principal desta pesquisa é a análise dos resultados obtidos na produção dos CADs, avaliando a viabilidade e desempenho da adição de agregados leves de argila calcinada em sua produção.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- I) Comparar os resultados obtidos com os parâmetros de resistência apresentados com os CCs;
- II) Avaliar as propriedades dos agregados leves de argila calcinada, como a massa específica e absorção de água;
- III) Analisar os aspectos econômicos da produção do CAD em relação ao CC, considerando custos e insumos;
- IV) Examinar o impacto da incorporação dos agregados leves de argila calcinada na composição do CAD.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CONCRETO

O concreto de cimento Portland é o material estrutural mais relevante da construção civil (HELENE, 2010). Sua composição é composta por uma mistura de cimento, agregados miúdos (areia) e graúdos (brita ou seixo), água e, em alguns casos, aditivos químicos para melhorar suas propriedades. Segundo Neville (2016), o concreto apresenta vantagens como alta capacidade de moldagem, resistência à compressão e compatibilidade com diversos tipos de estruturas.

De acordo com os estudos de Mehta & Monteiro (1994) o CC possui resistências à compressão geralmente entre 20 MPa a 40 MPa, sendo amplamente empregado em estruturas como lajes, vigas, pilares e fundações. Ademais, uma das principais vantagens do CC é sua facilidade de produção e aplicação, além de seu custo relativamente baixo quando comparado a tipos mais avançados de concreto (SANTOS, 2024). Entretanto, sua durabilidade pode ser comprometida em ambientes agressivos devido à maior porosidade e permeabilidade em relação a concretos de maior desempenho (NEVILLE, 2016), seu peso específico é alto, o que pode impactar a carga total da estrutura, demandando um dimensionamento mais robusto dos elementos estruturais.

Outra limitação dos CCs é sua suscetibilidade a fissuras devido à retração e ao efeito de variações térmicas. Esse comportamento pode comprometer a integridade estrutural a longo prazo, principalmente em ambientes sujeitos a ciclos de umidade e temperatura (HELENE, 2010). Para mitigar esses problemas, têm sido empregado estratégias como o uso de aditivos redutores de retração, reforço com fibras e a substituição parcial do cimento por materiais pozolânicos, como a argila calcinada (MEHTA & MONTEIRO, 2014).

Segundo Alexandre (2020), a escolha entre agregados naturais e artificiais pode impactar diretamente nas propriedades como resistência mecânica, trabalhabilidade e durabilidade. Agregados artificiais, como os provenientes da argila calcinada e materiais expandidos, têm sido explorados para reduzir o peso do concreto e melhorar seu desempenho térmico e acústico. Além disso, a granulometria e a forma dos agregados afetam a compacidade da mistura, influenciando sua resistência final (ALEXANDRE, 2020). Estudos indicam que o uso de agregados com boa graduação pode minimizar a

necessidade de pasta de cimento, resultando em um concreto mais econômico e eficiente (ISAIA, 2011).

Segundo Mehta & Monteiro (2014), a evolução das pesquisas em engenharia de materiais tem possibilitado o desenvolvimento de concretos com propriedades melhoradas, incluindo maior resistência mecânica, menor permeabilidade e melhor desempenho térmico. Essas inovações são fundamentais para atender às exigências das construções modernas, que demandam materiais cada vez mais eficientes, econômicos e sustentáveis, garantindo maior segurança e longevidade às edificações.

2.2 CONCRETO DE ALTO DESEMPENHO (CAD)

O CAD é um material que apresenta melhor desempenho em comparação aos CCs (ISAIA, 2011), apresentando elevada resistência a compressão, com valores superiores a 70 MPa, baixa permeabilidade, elevada durabilidade e um menor peso específico. Essa performance é alcançada principalmente pela redução da porosidade, através da incorporação de agregados finos e aditivos minerais (NEVILLE, 2016).

A composição do CAD é baseada nos mesmos materiais empregados nos CCs, incluindo água, areia, cimento e agregados graúdos (MEHTA & MONTEIRO, 2014). Ademais, faz-se a utilização de procedimentos denominados de “alto desempenho” para incrementar sua compacidade e microestrutura, permitindo ao CAD atender às demandas crescentes por estruturas que solicitam resistências mais elevadas (HELENE, 2011). Segundo o American Concrete Institute (ACI), o CAD pode ser definido com um concreto que atende uma combinação especial entre desempenho e requisitos de uniformidade, que não pode ser atingida rotineiramente com o uso de componentes convencionais e práticas normais de misturas de lançamentos e cura.

O CAD é amplamente utilizado em obras que demandam segurança, resistência e durabilidade, como em estruturas de grande porte, prédios de múltiplos pavimentos, pontes e viadutos (AÏTCIN, 2016). Sua composição permite melhor desempenho em condições ambientais adversas, resistindo a ataques químicos, abrasão e variações de temperatura (NEVILLE, 2016).

Além disso, a elevada compacidade da sua estrutura reduz a necessidade de manutenção, aumentando a vida útil das construções e reduzindo custos a longo prazo (ISAIA, 2011). Outro fator que contribui para o alto desempenho do CAD é a adição de materiais pozolânicos, que melhoram a hidratação do cimento e reduzem a formação de poros capilares, aumentando a resistência e durabilidade do concreto (MEHTA & MONTEIRO, 2014). A Tabela 1 demonstra o comparativo destas propriedades em relação ao CAD e CC, destacando suas resistências à compressão e tração. As incorporações minerais também conferem maior resistência química ao CAD, tornando-o adequado para ambientes agressivos, como regiões industriais e litorâneas onde, a presença de sulfatos e cloretos pode comprometer a integridade estrutural de CCs.

Tabela 1 - Propriedades dos concretos convencionais e dos concretos de alto desempenho.

PROPRIEDADES	CC	CAD
Resistência à compressão simples (MPa)	20-50	60-80
Resistência à flexão (MPa)	4-8	6-10
Energia de fratura (J/m ²)	130	140
Deformação última de tensão (10 ⁻⁶)	80-100	130-150

Fonte: Dugat *et al*, 1996

2.3 AGREGADOS

A NBR 9935 (ABNT, 2011) define como agregado, material granular pétreo, geralmente inerte e com formas e propriedades adequadas para a preparação de argamassa ou concreto. Eles são obtidos através da exploração de jazidas com o material natural (areia, seixo rolado ou pedregulho), ou podem ser produzidos a partir da britagem de maciços rochosos (pedra britada, pó de pedra), além de passarem por procedimentos laboratoriais para a melhoria de suas propriedades ou alteração em sua composição. A principal aplicação dos agregados é na fabricação de concretos e argamassas onde, em conjunto com uma massa cimentícia (pasta de cimento/água), constituem uma rocha artificial, cuja principal aplicação é compor os diversos elementos estruturais de concreto armado (NEVILLE, 2016). De acordo com Ribeiro *et al* (2013) os agregados podem ser obtidos de várias maneiras, sendo apresentado na Tabela 2 a classificação dos agregados em função de sua obtenção.

Tabela 2 - Classificação dos agregados segundo à sua obtenção.

Classificação	Obtenção	Exemplos
Naturais	Rochas fragmentadas pela ação do vento, das chuvas, das variações de temperatura, e encontradas na natureza sob a forma de agregados	Areia e pedregulhos
Artificiais	Materiais que foram fragmentados ou triturados com auxílio de britadores ou outro meio artificial	Areias artificiais, britas de granito, gnaiss, calcário.

Fonte: Ribeiro, *et al.*, 2013.

De acordo com estudos de Bauer (1979) os agregados são imprescindíveis na produção do concreto, tendo em vista que 70% a 80% do volume de concreto produzido é constituído por agregados. A sua utilização, sejam eles areia ou pedra, na fabricação do concreto possui, primordialmente, um fator econômico, uma vez que são materiais de baixo custo unitário quando comparados ao cimento. Contudo, além dessa vantagem financeira, os agregados também contribuem significativamente para a melhoria de diversas propriedades da rocha artificial resultante (CARDOSO, 2017). Entre os benefícios proporcionados, destacam-se a redução da retração da pasta

de cimento, o aumento da resistência ao desgaste, a melhora da trabalhabilidade e o incremento da resistência ao fogo, tornando o concreto mais eficiente e durável.

Estudos como os de Neville (2016), destacam que a seleção adequada dos agregados pode influenciar diretamente na durabilidade e desempenho mecânico do concreto. A granulometria, a forma dos grãos e a compactidade dos agregados são fatores determinantes na qualidade final do concreto (RECENA, 2015). Além disso, a incorporação de agregados reciclados vem sendo explorada como uma alternativa sustentável para reduzir o impacto ambiental da construção civil, contribuindo para uma gestão sustentável de recursos (GARNIER, 2016).

Pesquisas conduzidas por Mehta & Monteiro (2014) indicam que a escolha do tipo de agregado também influencia a resistência ao ataque químico do concreto, especialmente em ambientes agressivos. Segundo Ribeiro *et al* (2013) os agregados apresentam diversos formatos, estando associados ao ambiente natural obtido. Os agregados de origem basáltica, por exemplo, apresentam maior resistência química quando comparados a agregados calcários. De acordo com Andrade (2022), o uso de agregados leves, como argila expandida e vermiculita, tem sido estudado para reduzir o peso próprio do concreto e melhorar sua capacidade de isolamento térmico e acústico, tornando-os uma opção interessante para construções sustentáveis e eficientes.

2.4 AGREGADOS LEVES

Segundo Silva (2018) os agregados leves são materiais granulares e porosos que são produzidos e comercializados por diversas empresas ao redor do mundo, oferecendo soluções diversas com o uso deles. Entre as aplicações sugeridas pelos fabricantes estão os usos como isolante térmico e acústico, na produção de enchimentos leves, em obras de drenagem além de aterros leves e de infraestrutura (SOUZA *et al*, 2020). As Figuras 1 e 2 demonstram agregados leves provenientes da argila natural.

Figura 1 - Agregados leves de vermiculita.



Fonte: Agrosolo Bauru, 2025.

Figura 2 - Agregados leves de argila expandida.



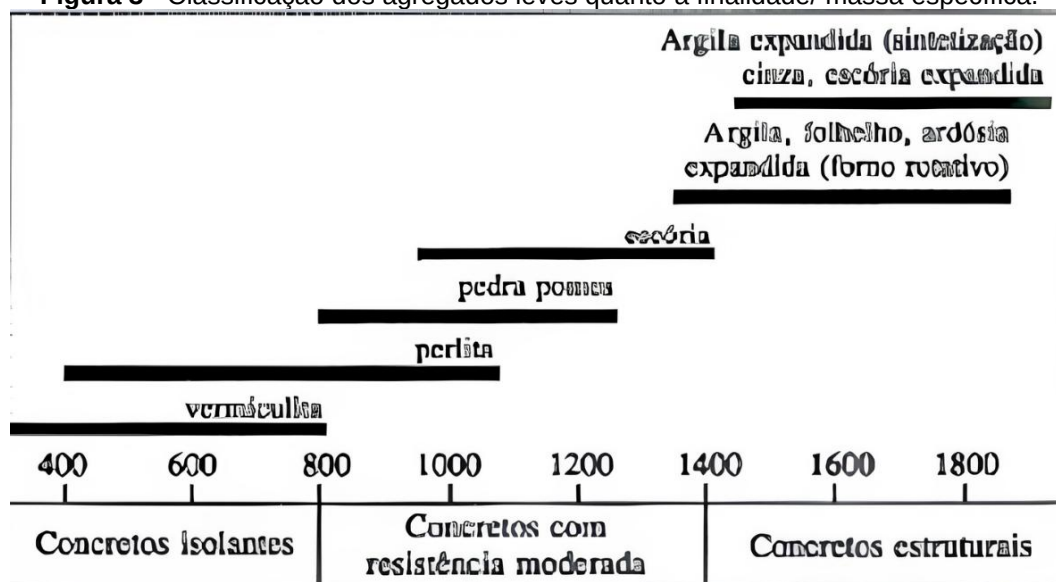
Fonte: Agrosolo Bauru, 2025.

De acordo com o ACI (2003) uma das formas de caracterizar os agregados leves é de acordo com a Figura 3, onde, sua massa específica é associada à sua possível utilização na construção civil:

1. Agregados para concretos isolantes: sua utilização resulta em um concreto de massa específica em torno de 300 kg/m^3 e 800 kg/m^3 e a resistência é desprezível.
2. Agregados para concretos com resistência moderada: os concretos com esses agregados possuem resistência à compressão entre 7 MPa e 17 MPa e, portanto, não tem função estrutural.

3. Agregados para concretos estruturais: Resultam em concretos com maior resistência à compressão e são os únicos que podem ser empregados para fins estruturais.

Figura 3 - Classificação dos agregados leves quanto à finalidade/ massa específica.



Fonte: Pereira, 2012.

O peso reduzido destes agregados é resultado direto de sua microestrutura celular e altamente porosa, caracterizada pela presença de uma grande quantidade de vazios internos, podendo ter sua origem natural ou sintética (ANDRADE, 2022). Os agregados leves artificiais são formados pelo rápido aquecimento de materiais que têm capacidade de se expandir a temperatura muito altas, e, produzi-los a partir de resíduos é considerado uma alternativa ambiental muito recomendada (SOUZA *et al*, 2020).

A produção de agregados leves artificiais depende de uma série de parâmetros fundamentais, incluindo a composição química das matérias-primas, o processo de moldagem dos grãos e o perfil de queima (SILVA, 2018). Este último, envolve fatores como as taxas de aquecimento, as temperaturas de sinterização e a possibilidade de pré-aquecimento. Em conformidade com as pesquisas de Santos (2024), o tipo de forno utilizado e o método de resfriamento também influenciam diretamente as propriedades finais do material. Para garantir a qualidade deste material produzido, são realizados ensaios laboratoriais que possibilitam sua caracterização e determinação como agregado leve, assegurando sua adequação às normas e exigências da construção civil.

Diversos tipos de matérias-primas podem ser empregados na produção de agregados leves por meio do processo de sinterização (ANDRADE, 2022). Para isso, os materiais selecionados devem apresentar a capacidade de formar um núcleo poroso e de baixa densidade, aliado a uma camada superficial com reduzida absorção de água (SANTOS, 2024). Além disso, a obtenção de uma forma esférica é essencial para otimizar as propriedades do concreto no estado fresco, favorecendo sua trabalhabilidade e desempenho geral.

2.5 ARGILA CALCINADA COMO AGREGADO LEVE

A argila calcinada é um material pozzolânico obtido por meio do aquecimento de argilas cauliníticas a temperaturas entre 650°C e 900 °C, faixa na qual ocorre a desidroxilação da caulinita e a ativação da pozzolânica do material (FRÍAS, 2011). A calcinação transforma os minerais presentes, como a caulinita, em metacaulinita, um composto altamente reativo que reage com o hidróxido de cálcio liberado durante a hidratação do cimento, formando produtos cimentícios adicionais e reduzindo a alcalinidade da matriz (OLIVEIRA & BARBOSA, 2006). A Figura 4 apresenta uma argila calcinada, sua cor acinzentada é devido ao processo de aumento da temperatura e modificações das suas propriedades.

Figura 4 - Argila Calcinada Pozzolânica.



Fonte: Dynamis, 2025.

Além disso, a argila calcinada pode apresentar diferentes cores e características físicas, dependendo da fonte de argila utilizada e do controle do processo de calcinação (FARIAS, 2010), representada na Figura 5.

Figura 5 - Argilas Calcinadas de diferentes fontes de obtenção de argila.



Fonte: Alibaba, 2015.

Dentre suas principais propriedades destacam-se a capacidade de preencher os vazios na matriz cimentícia, reduzindo a porosidade e melhorando a resistência mecânica do material endurecido (SANTIS, 2010). Essa característica faz com que a argila calcinada seja uma alternativa interessante para a substituição parcial do cimento Portland, proporcionando uma matriz cimentícia mais densa e durável (FARIAS, 2010).

Além das vantagens mecânicas, a argila calcinada também contribui para a sustentabilidade da construção civil. Sua utilização permite a redução da pegada de carbono, uma vez que a produção de cimento Portland é uma das principais fontes de emissão de CO₂ na indústria da construção (SCRIVENER, 2018).

De acordo com Farias (2010) a aplicação da argila calcinada em concretos e argamassas torna-se uma opção bastante versátil. Ela pode ser utilizada na formulação de compósitos cimentícios reforçados com fibras, contribuindo para o aumento da durabilidade desses materiais em ambientes agressivos (MACHADO, 2017). Seu potencial como aditivo mineral continua sendo explorado por pesquisadores, com o objetivo de aprimorar a qualidade e o desempenho dos produtos cimentícios (SANTIS, 2012).

2.6 PROCEDIMENTO DE CALCINAÇÃO

A calcinação é um processo térmico amplamente utilizado na indústria para modificar as propriedades físico-químicas de materiais argilosos e minerais (SOUZA, 2013). Este procedimento consiste no aquecimento de materiais preferencialmente físicos em temperaturas controladas, por volta de 650 °C a 900°C, ocasionando reações químicas que resultam na decomposição de componentes e na estrutura cristalina do sólido (FRÍAS, 2011). No caso da argila, esse processo converte a caulinita em metacaulinita, que é altamente reativa e melhora o desempenho dos compósitos cimentícios (HOLANDA, 2008).

Este processo ocorre em três etapas: a secagem, decomposição térmica e a fase de estabilização. Segundo pesquisas de Farias (2010), na primeira etapa, a umidade presente na argila é eliminada, sendo aquecida com temperaturas baixas, dentre 100°C e 200°C. Após isso, acontece um aumento gradual da temperatura, entrando na etapa de decomposição térmica, onde a estrutura cristalina da caulinita se destabiliza devido à remoção da água estrutural, resultando na metacaulinita. Por fim, na estabilização, as propriedades do material são ajustadas conforme o tempo e a temperatura de exposição, evitando recristalizações indesejadas que possam reduzir a atividade pozolânica (LIMA & TOLEDO, 2008). A Figura 6 ilustra algumas etapas deste procedimento.

Figura 6 - Etapas do procedimento de calcinação da argila.



Fonte: ResearchGate, 2025.

A eficiência deste procedimento depende de fatores como o tempo de residência, a taxa de aquecimento, a atmosfera do forno. Segundo Frías (2011), a temperatura ideal para a ativação da metacaulinita está entre 650°C e 750°C, garantindo maior reatividade e desempenho em aplicações cimentícias. Ademais, tal processo impacta diretamente no meio ambiente, de acordo com Scrivener (2018), a substituição parcial do cimento Portland por materiais calcinados pode reduzir significativamente as emissões de CO₂ da indústria da construção civil, tornando o processo uma alternativa sustentável para os CADs.

2.7 PESO ESPECÍFICO DO CONCRETO

O peso específico do concreto é um parâmetro fundamental na engenharia civil, pois influencia diretamente no dimensionamento estrutural e no desempenho das edificações (ISAIA, 2005). O concreto convencional apresenta variações em seu peso específico, apresentando valores entre 2000 kg/m³ e 2800kg/m³. De acordo com a ABNT 12655 (ABNT, 2015) este valor depende diretamente da composição da mistura, do tipo de agregado e do grau de compactação do material. Concretos mais densos, geralmente utilizados em estruturas que requerem alta resistência, apresentam maior peso específico e menor quantidade de vazios na sua matriz cimentícia (NEVILLE, 2016).

A escolha dos agregados influencia a densidade do concreto, pois quanto maior for a massa específica destes materiais, mais robusto e pesado será o concreto finalizado (ANDRADE, 2022). A substituição de agregados convencionais por agregados leves como a argila calcinada ou a vermiculita proporcionam uma redução significativa no peso específico do concreto (MEHTA & MONTEIRO, 2014). Fator que o torna mais leve e adequado às aplicações que exigem reduções de carga, além de diminuir a presença de vazios, por conta da granulometria dos grãos, favorecendo aumento significativo na compacidade (SOUZA, 2012). Esse tipo de concreto é comumente utilizado em obras de grande porte, onde a diminuição do peso próprio da estrutura e melhorias nas suas propriedades podem resultar na economia de materiais e maiores eficiências estruturais (PEREIRA, 2012).

Além da influência dos agregados, a relação água/cimento também afeta diretamente o peso específico do concreto (NEVILLE, 2016). Traços com menores proporções desta relação apresentam maiores densidades, por conta da quantidade de água ser reduzida, (ISAIA, 2005). Além disso, os concretos formados por aditivos espumantes ou pela incorporação de ar são os mais recomendáveis para aplicações em isolamentos térmicos e acústicos devido ao seu peso específico ser reduzido, proporcionado pela adição destes insumos na sua composição (HELENE & TERZIAN, 2016). Tal característica é relevante para as construções com o viés sustentável, pois com a redução das cargas estruturais, diminui-se também o custo energético da edificação.

2.8 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO CONCRETO

Segundo as pesquisas de Neville (2016), o concreto apresenta propriedades mecânicas essenciais para determinar seu comportamento estrutural e sua capacidade de resistir a diferentes tipos de solicitações. Dentre as principais características mecânicas do concreto, destacam-se a resistência a compressão, seu módulo de elasticidade e sua tenacidade (MEHTA & MONTEIRO, 2014), são estes parâmetros que influenciam diretamente na durabilidade e na segurança das estruturas.

A resistência à compressão é a propriedade mais importante do concreto e representa sua capacidade de suportar cargas sem sofrer ruptura (ISAIA, 2005). Essa característica é determinada por ensaios laboratoriais e depende de fatores como a relação água/cimento, o tipo de agregado utilizado e a cura adequada do material. Concretos de alto desempenho podem alcançar resistências superiores a 70 MPa, sendo indicados para obras que exigem elevado desempenho estrutural (MEHTA & MONTEIRO, 2014). Grandes partes das peças produzidas de concreto são projetadas com a premissa de que a estrutura não resistirá às tensões de tração (MEHTA & MONTEIRO, 1994).

Embora a resistência à tração do concreto seja significativamente menor que a resistência à compressão, é essencial para prever o surgimento de fissuras e avaliar a necessidade de reforço estrutural (SOUZA, 2012). Segundo Neville (1997), a correlação utilizada da resistência à tração do concreto seja em torno de 10% de sua resistência à compressão. Visto isso,

caso a taxa de compressão aumente, é esperado que sua taxa de tração irá aumentar, mas dentro de uma relação decrescente. De acordo com Helene & Terzian (2016) para uma melhoria na resistência do concreto à tração, pode-se utilizar fibras sintéticas ou metálicas, que aumentam a capacidade de absorção de energia e reduzem o risco de fissurações.

O módulo de elasticidade do concreto determina sua rigidez e capacidade de deformação sob carga. Por definição: módulo de elasticidade ou módulo de Young é a razão entre uma tensão aplicada sobre um corpo e a deformação específica imediata nele, esse parâmetro é crucial para o dimensionamento de estruturas submetidas as cargas dinâmicas ou longos períodos de carregamento, como edifícios altos e pontes (HIBBELER, 2010)

2.9 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA DO CONCRETO

Os ensaios de resistência do concreto são considerados essenciais para garantir a qualidade e a segurança no desempenho estrutural das construções (TUTIKIAN, 2011). Esses testes tem a função de avaliar a autonomia do concreto de suportar solicitações mecânicas, de impactos e acidentes, sendo fundamental para a verificação do concreto com as normas técnicas e requisitos do projeto (ANDRADE, 2022). Diante disso, são realizados vários ensaios, dentre os principais destacam-se, os testes de resistência à compressão e à tração, resistência a flexão e o módulo de elasticidade. De acordo com os estudos de Neville (2016) as realizações desses ensaios permitem a validação da durabilidade e confiabilidade do concreto em suas aplicações.

O teste de resistência à compressão é o mais comum utilizado na engenharia civil, sendo realizado conforme a NBR 5739. Este ensaio consiste na aplicação de cargas axiais em corpos de provas em formatos cilíndricos, com dimensões dentre 15 centímetros de diâmetro e 30 centímetros de altura, para verificar a tensões internas suportadas por este modelo e aferir a respeito de seu desempenho estrutural (ISAIA, 2005).

Além disso, o ensaio de resistência à flexão é empregado para avaliar a resistência de concretos utilizados em pavimentos e estruturas submetidas a momentos fletores. De acordo com a NBR 12142 (ABNT, 2010), esse teste é realizado em vigas prismáticas, onde uma carga é aplicada até a ruptura da

peça. Já o módulo de elasticidade é determinado pelo ensaio descrito na NBR 8522 (ABNT, 2017) e mede a capacidade do concreto de deformar elasticamente sob carregamento, sendo essencial para projetos estruturais que exigem maior controle das deformações.

2.10 TRABALHABILIDADE DO CONCRETO

A trabalhabilidade do concreto refere-se à facilidade de manuseio, transporte, lançamento e adensamento da mistura sem que ocorra segregação ou exsudação (ISAIA, 2005). Esse parâmetro é essencial para garantir a qualidade da concretagem, pois influencia diretamente na resistência, durabilidade e acabamento da estrutura final (NEVILLE, 2016). Segundo Mehta & Monteiro a trabalhabilidade pode ser afetada por diversos fatores, incluindo a proporção dos materiais, a quantidade de água, o tipo e a granulometria dos agregados, bem como o uso de aditivos plastificantes e superplastificantes.

A consistência do concreto é um dos principais indicadores da trabalhabilidade e pode ser medida pelo ensaio de abatimento do tronco de cone, normatizado pela NBR 7223 (ABNT, 2017). Esse ensaio determina a fluidez da mistura ao medir a redução de altura de um cone metálico preenchido com concreto. Quanto maior o abatimento, mais fluido é o concreto, facilitando seu lançamento e adensamento. No entanto, uma fluidez excessiva pode comprometer a resistência final, tornando essencial um equilíbrio adequado na dosagem da água e dos aditivos (MEHTA & MONTEIRO, 2014).

Outro fator determinante na trabalhabilidade é a coesão da mistura, que evita a segregação dos componentes. A segregação ocorre quando os agregados se separam da pasta de cimento, comprometendo a uniformidade da mistura e resultando em variações na resistência ao longo da estrutura (SANTOS, 2016). Para minimizar esse problema, podem ser utilizados aditivos estabilizadores, além da escolha de agregados com granulometria bem distribuída, que contribuem para uma melhor compactação e maior integridade estrutural (HELENE, 2010).

Por fim, a trabalhabilidade também está diretamente ligada ao tempo de pega e ao tempo disponível para o lançamento do concreto (NEVILLE, 2016). Concretos de alta trabalhabilidade são essenciais para aplicações que exigem maior tempo de manuseio, como concretagens de grandes volumes ou locais de difícil acesso. A correta escolha da dosagem e dos aditivos pode garantir uma trabalhabilidade adequada sem comprometer as propriedades mecânicas do concreto, resultando em um material mais eficiente e durável para aplicações na construção civil (MEHTA & MONTEIRO, 2014).

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este tópico apresenta os procedimentos metodológicos adotados na pesquisa, cujo objetivo consistiu em comparar os CADs com adição de agregados leves de argila calcinada com os CCs. Para isso, foi empregada uma abordagem de caráter avaliativa e analítica, com o intuito de identificar as diferenças de desempenho entre os materiais. O levantamento de dados foi realizado com base no referencial bibliográfico de produções científicas, análises documentais e revisões de normas.

Foram utilizadas palavras-chaves para a busca e seleção do material científico, tais como, concreto de alto desempenho, concretos, agregados leves e argilas calcinadas. Para a coleta dos materiais conduziu-se pesquisas nas principais bases de dados científicos nacionais e internacionais: SciELO, Google acadêmico, Scopus e Elsevier, o que permitiu acesso a artigos indexados, revisado por pares e documentações técnicas. O período estabelecido para a coleta dos materiais foi de Janeiro de 2010 a Junho de 2025, cabendo algumas exceções, assegurando que a revisão contemple materiais atualizados e alinhados às discussões contemporâneas.

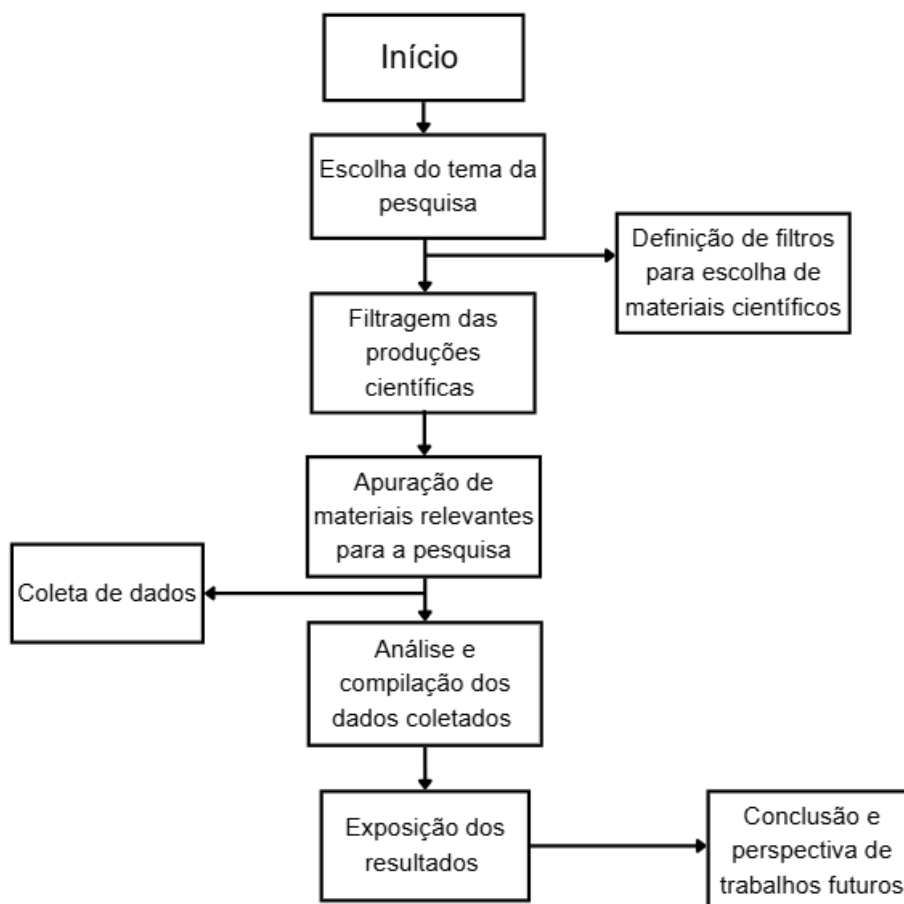
Foram inicialmente coletados cerca de 15 trabalhos, dos quais apenas 8 foram selecionados após a aplicação dos critérios de seleção. Como parâmetros de escolha, foram considerados os estudos que abordassem diretamente a produção, caracterização ou avaliação de CADs com agregados leves de argila calcinada, bem como trabalhos comparativos entre o CAD e os CCs. Foram descartados as produções científicas sem dados experimentais relevantes e que não apresentassem informações suficientes para a análise proposta.

Para composição do trabalho, foram revisados os estudos e pesquisas de Mehta e Monteiro (2014) que abordam as propriedades fundamentais dos agregados leves, dando ênfase em suas influências na redução do peso específico do concreto. Logo, procedeu-se uma análise das propriedades físicas destes agregados, os quais têm potencial para aprimorar o desempenho do CC, contribuindo para resultar em um CAD.

A avaliação do comportamento do CAD em comparação ao CC será estruturada por meio da análise referencial dos estudos de Araújo (2023), abordando propriedades como, a resistência à compressão e o módulo de elasticidade do concreto. Foi realizado também uma análise dos estudos de Santos (2024) e de Neville (2016), visando comparar os resultados com os custos de produção dos CADs, com adições de agregados leves de argila calcinada, com os CCs.

Por fim, esta pesquisa consolida a relevância da aplicação de agregados leves de argila calcinada na produção do CAD e contribui para os avanços no desenvolvimento de materiais mais eficientes e inovadores. Além disso, os resultados apresentados neste trabalho podem servir como base para futuras investigações que buscam otimizar o uso desses agregados na construção civil, explorando combinações com outros materiais e metodologias construtivas. A Figura 7 ilustra o diagrama com todas as etapas de produção deste TCC.

Figura 7 - Fluxograma das atividades de desenvolvidas no TCC.



Fonte: Autor, 2025.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este tópico tem como objetivo apresentar os resultados obtidos através das análises de produções científicas, com ênfase na produção do CAD empregando agregados leves de argila calcinada ou materiais de características similares.

4.1 DESEMPENHO E CARACTERÍSTICAS GERAIS

O CAD é conhecido principalmente por sua elevada resistência e por apresentar propriedades mecânicas superiores aos CC. Tais características advém do emprego de sua composição otimizada, que utiliza aditivos como a sílica ativa e superplastificantes ou a incorporação de agregados em sua mistura, além de reduzir sua relação água/cimento (a/c), fatores que proporcionam uma matriz mais compacta e menos porosa. De acordo com os estudos realizados por Araújo (2023), o CAD pode atingir valores de compressão entre 50 MPa e 100 MPa, conforme a qualidade dos agregados trabalhados e sua proporção de materiais. A resistência à compressão, parâmetro fundamental para a avaliação do desempenho mecânico dos concretos, é determinada conforme equação 1.

(Equação 1)

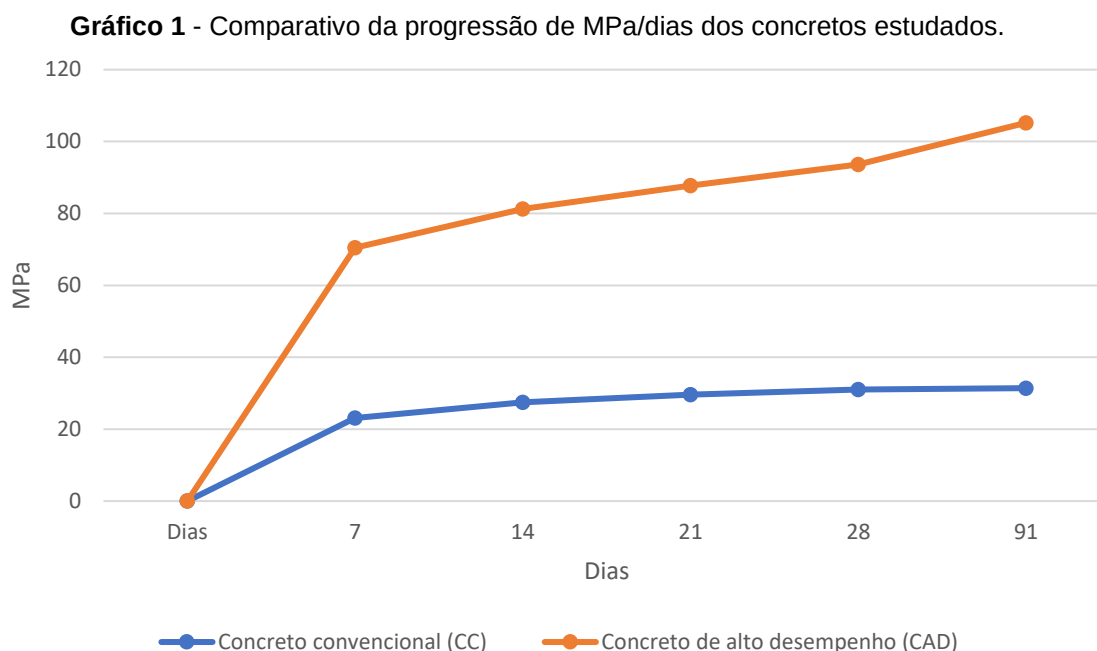
$$f_c = P/A$$

Onde:

- F_c = Resistência à compressão (MPa).
- P = Carregamento aplicado (N).
- A = Área de aplicação de carga (mm²)

Para um CAD que apresenta resistência à compressão de 70 MPa, o valor da variável f_c , demonstra sua elevada robustez, fator que aumenta sua capacidade de suportar solicitações intensas sem a ocorrência de deformações críticas. Tal desempenho associa-se às elevadas exigências estruturais relacionadas à segurança e durabilidade, justificando seu emprego em estruturas de grande porte, como edifícios, pontes, fundações profundas e elementos submetidos a elevados esforços.

Ademais, quando o CAD é comparado ao CC, que apresenta resistências à compressão entre 20 e 40 MPa, verifica-se que o primeiro alcança valores substancialmente superiores atingindo o dobro da capacidade suportada pelos CCs. Tal resultado evidencia a superioridade do CAD, apresentando vantagens na durabilidade, menor suscetibilidade a fissuras, maior densidade e melhor desempenho em ambientes sujeitos a condições agressivas. Nesse contexto, o CAD torna-se uma das melhores alternativas para projetos que demandam elevado desempenho estrutural e maior vida útil. O Gráfico 1 apresenta o comparativo da evolução dos valores de resistência à compressão (Mpa) dos concretos analisados em função do tempo de cura.



Fonte: Autor, 2025.

Com base no gráfico 1, pode-se inferir que o CAD apresenta um crescimento expressivo de MPa durante seus primeiros dias de cura, evidenciando um ganho rápido de resistência inicial. No entanto, o CC demonstra um crescimento gradual e estável, com incrementos menos significativos ao longo do tempo. Essa característica do CAD é proporcionada devido à incorporação de agregados leves em sua composição, bem como o uso de aditivos superplastificantes, que promovem a otimização do processo de hidratação do concreto.

4.2 UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS LEVES E ARGILA CALCINADA

O emprego dos agregados leves de argila calcinada tem se destacado como um dos materiais mais promissores para a incorporação ao cimento Portland. Sua obtenção ocorre por meio de argilas caulinícas ou metacaulínicas submetidas ao processo de calcinação, modificando sua estrutura molecular que apresentava um aspecto arredondado para um formato laminar. Essa transformação promove modificações físico-químicas que contribuem para o desempenho de concretos e argamassas. Segundo as pesquisas desenvolvidas por Cabral (2008), os agregados leves de argila calcinada apresentam menor massa específica quando comparados a argilas convencionais, segundo a Tabela 3.

Tabela 3 - Comparativo de massas específicas das argilas em vários estados.

Material	Massa específica (kg/m ³)
Argila Natural (úmida)	1800 - 2100
Argila Natural (seca)	1600 - 1800
Argila calcinada	350 - 640

Fonte: Cabral, 2008.

O agregado leve de argila calcinada quando empregado na composição do concreto permite, devido a suas propriedades, a redução da massa específica do material. Considerando os resultados apresentados por Cabral (2008), um concreto produzido com a incorporação desse agregado pode atingir uma massa específica de aproximadamente de 2,06 kg/dm³, inferior à do CC, que geralmente alcança valores em torno de 2,5 kg/dm³. Essa redução contribui de forma relevante para a diminuição do peso próprio das estruturas. Entretanto, segundo pesquisas de Santis (2010) indicam que a argila calcinada apresenta elevados índices de absorção de água quando empregada na produção dos concretos, apresentando valores elevados quando comparados ao valor máximo de absorção de água para tijolos maciços e blocos de cerâmica vermelha.

Tabela 4 - Absorção de água em corpos de provas de argila calcinada.

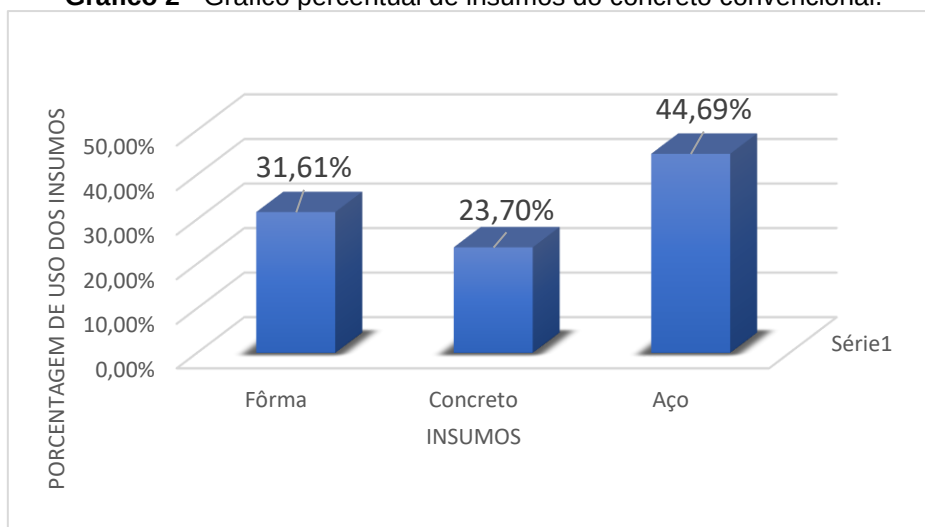
Local	Absorção de água (%)
Tambaú	20,23
Porto Ferreira	24,18
Ubarana	16,34
Leme	18,73
Itu	16,55

Fonte: Santis, 2010.

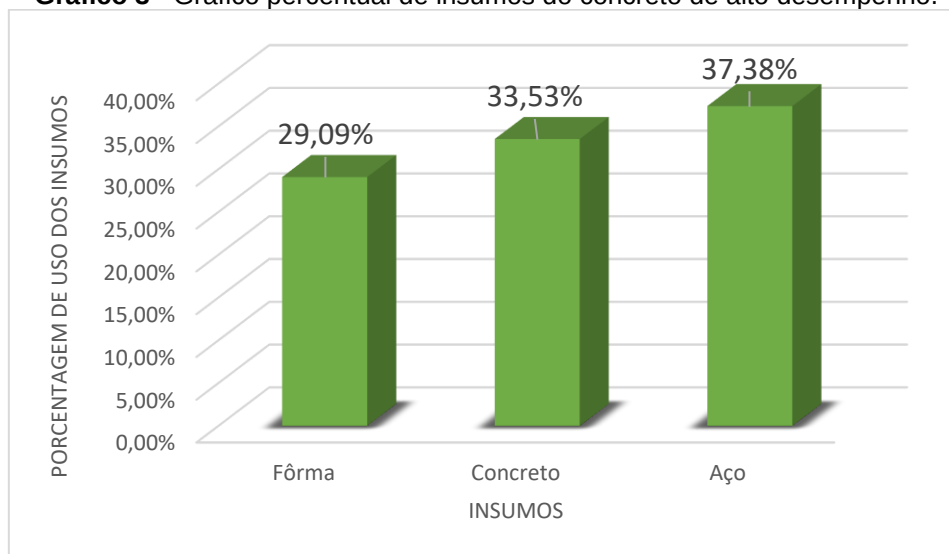
A Tabela 4 demonstra resultados provenientes de argilas de regiões da cidade de Porto Alegre, que passaram pelo procedimento de calcinação. Os valores de absorção de água dos corpos variaram entre 16,34% a 24,18%, valores esses inferiores a 25%, valor máximo de absorção de água para tijolos maciços e blocos de cerâmica vermelha, porém que apresentam resultados próximos ao limite normativo, fator que necessita de cuidados especiais na composição em concretos estruturais, para que os agregados não absorvam a água necessária para a hidratação do concreto.

4.3 INSUMOS NA PRODUÇÃO DOS CONCRETOS

A partir dos estudos compilados, foi possível realizar gráficos, em percentuais, dos custos de insumos de cada concreto, utilizando valores em reais (R\$), indicados pelos Gráficos 2 e 3.

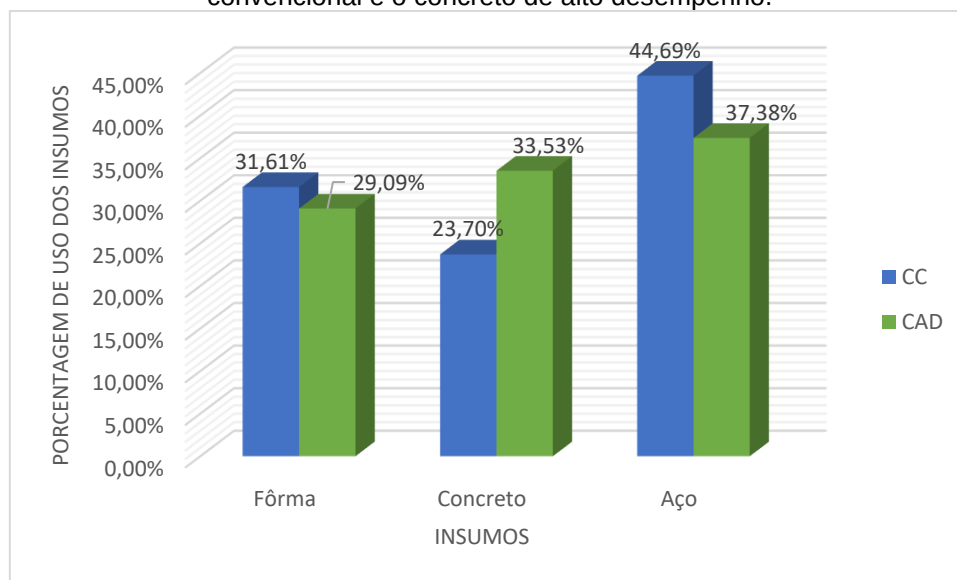
Gráfico 2 - Gráfico percentual de insumos do concreto convencional.

Fonte: Autor, 2025.

Gráfico 3 - Gráfico percentual de insumos do concreto de alto desempenho.

Fonte: Autor, 2025.

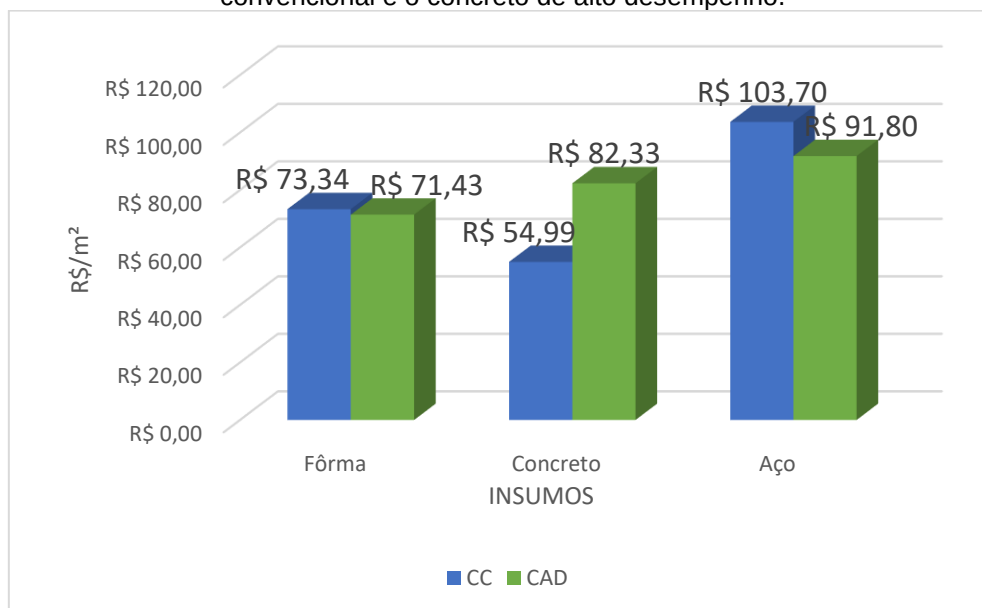
Para uma melhor visualização e análise dos resultados foi produzido outro diagrama comparativo dos custos de insumos de cada concreto, como pode ser visto no Gráfico 4.

Gráfico 4 - Gráfico comparativo dos custos percentuais de insumos entre o concreto convencional e o concreto de alto desempenho.

Fonte: Autor, 2025.

A partir destes gráficos em porcentagem, foi possível fixar valores monetários aos itens, possibilitando a avaliação e comparação do ponto de vista financeiro entre os concretos analisados. Segue no Gráfico 5 o comparativo do custo de insumos em reais por metro quadrado.

Gráfico 5 - Gráfico comparativo dos custos em R\$/m² dos insumos entre o concreto convencional e o concreto de alto desempenho.



Fonte: Autor, 2025.

De acordo com os dados demonstrados, realizou-se uma avaliação global dos insumos, que constituem os investimentos financeiros mais relevantes na produção do CAD e CC.

A análise dos Gráficos 2 e 3 demonstra que o aço é o insumo mais de maior impacto financeiro na produção de ambos os concretos, representando 44,69% no CC e 37,38% no CAD. Esse comportamento deixa claro que, mesmo com a evolução das propriedades dos concretos, a armadura permanece como o principal componente do orçamento estrutural. No caso do CAD essa concentração é mais significativa devido à necessidade de armaduras compatíveis com as elevadas resistências obtidas pelo material, fator que resulta na prevalência dele como o principal insumo dos concretos.

Além disso, observa-se um incremento significativo no custo do insumo de concreto ao migrar da tecnologia convencional para a de alto desempenho, saindo de R\$ 54,99/m² para R\$ 82,33/m², apresentando um aumento de aproximadamente 50% do valor do concreto usual. Tal acréscimo é justificado pela complexidade do traço de produção do CAD, exigindo maior consumos de aglomerantes e o uso de aditivos químicos e adições minerais, gerando o aumento no valor do concreto.

A análise global apresenta que o investimento no CAD propicia uma economia nos demais componentes da estrutura. O custo com fôrmas reduziu de R\$ 73,43/m² para 71,43/m², enquanto o gasto com o aço apresentou queda de R\$ 103,70/m² para 91,80/m². No entanto, apesar das reduções destes insumos, o CAD, continua sendo uma opção onerosa para o empreendimento, por conta das propriedades e dos benefícios superiores aos CCs.

5. CONCLUSÃO

A partir dos resultados compilados deste estudo, conclui-se que o CAD produzido com agregados leves de argila calcinada apresenta-se como uma alternativa promissora e superior aos CCs. Embora apresente custos elevados em seus insumos, sendo justificada pelo desempenho estrutural elevado, com destaque nos seguintes aspectos:

- Em termos de desempenho mecânico, o CAD com a adição de agregados leves demonstrou clara superioridade ao atingir resistências à compressão entre 70 MPa e 100 MPa, valores maiores que os CCs apresentam, dentre 20 MPa a 40 MPa. Esta propriedade aliada ao ganho acelerado de resistência inicial nos primeiros dias de cura possibilita a otimização dos cronogramas de obra e a redução das seções em elementos estruturais.
- A partir do viés tecnológico, o emprego dos agregados leves de argila calcinada é uma opção viável para a redução da massa específica do CAD, atingindo valores próximos a $2,06 \text{ kg/dm}^3$, contribuindo significativamente para a diminuição do peso das estruturas. Além de proporcionar a adoção de alternativas construtivas mais eficientes, ampliando o campo de aplicação deste material. Entretanto, constatou-se que as argilas calcinadas apresentam elevadas taxas de absorção de água, atingindo valores próximos ao limite estabelecido em normas. Em razão desta propriedade, necessita-se um rigoroso controle tecnológico na etapa de dosagem para evitar que os agregados absorvam a água destinada à hidratação do concreto. Dessa forma, a argila calcinada, quando manejada corretamente, apresenta diversos benefícios.
- Sob a perspectiva financeira, a análise global dos custos por metro quadrado do CAD com adição de agregados leves de argila calcinada, demonstra valores superiores em comparação aos CCs. Tal onerosidade ocorre devido à utilização de materiais de maior valor agregado e do controle tecnológico mais rigoroso em sua produção. No entanto, essa elevação de custos é compensada pela possibilidade de desempenhos mecânicos e de durabilidade acentuados, além da menor necessidade de

intervenções de manutenção ao longo da vida útil da estrutura. Logo, embora mais oneroso em termos imediatos, o CAD produzido com agregados de argila calcinada, pode-se apresentar como uma alternativa economicamente vantajosa quando analisado sob uma perspectiva de custos globais e ciclo de vida da construção.

Portanto, o CAD produzido com a incorporação de agregados leves de argila calcinada, mostra-se como uma alternativa viável e superior em comparação aos CCs. Trata-se de um material indicado para empreendimentos que exigem elevada confiabilidade estrutural, segurança, estabilidade e vida útil prolongada. Assim, o uso do CAD com a argila calcinada tornou-se adequado para obras de grande porte e ambientes suscetíveis a condições agressivas, onde a resistência mecânica e durabilidade são essenciais.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando a metodologia adotada neste trabalho, recomenda-se que estes estudos avancem para abordagens experimentais e quantitativas. Logo, sugere-se a realização de ensaios tecnológicos para validar os resultados obtidos nesta pesquisa, além de garantir melhores análises comparativas com os CCs.

Ademais, é pertinente que estudos futuros avaliem o comportamento do CAD, com agregados de argila calcinada, quando submetido a ambientes agressivos, tais como aqueles caracterizados pela presença de agentes químicos, variações de temperatura e elevada umidade. Além de investigar de forma mais detalhada a trabalhabilidade do concreto resultante e os procedimentos de controle tecnológico empregados em sua produção.

Por fim, aponta-se a necessidade de ampliação das pesquisas relacionadas ao impacto ambiental do CAD, contemplando aspectos como o consumo de recursos naturais e os potenciais benefícios ambientais associados ao uso de agregados leves de argila calcinada, contribuindo para o desenvolvimento de soluções mais sustentáveis na construção civil.

6. REFERÊNCIAS

AITCIN, P. C. **High-Performance Concrete** 2. ed. New York: Routledge, 2016.

ALEXANDRE, J.; SALES, A.; LIMA, R. C. **Concretos leves com agregados artificiais: propriedades e aplicações**. Revista Matéria, v. 25, n. 2, p. 1-12, 2020.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Concreto de alto desempenho: definição histórica e fundamentos. In: ISAIA, G. C; HELENE, P; TUTIKIAN, B. F. (Org.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. Cap. 36, p. 525.

ANDRADE, D. S.; COLARES, G. S. Avaliação microestrutural de agregados leves produzidos a partir de argilas brasileiras. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 15, n. 3, p. 1–15, 2022.

ARAÚJO, J. M. de. **Curso de Concreto Armado**. 5. ed. Rio Grande, RS: Editora Dunas, 2023.

Argila Calcinada de Grau Industrial com Alto Teor de Argila para Cerâmica para Queima de Azulejos. Disponível em:

<<https://portuguese.alibaba.com/product-detail/Calcined-clay-Industrial-grade-clay-with-1601201226628.html>>. Acesso em: 18 dez. 2025.

Argila Expandida Grauda 3222 - Pedragil. Disponível em:

<<https://www.agrosolo.com.br/produto/argila-expandida-grauda-3222-pedragil-89151>>. Acesso em: 18 dez. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - **NBR 12142**: Concreto — Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland. Preparo, controle e recebimento. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522**: Concreto — Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9935: Agregados** — Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

BAUER, J. **Materiais de construção**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1979. (OK)
CARDOSO, A. S.; *et al.* Análise da Influência da Adição de Sílica Ativa como Substituição Parcial do Cimento em Argamassas Contra Ação de CO₂ e Íons Cloreto. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, Recife, v. 2, n. 3, p. 167-175, 28 ago. 2017.

Concreto de Alto Desempenho - CAD. Disponível em:

<<https://www.supermix.com.br/produto/alto-desempenho/>>. Acesso em: 2 dez. 2025.

DUGAT, J.; ROUX, N.; BERNIER, G. Mechanical properties of reactive powder concretes. In: **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, vol. 29, may, 1996, p.233-240.

DYNAMISUMB. **Argilas Calcinadas - Entenda o que é e o seus benefícios na redução de custos na produção de cimento.** Disponível em: <<https://dynamis-br.com/argilas-calcinadas-entenda-o-que-e-e-seus-beneficios-na-reducao-de-custos/>>. Acesso em: 18 dez. 2025.

Efeito do Processo de Calcinção na Atividade Pozolânica da Argila Calcinada - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Argila-calcinada-no-forno-rotativo_fig1_329403955 [accessed 26 Dec 2025]

ELSHARIEF, A.; COHEN, M. D.; OLEK, J. Influence of Lightweight Aggregate on the Microstructure and Durability of Mortar. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 7, p. 1368-1376, 2005.

FARIAS, J. R. DE; **Efeitos da utilização de argila calcinada em compósitos cimentícios.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

FILIPE, C.F. *et al.* **Argila expandida como agregado para concreto.** Pelotas: Universidade Federal de Pelotas, 2018.

FRÍAS, M. Pozolanas naturais e argilas calcinadas. In: ISAIA, G. C. **Concreto: ciência e tecnologia.** São Paulo: IBRACON, 2011. v. 1, p. 421–462.

GARNIER, J.; VECCHIO, F. J. “Use of Recycled Concrete Aggregates in Concrete.” Em: **Technology Report – Structural Concrete with Recycled Aggregates**, fib Bulletin 55, 2016.

HELENE, P. R. L. **Curso patologias de estruturas de concreto: mitos e verdades.** Concreto & Construções, v. 38, n. 60, p. 108–112, 2010. (OK)
HOLANDA, J. N. F. **Processamento e caracterização de argilas cauliniticas calcinadas para aplicação como pozolanas.** Cerâmica, São Paulo, v. 54, n. 331, p. 305–310, 2008.

ISAIA, G. C. **Concreto: ensino, pesquisa e realização.** São Paulo: IBRACON, 2005.

ISAIA, G. C.; HELENE, P.; TUTIKIAN, B. F. Concreto de alto desempenho. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Org.). **Concreto: Ciência e Tecnologia.** São Paulo: IBRACON, 2011. v. 2, cap. 36, p. 1531–1572.

LIMA, S. A.; TOLEDO, R. D. F. **Atividade pozolânica de argilas calcinadas: influência das condições de calcinação**. *Cerâmica*, São Paulo, v. 54, n. 332, p. 364–371, 2008.

MACHADO, E. **Tecnologia de fabricação de pozolanas e materiais suplementares cimentícios**. São Paulo: Votorantim Cimentos, 2017.

MAYCÁ, J.; CREMONINI, R. A.; RECENA, F. A. **Contribuição ao Estudo da Argila Expandida Nacional Como Alternativa de Agregado Graúdo Para Concretos Leves Estruturais (CLE)**. Trabalho apresentado no Curso de Especialização em Construção Civil 2006/2008 – NORIE, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: Pini, 1994.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. Editora PINI, São Paulo, 1997.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto-5ª Edição**. Bookman Editora, 2016.

OLIVEIRA, I. R.; BARBOSA, P. A. Reatividade pozolânica de argilas calcinadas para uso em compósitos cimentícios. **Revista Cerâmica**, São Paulo, 2006.

PEREIRA, M. G. F. **Potencial de utilização de agregados leves na produção de concretos estruturais**. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2012.

RECENA, F. A. P. **Dosagem e controle da qualidade de concretos convencionais de cimento Portlan**. 1. ed. Porto Alegre, EDIPUCRS, 2015.

RIBEIRO, M.C. PINTO SILVA, J.D., STARLING, T. **Materiais de construção Civil**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 4ª edição. 2013.

SANTIS, B. C. **Agregado Leve de Argila Calcinada Para Uso em Concreto Estrutural: viabilidade da cerâmica vermelha do estado de São Paulo**. São Carlos, 2012. 132 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

SANTIS, B.C; ROSSIGNOLO, J. A. **Avaliação da influência de agregados leves de argila calcinada no desempenho de concretos estruturais**. *Acta Scientiarum. Technology*, v. 32, n. 2, p. 135-142, 2010.

SANTOS, L. B. S. Análise custo-benefício entre concreto convencional e concreto de alto desempenho: estudo de caso de um edifício residencial. **Revista Científica Semana Acadêmica**, Fortaleza, ano MMXXI, n. 205, 30 set. 2024.

SCRIVENER, K. L.; MARTIRENA, F.; FERNÁNDEZ, L. Calcined clay cement (LC3). **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 49–56, 2018.

SEBRAE. Associação Brasileira de Cerâmica. **Panorama do setor de cerâmica vermelha no Brasil**. Brasília: SEBRAE, 2008.

SILVA, A. L. da; CAMPOS, P. H. R. Propriedades de concretos leves com agregados estruturais. **Revista Matéria**, v. 23, n. 2, p. 1–11, 2018.

SOUZA, G. P.; SANTANA, L. N. L. **Transformações estruturais da caulinita submetida a calcinação**. Cerâmica, São Paulo, v. 59, n. 351, p. 375–382, 2013.

SOUZA, N. S. L de.; *et al.* Desenvolvimento de agregados leves a partir de resíduo de corte de pedras ornamentais (granitos e mármore) e argila. **Matéria (Rio de Janeiro)**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 1, p. 1-19, 2020.

SOUZA, R. A.; FIGUEIREDO, E. P. Efeitos dos agregados e da compactação na densidade e resistência do concreto. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, São Paulo, 2012.

TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. R. L. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: PINI, 2011.

Vermiculita Expandida Fina - Gaya. Disponível em:
<<https://www.agrosolo.com.br/produto/vermiculita-expandida-fina-gaya-90959>>.
Acesso em: 18 dez. 2025.

WASSERMAN, R.; BENTUR, A. Interfacial interactions in lightweight aggregate concretes and their influence on the concrete strength. **Cement and Concrete Composites**, v. 18, p. 67-76, 1996.