



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E
TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA GOIANO - CAMPUS RIO VERDE
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL



Microconcreto de alto desempenho: Análise da trabalhabilidade e resistência a compressão.

GABRIEL SOUZA COSTA

Rio Verde, GO

2025

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA
GOIANO – CAMPUS RIO VERDE
BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL**

**Microconcreto de alto desempenho: Análise da trabalhabilidade e
resistência a compressão.**

GABRIEL SOUZA COSTA

Trabalho de curso apresentado, como parte das
exigências para obtenção do título de
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL, do
Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia Goiano- Campus Rio Verde.

Orientador: Doutor Michell Macedo Alves

Rio Verde, GO
Fevereiro – 2025

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema Integrado de Bibliotecas do IF Goiano - SIBi**

C838m Souza Costa, Gabriel
Microconcreto de alto desempenho: Análise da trabalhabilidade e
resistência a compressão. / Gabriel Souza Costa. Rio Verde 2025.
83f. il.
Orientador: Prof. Dr. Michell Macedo Alves.
Tcc (Bacharel) - Instituto Federal Goiano, curso de 0220084 -
Bacharelado em Engenharia Civil - Integral - Rio Verde
(Campus Rio Verde).
1. Aditivos. 2. Metacaulim. 3. Sílica ativa. 4. Água. 5.
Aglomerante. I. Título.



TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

- ☐ Tese (doutorado)
☐ Dissertação (mestrado)
☐ Monografia (especialização)
☒ TCC (graduação)

- ☐ Artigo científico
☐ Capítulo de livro
☐ Livro
☐ Trabalho apresentado em evento

☐ Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Gabriel Souza Costa

Matrícula:

2020102200840042

Título do trabalho:

Microconcreto de alto desempenho: Análise da trabalhabilidade e resistência a compressão.

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: ☒ Não ☐ Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 17 / 2 / 2027

O documento está sujeito a registro de patente? ☐ Sim ☒ Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? ☒ Sim ☐ Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.



Documento assinado digitalmente

GABRIEL SOUZA COSTA

Data: 17/02/2025 21:58:14-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Rio Verde - GO

Local

17 / 2 / 2025

Data

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:



Documento assinado digitalmente

MICHELL MACEDO ALVES

Data: 17/02/2025 21:55:53-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 1/2025 - CCTEDI-RV/GEPTNM-RV/DE-RV/CMPRV/IFGOIANO

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CURSO

Ao(s) 17 dia(s) do mês de fevereiro de 2025, às 19 horas, reuniu-se a banca examinadora composta pelos docentes: Prof. Dr. Michell Macedo Alves (orientador), Prof. Dr. Heitor Cardoso Bernardes (membro interno) e Prof. Dr. Edgar Bacarji (membro externo) para examinar o Trabalho de Curso intitulado "Microconcreto de alto desempenho: Análise da trabalhabilidade e resistência à compressão." do estudante Gabriel Souza Costa, Matrícula nº do Curso de Engenharia Civil do IF Goiano – Campus Rio Verde. A palavra foi concedida ao estudante para a apresentação oral do TC, houve arguição do candidato pelos membros da banca examinadora. Após tal etapa, a banca examinadora decidiu pela APROVAÇÃO do estudante. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata que segue assinada pelos membros da Banca Examinadora.

Observação:

() O(a) estudante não compareceu à defesa do TC.

Documento assinado eletronicamente por:

- **Michell Macedo Alves, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 17/02/2025 21:21:15.
- **Heitor Cardoso Bernardes, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 17/02/2025 21:23:10.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 17/02/2025. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 677162

Código de Autenticação: 618078651f



INSTITUTO FEDERAL GOIANO

Campus Rio Verde

Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, 01, Zona Rural, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970

(64) 3624-1000

Fevereiro, 2025

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, pela força, sabedoria e paciência que Ele me concedeu durante toda a jornada deste trabalho. Sem a sua bênção e proteção, nada seria possível. Aos meus pais, Suelo Costa e Luciana Costa, meu irmão, Otávio Costa, pela dedicação, amor incondicional e por sempre acreditarem em mim, mesmo nos momentos mais difíceis. Vocês são a base de tudo o que sou e me proporcionaram todas as condições para que eu chegasse até aqui. Agradeço também aos meus familiares, em especial meus avós. Ermoge Costa e Esmeralda Costa, que sempre estiveram presentes, oferecendo apoio e carinho. À Verc Concreteira, em especial para meu primo Helliaby Costa, pelo apoio fundamental e por acreditarem no meu trabalho, além de disponibilizarem recursos e orientações que foram essenciais para o desenvolvimento deste TCC. À minha namorada, Isabella Nobrega, pela compreensão, paciência e apoio irrestrito. Você esteve ao meu lado, me incentivando nos momentos de desânimo, e sua presença foi essencial para que eu conseguisse seguir com firmeza até o final. Aos meus amigos, por me motivarem a seguir em frente e por me ajudarem a enfrentar os desafios dessa caminhada. Por fim, agradeço ao meu orientador, Professor Michell Macedo Alves, pela orientação dedicada, pelas valiosas contribuições e pela paciência durante o processo. Sua expertise e compromisso com o meu crescimento acadêmico foram fundamentais para a realização deste trabalho. A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste TCC, meu muito obrigado!

BIOGRAFIA DO ALUNO

Meu nome é Gabriel Souza Costa, e sou estudante de Engenharia Civil no IF Goiano – Campus Rio Verde. Desde o início da minha trajetória acadêmica, sempre tive um grande interesse pela área da engenharia civil e suas aplicações práticas, principalmente no campo dos materiais de construção. Em 2023, iniciei minha caminhada na pesquisa científica por meio de uma iniciação científica voltada para o estudo do microconcreto, um material com grande potencial de aplicação em diversas áreas da construção civil. Durante esse período, tive a oportunidade de explorar as propriedades e os benefícios do microconcreto, realizando experimentos e analisando seus comportamentos sob diferentes condições. A experiência adquirida na iniciação científica foi fundamental para o meu crescimento acadêmico e despertou ainda mais o meu interesse pelo tema. Com isso, decidi seguir para a elaboração do meu Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) na mesma área, aprofundando os conhecimentos adquiridos e buscando novos insights sobre o uso e as aplicações do microconcreto. Ao longo do desenvolvimento do TCC, pude contar com o apoio de diversos professores e profissionais da área, o que foi essencial para a realização deste trabalho. A pesquisa sobre o microconcreto proporcionou-me uma visão mais ampla das inovações tecnológicas que têm potencial para transformar o setor da construção civil, e este TCC reflete minha dedicação e interesse em contribuir para o avanço dessa área. Com a conclusão deste trabalho, espero poder aplicar os conhecimentos adquiridos para contribuir com soluções mais sustentáveis e eficientes para a engenharia civil.

RESUMO

COSTA, GABRIEL SOUZA. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde – GO, fevereiro de 2025. Estudo do microconcreto: Uma revisão sistemática de literatura. Microconcreto de alto desempenho: Análise da trabalhabilidade e resistência a compressão. Orientador: Michell Macedo Alves. O objetivo desse trabalho é realizar uma revisão sistemática da literatura sobre o microconcreto, abrangente dos avanços recentes na investigação do microconcreto, destacando os principais desafios e oportunidades de pesquisa nessa área em constante evolução, além disso, realizar ensaios focando principalmente nos métodos de caracterização e nos efeitos da variação da relação água/cimento e da adição de aditivos superplastificantes nas propriedades de trabalhabilidade e resistência à compressão. A revisão sistemática utilizou o protocolo prisma para sua realização, já metodologia utilizada para os ensaios inclui a análise de estudos existentes e realização de ensaios laboratoriais para investigar o comportamento do MCAD em diferentes proporções de componentes. Os resultados da revisão mostraram possíveis lacunas de pesquisa como a retração do microconcreto podem ser controlada para melhorar a durabilidade dos reparos e que aditivos e substituições de agregados podem aumentar a trabalhabilidade e a resistência à compressão, já os ensaios demonstram que a relação água/cimento tem uma influência significativa nas propriedades do material, com menores relações resultando em maior resistência à compressão.

Palavras-chaves: Aditivos. Metacaulim. Sílica ativa. Água. Aglomerante.

ABSTRACT

COSTA, GABRIEL SOUZA. *Federal Institute of Education, Science and Technology Goiano – Rio Verde Campus – GO, February 2025. Study of Microconcrete: A Systematic Literature Review. High-Performance Microconcrete: Workability and Compressive Strength Analysis. Advisor: Michell Macedo Alves. Analysis of workability and compressive strength. Advisor: Michell Macedo Alves. The objective of this work is to carry out a systematic review of the literature on microconcrete, comprehensive of recent advances in the investigation of microconcrete, highlighting the main challenges and research opportunities in this constantly evolving area, in addition, to carry out tests focusing mainly on characterization methods and the effects of varying the water/cement ratio and the addition of superplasticizing additives on workability and compressive strength properties. The systematic review used the prism protocol to carry it out, while the methodology used for the tests includes the analysis of existing studies and carrying out laboratory tests to investigate the behavior of MCAD in different proportions of components. The results of the review showed possible research gaps such as microconcrete shrinkage can be controlled to improve the durability of repairs and that additives and aggregate replacements can increase workability and compressive strength. Tests demonstrate that the water/cement ratio has a significant influence on the material's properties, with lower ratios resulting in greater compressive strength.*

Keywords: *Additives. Metakaolin. Active silica. Water. Agglomerating.*

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Planejamento RSL.....	24
Figura 2 - Critérios de Inclusão e Exclusão.	28
Figura 3 - Fluxograma de execução da RLS.	29
Figura 4 - Distribuição de artigos encontrados nas bases de dados.	32
Figura 5 - Saída de elementos finitos devido à contração diferencial.....	35
Figura 6 - Comparação da rigidez do piso entre estruturas existentes e reformadas	36
Figura 7 - Variação da resistência à compressão das argamassas da série LS em função da dosagem do aditivo ($a/c = 0,5$).	37
Figura 8 - Curva granulométrica da areia artificial	58
Figura 9 - Mistura de concreto.	61
Figura 10 - Execução do ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone, segundo ABNT NBR 16889:2020.....	61
Figura 11 - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, segundo ABNT NBR 16889:2020 - Traço 01.....	63
Figura 12 - Ensaio de resistência à compressão de corpo de prova cilíndrico, segundo ABNT NBR 5739:2018.....	63
Figura 13 - Primeira medição de abatimento do Traço 03.....	64
Figura 14 -Primeira medição de abatimento do Traço 01.....	65
Figura 15 - Primeira medição de abatimento do Traço 02.....	66
Figura 16 - Gráfico Tempo (min) X Abatimento (mm) Traço 01.....	67
Figura 17 - Gráfico Tempo (min) X Abatimento (mm) Traço 02.....	67
Figura 18 - Gráfico Tempo (min) X Abatimento (mm) Traço 02.....	68
Figura 19 - Gráfico de resistência a compressão.	69
Figura 20 - Gráfico de relação Água/aglomerante x Resistência a Compressão.	70

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Protocolo prisma.	23
Tabela 2 - Teste das strings.	25
Tabela 3 - Resultados de busca.	27
Tabela 4 - Artigos encontrados com RSL.	30
Tabela 5 - Quantidade de artigos aprovados nas bases de dados.	32
Tabela 6 - Percentual de artigos aprovados por nacionalidade.	32
Tabela 7 - Resistência a compressão dos microconcretos.	38
Tabela 8 - Propriedades mecânicas e de durabilidade dos concretos.	39
Tabela 9 - Caracterização do Cimento Portland da pesquisa.	56
Tabela 10 - Características químicas do metacaulim.	57
Tabela 11 - Características químicas do metacaulim.	57
Tabela 12 - Caracterização da areia natural	57
Tabela 13 - Caracterização da areia artificial.	58
Tabela 14 - Características Aditivo superplastificante L2020.	59
Tabela 15 - Traço de referência.	59
Tabela 16 - Traços de microconcreto e seus respectivos consumos de materiais.	60
Tabela 17 - Abatimentos.	64
Tabela 18 - Projeção de abatimento com o tempo.	68
Tabela 19 - Projeção de abatimento com o tempo em %.	69
Tabela 20 - Resistência a compressão.	69
Tabela 21 - Projeção de resistência a compressão.	70

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES

#325	Referência à malha da peneira usada para determinar a finura do cimento
°C	Grau Celsius (unidade de temperatura)
a/a	Relação água/aglomerante
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS (Y.)	Absorção de Água
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> (Sociedade Americana de Testes e Materiais)
CAD	Concreto de Alto Desempenho
CAO	Óxido de cálcio
CAR	Concreto de Alta Resistência
CFRP	<i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i> (Polímero Reforçado com Fibra de Carbono)
Cm ³	Centímetro cúbico
COCHRANE	Referência ao grupo Cochrane, que desenvolve revisões sistemáticas na área da saúde
CP V RS	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial com Resistência a Sulfatos
ECS	Módulo de Elasticidade
ESBELT 2.1	<i>Software</i> para análise estrutural
FC	Resistência à Compressão
Fe ₂ O ₃	Óxido de ferro
FRCD	Resistência à Flexão Direta
G/Cm ³	Grama por centímetro cúbico (unidade de densidade/massa específica)

GPa	Gigapascal (Unidade de medida de módulo de elasticidade)
IBRACON	Instituto Brasileiro do Concreto
IPT/EPUSP	Instituto de Pesquisas Tecnológicas / Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
IV (%)	Índice de Vazios (%)
Kg	Quilograma
KG/M ³	Quilograma por metro cúbico (unidade de massa unitária)
L	Litro
LS	Lignossulfonato
M ² /Kg	Metro quadrado por quilograma (unidade de finura Blaine)
m ³	Metro cúbico
MADP	Microconcreto de Alto Desempenho
Mgo	Óxido de magnésio
mm	Milímetro
MPa	Megapascal (Unidade de medida de pressão e resistência)
NBR	Norma Brasileira
NEWCASTLE-OTTAWA	Escala de avaliação de qualidade para estudos observacionais
NS	Sulfonato de Naftaleno
P.F.	Perda ao Fogo (<i>Loss on Ignition</i> - LOI), indicando a perda de massa após aquecimento
PRISMA	<i>Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses</i>
PVA	Polivinil Álcool
R ²	Coefficiente de determinação (usado em estatística para avaliar a precisão de um modelo)

RMF	Rejeito de Minério de Ferro
RSL	Revisão Sistemática de Literatura
SCC	<i>Self-Consolidating</i> Concrete (Concreto Autoadensável)
SEM	Microscopia Eletrônica de Varredura (<i>Scanning Electron Microscopy</i>)
SiO ₂	Dióxido de silício
SO ₃	Trióxido de enxofre
XRD	Difração de Raios-X (<i>X-ray Diffraction</i>)

ÍNDICE GERAL

I. INTRODUÇÃO	17
II. OBJETIVO GERAL	18
CAPÍTULO 01	19
1. INTRODUÇÃO	21
2. OBJETIVO	22
3. JUSTIFICATIVA	22
4. METODOLOGIA	22
4.1 Planejamento	24
4.1.1 Necessidade de Uma RSL e Escolha do Tema	24
4.1.2 Definição de bases de dados	25
4.1.3 Definição de Strings de busca	25
4.2 Execução	27
4.2.1 Busca e seleção de artigos	27
4.2.2 Critérios de inclusão e exclusão e qualidade dos artigos	27
4.3 Extração	29
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
5.1 Artigos aprovados e suas contribuições	31
5.2 Características dos artigos aprovados	33
5.3 Microconcreto em reforço estrutural	34
5.4 Microconcreto em ligações e desempenho sísmico	36
5.5 Propriedades físicas e mecânicas do microconcreto	37
5.6 Aspectos de sustentabilidade	40
6. CONCLUSÕES	42
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43
CAPÍTULO 02	47
1. INTRODUÇÃO	49

2.	REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	50
2.1	Microconcreto de alto desempenho com utilização de metacaulim.....	50
2.1.1	Histórico e definição.....	52
2.1.2	Classificação.....	52
2.1.3	Trabalhabilidade	53
3.	OBJETIVO	55
4.	JUSTIFICATIVAS.....	55
5.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	56
5.1	Materiais	56
5.1.1	Cimento	56
5.1.2	Metacaulim	56
5.1.3	Areia Natural	57
5.1.4	Areia Artificial.....	57
5.1.5	Água.....	58
5.2	Métodos	59
5.2.1	Composição dos traços.....	59
5.2.2	Ensaio para a determinação da consistência do concreto fresco	61
5.2.3	Resistência à compressão simples	63
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
6.1	Consistência do concreto fresco	64
6.2	Resistência à compressão simples	69
7.	CONCLUSÕES	71
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72
III.	CONCLUSÃO GERAL	76
IV.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS GERAIS.....	77

I. INTRODUÇÃO

O concreto é um material essencial e amplamente utilizado na construção civil, conhecido por sua versatilidade, durabilidade e acessibilidade (Mehta & Monteiro, 2014). Desde sua descoberta no final do século XIX, o concreto tem transformado a maneira de projetar e construir, com seu uso se expandindo ao longo do século XX, fazendo dele o segundo material mais utilizado no mundo, perdendo apenas para a água (Kelm, 2011).

O avanço das tecnologias no campo da engenharia resultou no desenvolvimento de novas variantes de concreto, como o microconcreto de alto desempenho (MCAD), que busca superar as limitações dos concretos tradicionais. Este é projetado para apresentar propriedades superiores, especialmente em termos de resistência à compressão e trabalhabilidade, além de uma durabilidade aprimorada, tornando-o ideal para aplicações exigentes na construção civil (Sahmaran *et al.*, 2007; Neville, 2011). A utilização de agregados finos e a adição de aditivos especiais são características que conferem ao MCAD capacidade de aplicação em obras de alto desempenho e infraestrutura (Pinto & Ferreira, 2008; Barbosa & Brito, 2012).

O estudo do MCAD realiza uma análise microscópica dos seus componentes e das interações entre os grãos de cimento, os poros e as fases líquidas e sólidas podem fornecer insights importantes para a melhoria das propriedades do material (Neville, IBRACON, 2014). O controle preciso da dosagem de seus constituintes, assim como a relação entre água e cimento, é crucial para otimizar a trabalhabilidade e a resistência à compressão do concreto, dois fatores fundamentais para a performance das estruturas (Souza & Silva, 2016). A trabalhabilidade refere-se à facilidade com que o concreto pode ser misturado, transportado e colocado, enquanto a resistência à compressão reflete a capacidade do concreto de suportar cargas sem falhas (Souza & Silva, 2016).

Esse estudo também tem contribuído para o aprimoramento das práticas construtivas, oferecendo soluções mais duráveis, seguras e economicamente viáveis. A análise detalhada das variáveis que influenciam essas propriedades é essencial para garantir o desempenho esperado das estruturas e reduzir custos de manutenção ao longo do tempo (Gomes *et al.*, 2018). Ao investigar a interação entre os componentes do microconcreto e suas proporções, é possível obter materiais que atendem melhor às exigências modernas da construção civil, promovendo não apenas a sustentabilidade ambiental, mas também a segurança e a longevidade das construções.

Desta forma, este trabalho visa analisar os avanços de pesquisa e métodos de caracterização do microconcreto, além de aprofundar o conhecimento sobre essas interações que buscam otimizar o desempenho do MCAD, ampliando suas aplicações em diferentes contextos de obras.

II. OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é realizar uma revisão sistemática da literatura sobre o microconcreto, com foco nos avanços recentes, métodos de caracterização, e nas interações entre seus constituintes, além de investigar e correlacionar a influência da variação da relação Água/Cimento e a adição de aditivos superplastificantes nas propriedades de trabalhabilidade e resistência à compressão do material, buscando um equilíbrio entre essas propriedades para aplicações estruturais eficientes na construção civil.

CAPÍTULO 01

Estudo do microconcreto: Uma revisão sistemática de literatura.

Study of microconcrete: A systematic literature review.

RESUMO

COSTA, GABRIEL SOUZA. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde – GO, fevereiro de 2025. **Estudo do microconcreto: Uma revisão sistemática de literatura. Microconcreto de alto desempenho: Análise da trabalhabilidade e resistência a compressão. Orientador: Michell Alves Macedo.** O concreto é um dos materiais mais amplamente utilizados na construção civil, e devido ao avanço da sua tecnologia e desenvolvimento de seus componentes, sua resistência, durabilidade e versatilidade vêm sendo aprimoradas. Nesse sentido, o microconcreto desempenha um papel fundamental em suas propriedades mecânicas e físicas, influenciando diretamente seu desempenho em diferentes condições ambientais e estruturais. No entanto, o estudo ainda tem muitas vertentes a serem exploradas que podem trazer melhoras significativas nas estruturas de concreto. Neste contexto, este trabalho propõe uma revisão abrangente dos avanços recentes na investigação do microconcreto, destacando os principais desafios e oportunidades de pesquisa nessa área em constante evolução. A revisão revelou achados importantes, como o aumento significativo da resistência ao cisalhamento quando utilizado como ponte de aderência entre concreto velho e novo, melhorado pela adição de *filler* de granito. Métodos de *jacketting*, incluindo CFRP, jaquetas de aço e SCC, mostraram vantagens específicas para reforço estrutural, apesar de suas desvantagens. Estudos também indicaram que a retração do microconcreto pode ser controlada para melhorar a durabilidade dos reparos e que aditivos e substituições de agregados podem aumentar a trabalhabilidade e a resistência à compressão, demonstrando o potencial do microconcreto para aprimorar as propriedades mecânicas e físicas das estruturas.

Palavras-chave: Aditivos. Propriedades. Reforço. Estrutural.

ABSTRACT

COSTA, GABRIEL SOUZA. *Federal Institute of Education, Science and Technology Goiano – Rio Verde Campus – GO, February 2025. Study of Microconcrete: A Systematic Literature Review. High-Performance Microconcrete: Workability and Compressive Strength Analysis. Advisor: Michell Macedo Alves.* Concrete is one of the most widely used materials in civil construction, and due to the advancement of its technology and development of its components, its strength, durability and abilities have been improved. In this sense, microconcrete plays a fundamental role in its mechanical and physical properties, directly influencing its performance in different environmental and structural conditions. However, the study still has many aspects to be explored that can bring significant improvements to concrete structures. In this context, this work proposes a comprehensive review of recent advances in microconcrete research, highlighting the main challenges and research opportunities in this constantly evolving area. The review revealed important findings, such as the significant increase in shear strength when used as a fixing bridge between old and new concrete, improved by the addition of granite filler. Jacketing methods, including CFRP, steel jackets, and SCC, have shown specific advantages for structural reinforcement despite their specifications. Studies have also indicated that microconcrete shrinkage can be controlled to improve the durability of repairs and that additives and aggregate replacements can increase workability and strength to specification, demonstrating the potential of microconcrete to improve the mechanical and physical properties of structures.

Keywords: Additives. Properties. Structural. Reinforcement.

1. INTRODUÇÃO

O concreto teve sua descoberta no fim do século XIX, e no século posterior o seu uso se tornou cada vez mais intensivo, transformando a maneira de construir e projetar estruturas. Assim, levando em consideração as construções atuais, “o concreto é o segundo material mais largamente utilizado pelo homem, perdendo apenas para a água” (KELM, 2011, p. 10). Nesse sentido, a indústria da construção tem presenciado avanços tecnológicos constantes e o concreto, um dos materiais mais amplamente utilizados, não fica para trás.

Por conseguinte, o concreto na forma mais básica, é composto da mistura entre cimento Portland, água e agregados como areia e brita que, nas primeiras horas, apresenta-se em um estado capaz de ser moldado em fôrmas das mais variadas formas geométricas. Posteriormente endurece e se torna resistente após um processo de cura, sendo amplamente utilizado na construção civil para a criação de estruturas como fundações, pilares, lajes e paredes (SOKOLOVICZ, 2013).

Nesse sentido, o estudo e desenvolvimento das tecnologias como: o estudo do microconcreto, é considerado relevante para a análise das características físicas do concreto. Assim, atualmente, duas das mais desenvolvidas sociedades: Estados Unidos e Canada, consideram o investimento no estudo das estruturas de concreto, como um dos mais importantes, pois entendem que avanços nesta área podem contribuir muito economicamente e na qualidade de vida da população (NEVILLE, IBRACON, 2016).

No entanto, compreender o microconcreto é essencial para a análise e aprimoramento de suas propriedades mecânicas e durabilidade. Desta forma, o microconcreto é um campo fascinante de estudo que busca compreender os intrincados arranjos e interações entre os componentes básicos desse material de construção essencial. Dessa maneira, no estudo do concreto, sua verdadeira força reside na organização e nas propriedades. Ao examinar em escala microscópica os grãos de cimento, os poros, as interfaces entre as fases sólidas e líquidas, e as reações químicas em curso, podemos desvendar os segredos por trás das características mecânicas, durabilidade e desempenho global do concreto. Além disso, o conhecimento aprofundado das propriedades do microconcreto pode auxiliar na redução de custos de manutenção e reparo, contribuindo para a longevidade das construções e a sustentabilidade ambiental (NEVILLE, IBRACON, 2016).

A partir do entendimento do microconcreto, nota-se uma necessidade crescente de desenvolver materiais de construção que sejam não apenas economicamente viáveis, mas também ecologicamente sustentáveis, seguras e duráveis. Considerando a importância do concreto na construção civil e seu impacto abrangente na economia e no meio ambiente, a presente revisão é um passo essencial para identificar lacunas de conhecimento e direcionar futuras pesquisas.

Neste contexto, dada a relevância do tema, o presente estudo apresenta uma revisão sistemática de literatura que tem como objetivo explorar os principais estudos e descobertas relacionados ao microconcreto. São examinados artigos científicos, teses, dissertações e outros materiais relevantes, com foco em aspectos como a influência dos agregados no microconcreto, interação água-cimento e os processos de cura.

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho foi realizar uma revisão sistemática da literatura sobre o microconcreto, visando compreender e analisar os principais avanços, métodos de caracterização, influência dos constituintes, suas interações, desempenho, bem como apresentar propostas em termos de pesquisas futuras.

3. JUSTIFICATIVA

O microconcreto é um material cimentício de crescente interesse devido às suas propriedades mecânicas aprimoradas, versatilidade e potencial de aplicação em diferentes contextos da engenharia civil, como reforço estrutural e elementos de pequena espessura. No entanto, apesar do avanço das pesquisas, há uma necessidade contínua de atualização do estado da arte, considerando as novas formulações, metodologias de produção e aplicações emergentes desse material.

Dessa forma, uma revisão sistemática da literatura se torna essencial para identificar tendências recentes, avaliar o desempenho do microconcreto em diferentes cenários e apontar lacunas ainda existentes no conhecimento técnico e científico. Além disso, tal estudo pode contribuir para inovações na área, orientando futuras pesquisas e promovendo o desenvolvimento de materiais mais eficientes e sustentáveis para a construção civil.

4. METODOLOGIA

Uma revisão sistemática de literatura (RSL) é um tipo de estudo de pesquisa que busca identificar, avaliar e sintetizar todas as evidências relevantes disponíveis sobre uma questão

de pesquisa claramente definida, utilizando métodos explícitos e sistemáticos. Este tipo de revisão é caracterizado por sua abordagem rigorosa e estruturada, que inclui a definição de critérios de inclusão e exclusão, a realização de uma busca exaustiva em múltiplas fontes de dados, a avaliação crítica da qualidade dos estudos incluídos, e a síntese dos dados encontrados.

Em uma ótica inicial, para a realização da revisão sistemática foi utilizado o protocolo prisma, que traz um roteiro e orientações para a sua execução. Desta forma os principais pontos a serem seguidos pelo protocolo está representado na Tabela 1.

Tabela 1 - Protocolo prisma.

Pontos principais
Para garantir que uma revisão sistemática agregue valor aos usuários, os autores devem preparar
A declaração PRISMA 2020 fornece orientações para relato atualizadas para revisões sistemáticas, que refletem os avanços nos métodos para identificar, selecionar, avaliar e sintetizar estudos.
A declaração PRISMA 2020 consiste em uma lista de checagem de 27 itens, uma lista de checagem expandida que detalha as recomendações de relato para cada item, a lista de checagem PRISMA 2020 para resumos e fluxogramas revisados para novas revisões e para atualização de revisões.
Prevedemos que a declaração PRISMA 2020 beneficiará autores, editores e revisores pares de revisões sistemáticas e diferentes usuários de revisões, incluindo desenvolvedores de diretrizes, formuladores de políticas, profissionais da saúde, pacientes e outras partes interessadas.

Fonte: Revista SUS (Prisma 2020)

Desse modo, segue-se a revisão por cada uma dessas etapas buscando atingir as exigências do protocolo. Na Tabela 1, destaca-se o *check list* que deve ser cumprido juntamente ao planejamento, assim para a fase metodológica da pesquisa faz-se necessário concluir os seguintes itens.

A partir das orientações da prima, o planejamento e os passos para a execução e desenvolvimento da RSL (Revisão sistemática de literatura) podem ser vistos na Figura 1.



Figura 1 - Planejamento RSL

Fonte: Autor (2025).

Assim a revisão é dividida em três etapas principais, sendo elas:

- Planejamento;
- Execução;
- Extração.

4.1 Planejamento

4.1.1 Necessidade de Uma RSL e Escolha do Tema

A necessidade de uma revisão sobre o tema é justificada pela sua importância crucial na determinação das propriedades mecânicas, durabilidade e desempenho geral deste material amplamente utilizado na construção civil. O microconcreto, incluindo a distribuição e tamanho dos poros, a hidratação do cimento e a interface pasta- agregado, afeta diretamente características como resistência à compressão, tração e flexão. Entender e controlar esses aspectos permite a otimização das misturas de concreto, resultando em materiais mais resistentes e duráveis, que atendem melhor às demandas de diversas aplicações na engenharia civil.

Além disso, a pesquisa sobre o microconcreto contribui para a inovação na criação de novos materiais, como microconcretos autoadensáveis e de alta resistência, bem como na incorporação de aditivos e materiais reciclados. Estes avanços não só melhoram a performance e sustentabilidade do material, mas também oferecem soluções práticas para problemas comuns como fissuração e deterioração precoce. Com o apoio de técnicas modernas de caracterização, como microscopia eletrônica de varredura (SEM) e difração de

raios-X (XRD), é possível obter uma compreensão detalhada e precisa do microconcreto, facilitando o desenvolvimento de concretos mais eficientes e duráveis.

4.1.2 Definição de bases de dados

Para a definição das bases de dados, foi realizado a princípio pesquisas para definir quais artigos seriam encontrados em cada base de dado. Assim foram utilizados os seguintes critérios:

- Multidisciplinares:

Bases de dados com diversas áreas de estudo.

- Múltiplas:

Base de dado que uni várias bases de dados.

- Específicas:

Bases de dados com áreas específicas.

Nesse contexto, foram apresentadas as bases de dados selecionadas e suas justificativas:

- Scopus:

Base de dado multidisciplinar e múltipla, assim abrange diversas áreas e várias bases de dados. Além disso uma base muito renomada internacionalmente, trazendo uma quantidade significativa dos artigos.

- Web of Science:

Base de dado multidisciplinar e múltipla, assim abrange diversas áreas e várias bases de dados, porém menos trazendo menos artigos.

- Science Direct:

Base de dado multidisciplinar e múltipla, assim abrange diversas áreas e várias bases de dados, sendo uma boa fonte para artigos relacionados ao concreto.

- Compendex - Engineering Village:

Base de dado específica, trazendo artigos específicos da área da engenharia e artigos apenas publicados nela própria, assim tendo uma boa relação de artigos da área.

4.1.3 Definição de *Strings* de busca

Para a definição das *strings* de busca, foi realizado vários testes nas bases de dados selecionadas para analisar-se qual seria a melhor. A Tabela 2 apresenta o resultado desses testes.

Tabela 2 - Teste das *strings*.

TESTE NAS STRINGS SEM NENHUM FILTRO
--

SCOPUS				
microconcrete micro-concrete micro concrete	OR OR	microstructure AND concrete	microstructure AND microconcrete	microconcrete AND expanded clay
1516		114.226	169	6
WEB OF SCIENCE				
microconcrete micro-concrete micro concrete	OR OR	microstructure AND concrete	microstructure AND microconcrete	microconcrete AND expanded clay
186		17.896	6	0
SCIENCE DIRECT				
microconcrete micro-concrete micro concrete	OR OR	microstructure AND concrete	microstructure AND microconcrete	microconcrete AND expanded clay
650		48.842	51	11
Compendex (Engineering Village - Elsevier)				
microconcrete micro-concrete micro concrete	OR OR	microstructure AND concrete	microstructure AND microconcrete	microconcrete AND expanded clay
324		13.601	9	1
TOTAL				
microconcrete micro-concrete micro concrete	OR OR	microstructure AND concrete	microstructure AND microconcrete	microconcrete AND expanded clay
2676		194565	235	18

Fonte: Autor (2025).

A partir dos testes foi analisada cada uma delas separadamente para encontrar o melhor conjunto de *strings* para a pesquisa. Desse modo, “microconcrete AND expanded clay” e “microstructure AND microconcrete” foram encontrados uma quantidade baixa de artigos, delimitando a pesquisa de forma a excluir alguns artigos que tem potencial a serem analisados. Já “microstructure AND concrete” e “concrete AND expanded clay” foram *strings* mais abrangentes que trouxeram uma grande quantidade de artigos, porém grande parte deles fugindo do objetivo da revisão. Ao final, foi escolhido a *string*: “microconcrete OR micro-concrete OR micro concrete”, para a realização da revisão pois abrange uma quantidade significativa de artigos e traz os principais artigos que realmente importam para o tema em questão.

4.2 Execução

4.2.1 Busca e seleção de artigos

A revisão sistemática foi conduzida utilizando o *software* "Start", desenvolvido pela Universidade Federal de São Carlos. Este *software* representa uma ferramenta dedicada à assistência e automação no processo de revisões sistemáticas. Através do "Start", é viável categorizar os artigos analisados, aceitá-los ou rejeitá-los, estabelecer critérios de qualidade, selecionar bases de pesquisa, e desempenhar outras funções relevantes para o processo de revisão. Além disso foi aplicado um filtro de 10 anos nas próprias bases de dados antes de importar os artigos encontrados para o "Start".

A pesquisa foi realizada em novembro de 2023, tendo sua última atualização em maio de 2024. Assim foi utilizado as *strings* citadas nas respectivas bases de dados e a quantidade de artigos encontrados pode ser observado na tabela 3 abaixo.

Tabela 3 - Resultados de busca.

QUANTIDADE DE ARTIGOS SELECIONADOS ATRAVES DA <i>STRING</i> DE BUSCA ESCOLHIDA (NOS ULTIMOS 10 ANOS)			
<i>"MICRO-CONCRETE" OR "MICROCONCRETE" OR "MICRO CONCRETE"</i>			
<i>SCOPUS</i>	<i>WEB OF SCIENCE</i>	<i>iDIRECT</i>	<i>ENGGENIRING VILLAGE</i>
1065	74	55	107
TOTAL		1301	

Fonte: Autor (2025).

Pelo resultado obtido, é possível observar que a scopus foi a base de dados onde teve o maior número de artigos encontrados.

4.2.2 Critérios de inclusão e exclusão e qualidade dos artigos

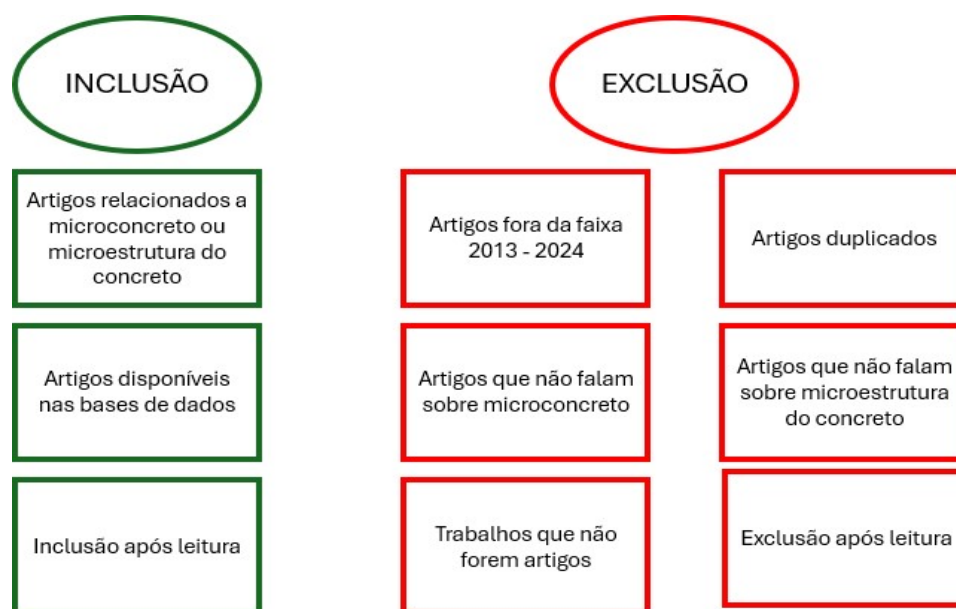
Posteriormente, foram estabelecidos itens predefinidos com ajuda do software, que classifica os artigos previamente através de um protocolo onde são caracterizados os seguintes itens:

- Objetivos;
- Principais questionamentos;
- Palavras-chave e sinônimos;

- Definição de principais critérios de escolha;
- Linguagens admissíveis;
- Fontes de métodos de pesquisa;
- Base de dados;
- Tipo de estudo;
- Qualidade do artigo.

Além disso, definiram-se os critérios de inclusão e exclusão, levando em consideração os objetivos específicos da pesquisa, conforme a Figura 02.

Figura 2 - Critérios de Inclusão e Exclusão.



Fonte: Autor (2025).

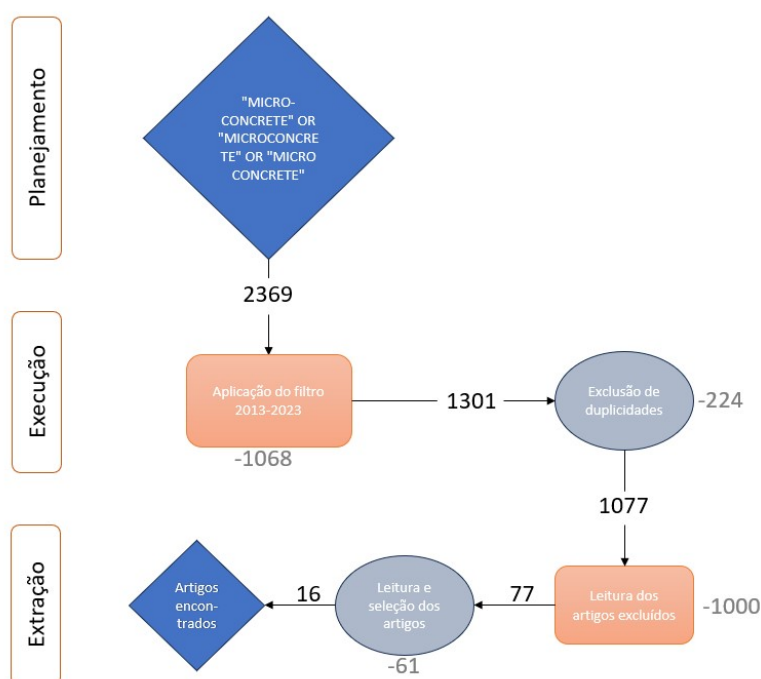
Nesse contexto, destaca-se a definição dos principais critérios de escolha onde definiu-se que seria selecionado qualquer artigo que contivesse o estudo do microconcreto, porém, estando relacionado ao material ou elementos estruturais. Outro viés, foi a qualidade do artigo que foi definida através de um *score* que é dado com base nas palavras-chaves e critérios de busca. Assim, foi realizada a inclusão e exclusão de artigos com base no score e na leitura dos títulos e resumos de cada artigo.

Todos os critérios de seleção, avaliação de qualidade e métodos de análise foram cuidadosamente definidos após uma revisão aprofundada das ferramentas disponíveis e sua compatibilidade com a temática. Este processo assegurou que os procedimentos adotados

fossem os mais adequados para abordar as especificidades do estudo sobre o microconcreto, garantindo rigor metodológico e resultados confiáveis.

Dessa forma, foram encontrados 1301 artigos no total, após lançá-los no *software* retirou-se 226 duplicados, assim restando um total de artigos 1077 para a próxima etapa da RSL. A partir disso foi feita a exclusão pelo “*score*” dado pelo *Start*, fazendo uma pré exclusão dos artigos de classificação menor que 5 e lendo os títulos e palavras chaves de todos os artigos para trazer uma precisão maior à pesquisa. Desta forma, restaram 71 artigos e nesse grupo analisaram-se novamente os títulos e palavras chaves, além dos resumos de cada artigo, para fazer a última filtragem da revisão. Com isso, nesta última fase foi utilizado um critério onde foi selecionado os artigos cujos resultados se alinharam mais com os objetivos da pesquisa. Por fim, encontraram-se um total de 15 artigos para realizar a revisão. A Figura 3 representa o fluxograma de artigos encontrados.

Figura 3 - Fluxograma de execução da RLS.



Fonte: Autor (2025).

4.3 Extração

Uma vez selecionados os estudos, a próxima etapa foi a extração de dados e a avaliação da qualidade metodológica de cada artigo. Dados relevantes, como características dos participantes, intervenções, comparações e desfechos, foram extraídos utilizando

formulários padronizados para garantir consistência. Simultaneamente, a qualidade dos estudos foi avaliada utilizando ferramentas específicas, como a ferramenta Cochrane de risco de viés para ensaios clínicos randomizados ou a escala de Newcastle- Ottawa para estudos observacionais. Esta avaliação crítica foi essencial para identificar potenciais fontes de viés e variabilidade nos estudos, proporcionando uma base sólida para a síntese dos resultados.

A síntese dos dados pode ser conduzida de forma qualitativa ou quantitativa. Na abordagem qualitativa, os resultados dos estudos são descritos e comparados de maneira narrativa, destacando semelhanças e diferenças, bem como identificando padrões emergentes. Quando a meta-análise é viável, os resultados quantitativos dos estudos incluídos são combinados estatisticamente para produzir estimativas mais precisas dos efeitos das intervenções ou associações investigadas. Este processo inclui a avaliação da heterogeneidade entre os estudos, que pode influenciar a interpretação dos resultados agregados.

Finalmente, a transparência e a reprodutibilidade são garantidas através de uma documentação detalhada de todos os passos do processo de revisão, conforme recomendado pelo PRISMA. O uso de um diagrama de fluxograma PRISMA para ilustrar o processo de seleção dos estudos, desde a identificação até a inclusão final, é uma prática padrão que facilita a compreensão e a avaliação crítica do estudo. Este método estruturado assegura que a revisão sistemática seja conduzida de maneira rigorosa, produzindo evidências robustas e confiáveis que podem impactar futuras pesquisas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da estruturação e síntese dos dados obtidos nas fases da revisão sistemática, foi fundamental realizar análises e ponderações. Assim, uma nova sistematização com os artigos aprovados foi realizada com foco em coletar dados adicionais sobre artigos. Desta forma, para uma melhor exposição dos artigos e dados aprovados, a Tabela 4 apresenta um número de referência para cada trabalho aceito. Este número está indicado na tabela e nas referências e pode ser consultado para identificar de qual trabalho se trata.

Tabela 4 - Artigos encontrados com RSL.

01	<i>Structural Behavior of Recycled Aggregate Concrete Beam-Column Connection in Presence of Micro Concrete at Joint Region.</i>
02	<i>Seismic Risk Assessment and Rehabilitation Method of Existing RCC Structures Using Micro Concrete.</i>
03	<i>Effect of high temperature and accelerated aging in high density micro-concrete</i>
04	<i>Effect of high dosage lignosulphonate and naphthalene sulphonate based plasticizer usage on micro concrete Properties.</i>

05	<i>Mechanical recycling of GFRP waste as short-fiber reinforcements in microconcrete.</i>
06	<i>Microconcrete with partial replacement of Portland cement by fly ash and hydrated lime addition.</i>
07	<i>Self-compacting micro concrete in structural strengthening: application as a bridge.</i>
08	<i>Effect of glass sand used as aggregate on micro-concrete Properties.</i>
09	<i>Study on relative shrinkage of cement-based micro-concrete for durable concrete repair.</i>
10	<i>Production and evaluation of microconcretes with iron ore tailings to produce construction components.</i>
11	<i>Microconcrete of high performance: properties and behavior under combined compression and torsion.</i>
12	<i>Functional micro-concrete 3D hybrid structures fabricated by two-photon polymerization.</i>
13	<i>Shear strengthening of RC Beam using Ferro-cement & Micro-concrete.</i>
14	<i>Durability to Chemical Attack by Acids of Epoxy Microconcretes by Comparison to Cementitious Ones.</i>
15	<i>Effectiveness of various methods of jacketing for RC beams.</i>

Fonte: Autor (2025).

5.1 Artigos aprovados e suas contribuições

A partir dessas considerações, a distribuição dos artigos coletados nas bases de dados foi disposta de acordo com o Gráfico 01. Este gráfico ilustra de maneira clara e objetiva a categorização dos artigos selecionados conforme os critérios previamente estabelecidos. Observa-se que a maior concentração de artigos se encontra na base “scopus”, representando 82% do total, o que reflete um alto número de artigos nessa base dos dados.

A análise dos dados gráficos revela tendências importantes. Primeiramente, observa-se que a base “Engineering Village”, embora menos representada, ainda demonstra uma relevância significativa, com 8% dos artigos coletados. Esse fato sugere que, apesar de receber menos atenção, essa área possui uma contribuição notável para o corpo geral de conhecimento abordado na pesquisa, com artigos mais específicos do tema em questão.

Além disso, a dispersão dos artigos entre as diversas categorias evidencia a abrangência e a diversidade dos temas tratados. Cada base de dados foi rigorosamente avaliada com critérios metodológicos estabelecidos na metodologia, garantindo assim a qualidade e a pertinência dos artigos selecionados para esta revisão.

Desta maneira as duas bases de dados restantes, serviram para complementar a pesquisa de forma que abrangesse uma área de pesquisa maior.

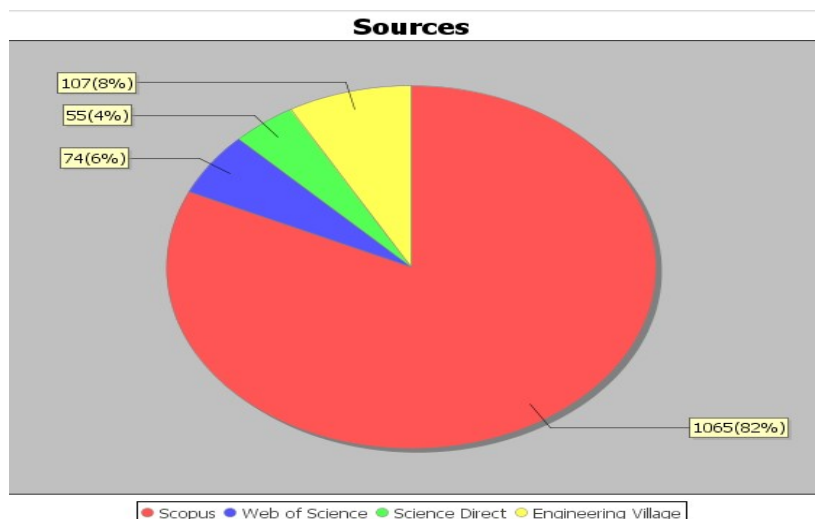


Figura 4 - Distribuição de artigos encontrados nas bases de dados.

Fonte: Autor (2025).

Após a finalização da seleção, a distribuição de artigos por bases de dados ficou da seguinte forma, conforme Tabela 5:

Tabela 5 - Quantidade de artigos aprovados nas bases de dados.

<i>Scopus</i>	<i>Web of science</i>	<i>Science Direct</i>	<i>Engineering Vilage</i>
8	3	3	1

Fonte: Autor (2025).

A análise final da pesquisa revelou também uma distribuição significativa da quantidade de artigos por país, conforme na Tabela 6. Desta forma, apresenta-se uma visão detalhada da contribuição de cada país para o corpo de conhecimento examinado, destacando tanto a diversidade geográfica quanto a concentração de produção científica em determinadas regiões. Observa-se que o Brasil é o terceiro colocado com 14% dos artigos, empatado com Espanha.

Tabela 6 - Percentual de artigos aprovados por nacionalidade.

Pais de origem	Quantidade	%
China	2	13
Índia	4	27
Turquia	2	13
Espanha	3	20
França	1	7
Brasil	3	20

Fonte: Autor (2025).

5.2 Características dos artigos aprovados

Após uma análise criteriosa dos 15 artigos aprovados na Revisão Sistemática da Literatura (RSL) sobre microconcreto, verificou-se que esses estudos compartilharam várias características comuns e relevantes, destacando-se pela pertinência e pela profundidade das investigações realizadas.

Primeiramente, todos os artigos abordaram de maneira abrangente as propriedades mecânicas do microconcreto. Eles incluíram detalhamentos sobre a composição dos materiais, os métodos de preparação e as técnicas de ensaio empregadas para avaliar a resistência, durabilidade, ductilidade e comportamento sob diferentes condições de carga. Essa uniformidade na abordagem permitiu uma comparação consistente entre os diferentes estudos, facilitando a identificação de tendências e padrões nos resultados obtidos.

Outro ponto comum entre os artigos foi a aplicação de métodos experimentais rigorosos e bem documentados. Cada estudo seguiu protocolos de ensaio padronizados, o que garante a reprodutibilidade dos resultados e a confiabilidade das conclusões apresentadas. Os autores forneceram descrições detalhadas dos equipamentos utilizados, das condições de teste e das metodologias de análise, assegurando a transparência e a precisão das pesquisas.

Os artigos também se destacaram pela apresentação clara e detalhada dos resultados. Gráficos, tabelas e figuras foram amplamente utilizados para ilustrar os dados experimentais, facilitando a interpretação e a comparação dos achados. Além disso, muitos estudos complementaram os resultados experimentais com análises teóricas ou modelos numéricos, enriquecendo a compreensão dos comportamentos observados.

A diversidade geográfica dos artigos aprovados foi outro aspecto relevante. Os estudos foram conduzidos por pesquisadores de diferentes partes do mundo, refletindo uma ampla gama de condições ambientais e contextos de aplicação do microconcreto. Essa variedade contribui para uma visão global das potencialidades e limitações do material, permitindo a extrapolação dos resultados para diferentes cenários e necessidades.

Por fim, todos os artigos discutiram as implicações práticas dos resultados obtidos, propondo recomendações para a aplicação do microconcreto em projetos reais de engenharia. Eles abordaram tanto as vantagens quanto as limitações do material, oferecendo uma visão equilibrada e informada que pode guiar futuras pesquisas e desenvolvimentos tecnológicos.

Em resumo, os 15 artigos aprovados na RSL sobre microconcreto apresentaram características que garantem a sua relevância e contribuição significativa para o avanço do conhecimento na área. Assim, para uma análise mais detalhada de cada artigo, foi realizada uma comparação dos resultados obtidos, organizados em tópicos específicos, sendo eles:

- Microconcreto em reforço estrutural;
- Microconcreto em ligações e desempenho sísmico;
- Propriedades físicas e mecânicas do microconcreto;
- Aspectos de sustentabilidade.

5.3 Microconcreto em reforço estrutural

Para uma análise detalhada e comparativa dos resultados obtidos nos estudos sobre microconcreto, quatro artigos foram selecionados e revisados sobre microconcreto em reforço estrutural. Esses forneceram uma visão abrangente sobre as propriedades mecânicas, métodos de preparação e aplicações do microconcreto, destacando tanto as similaridades quanto as diferenças em suas abordagens e conclusões.

A primeira análise, feita a respeito do uso de microconcreto autoadensável como ponte de aderência entre concreto velho e novo para melhorias estruturais, segundo Machado *et al.* (2023). O artigo mostrou que a adição de *filler* de granito melhorou a ligação entre os concretos, aumentando a resistência ao cisalhamento em cerca de 30%. As propriedades autoadensáveis foram satisfatórias, indicando potencial para reforços estruturais.

Outro trabalho, que analisou os métodos de *jacketting*, dos autores Raval *et al.* (2013), abordou três métodos, sendo eles:

- CFRP: Alta resistência à tração e leveza, aumentando a capacidade de carga e ductilidade das vigas;
- Jaquetas de Aço: Elevada resistência e rigidez, excelente desempenho em cargas cíclicas, mas com instalação complexa e aumento de peso;
- SCC: Facilidade de aplicação e boa aderência, mas suscetível à fissuração e retração.

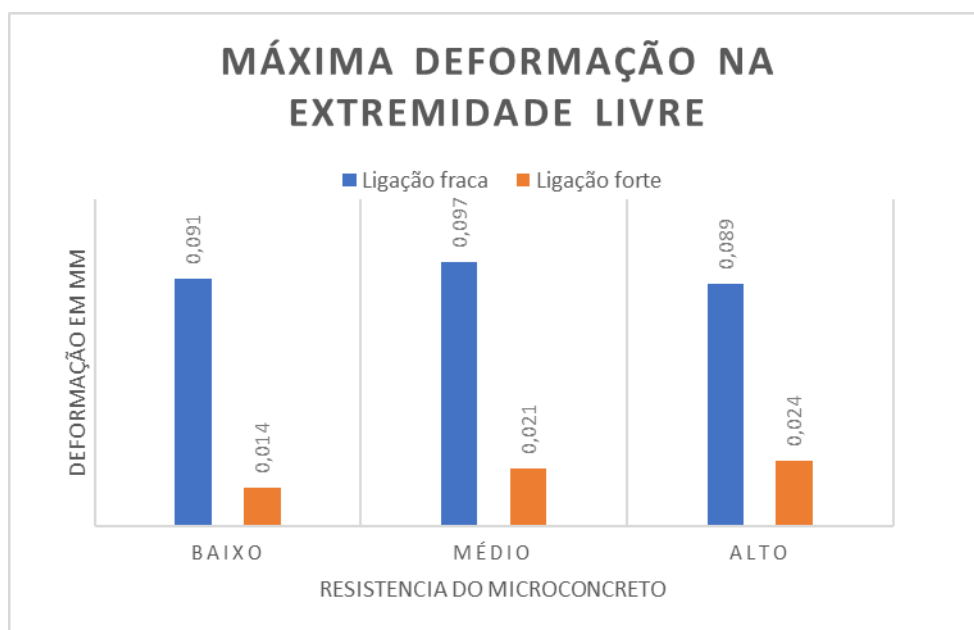
Assim, cada método teve vantagens específicas, com o CFRP destacando-se pela sua eficácia em aumentar a capacidade de carga e ductilidade, enquanto o SCC foi prático e

eficiente em aplicações em estruturas complexas. As jaquetas de aço, embora eficazes, foram menos preferidas devido ao aumento de peso e complexidade de instalação.

Por outro lado, o estudo conduzido por Nayak *et al.* (2022) analisa-se a retração do microconcreto à base de cimento em reparos duráveis de concreto, utilizando um procedimento modificado do teste ASTM C157. Foram testadas várias formulações de microconcreto sob diferentes temperaturas de secagem, revelando que a retração livre variava significativamente com a temperatura, sendo menor em condições de baixa umidade.

Desta forma, conforme a Figura 5, a análise de elementos finitos mostrou que formulações com menor retração reduziram a ocorrência de fissuras na interface entre o microconcreto e o concreto existente. Assim, microscopicamente, conforme o gráfico de deformação, observou-se que formulações com menor retração apresentaram melhor compatibilidade e desempenho em termos de resistência e durabilidade dos reparos.

Figura 5 - Saída de elementos finitos devido à contração diferencial



Fonte: NAYAK, Dipti Ranjan; PATTNAIK, Rashmi R.; PANDA, Bikash Chandra (2022).

Em comparação, os artigos demonstram a importância de selecionar o método de reforço adequado conforme as necessidades específicas do projeto. O microconcreto autoadensável destacou-se pela facilidade de aplicação e melhoria significativa na resistência ao cisalhamento. Em contrapartida, o estudo sobre métodos de *jacketting* ofereceu uma visão abrangente das vantagens e desvantagens de várias técnicas, com destaque para a alta eficácia do CFRP e a praticidade do SCC. O trabalho de Nayak *et al.* complementou esses achados ao abordar a importância de minimizar a retração para aumentar a durabilidade dos reparos, enfatizando a necessidade de uma abordagem holística na aplicação do microconcreto para reparos e reforços estruturais.

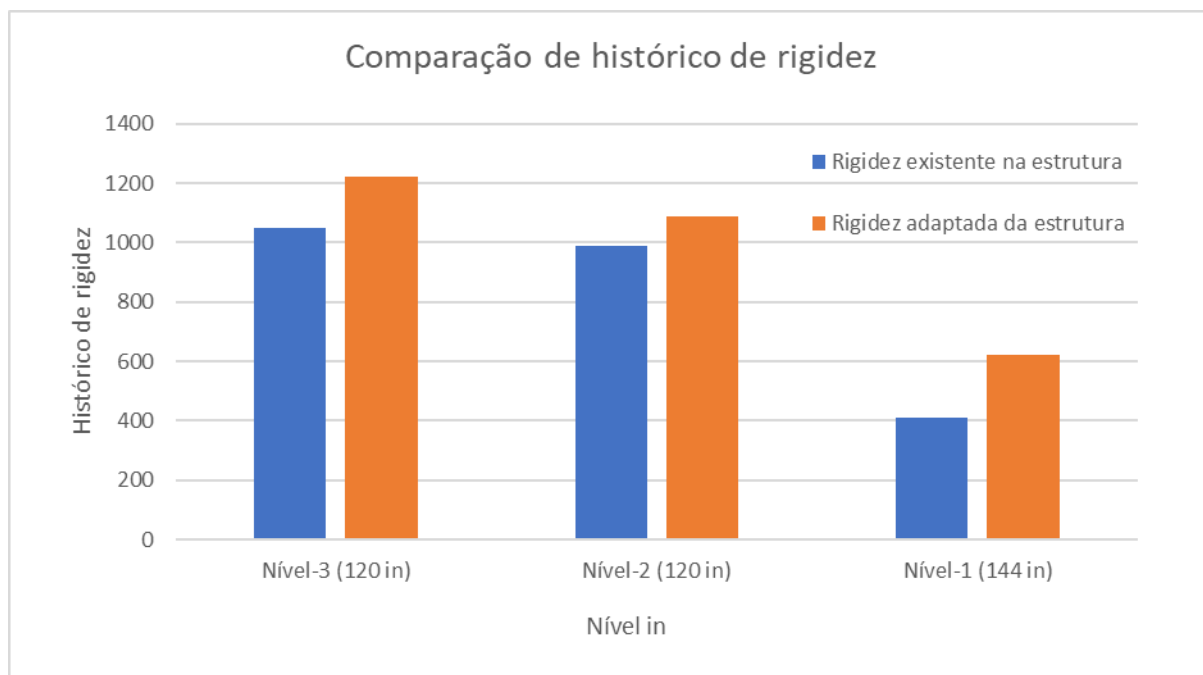
5.4 Microconcreto em ligações e desempenho sísmico

Para uma análise direta e comparativa dos resultados obtidos nos estudos sobre este item, foram revisados artigos selecionados que investigam diferentes aspectos e aplicações do material.

No artigo Yin *et al.* (2023) a reabilitação de um edifício de concreto armado de três andares, que originalmente carecia de estribos e reforços longitudinais, foi realizada utilizando-se o microconcreto e revestimento de colunas de concreto. A análise inicial e a comparação entre o modelo original e o reabilitado focaram na adequação dos membros estruturais.

A análise revelou que a utilização de microconcreto e o revestimento das colunas proporcionaram um reforço significativo. A avaliação das derivações de andares e deslocamentos mostrou que, enquanto os deslocamentos iniciais estavam fora dos limites aceitáveis, após a reabilitação, todos os deslocamentos dos andares estavam dentro da faixa permitida. A análise de histórico de tempo e a avaliação da rigidez confirmaram que a estrutura reabilitada era mais rígida e segura contra cargas sísmicas em comparação com a estrutura original, conforme Figura 6. Além disso, a adequação de vigas, lajes e colunas para cargas laterais, cargas estáticas e dinâmicas foi revisada, resultando na conclusão de que, apesar de algumas colunas estarem sobrecarregadas e perigosas anteriormente, a estrutura atual atendeu aos requisitos do código chinês GB50011-2010, garantindo a segurança estrutural. A reabilitação resultou em uma estrutura mais robusta e resistente a cargas sísmicas, demonstrando a eficácia dos métodos aplicados.

Figura 6 - Comparação da rigidez do piso entre estruturas existentes e reformadas



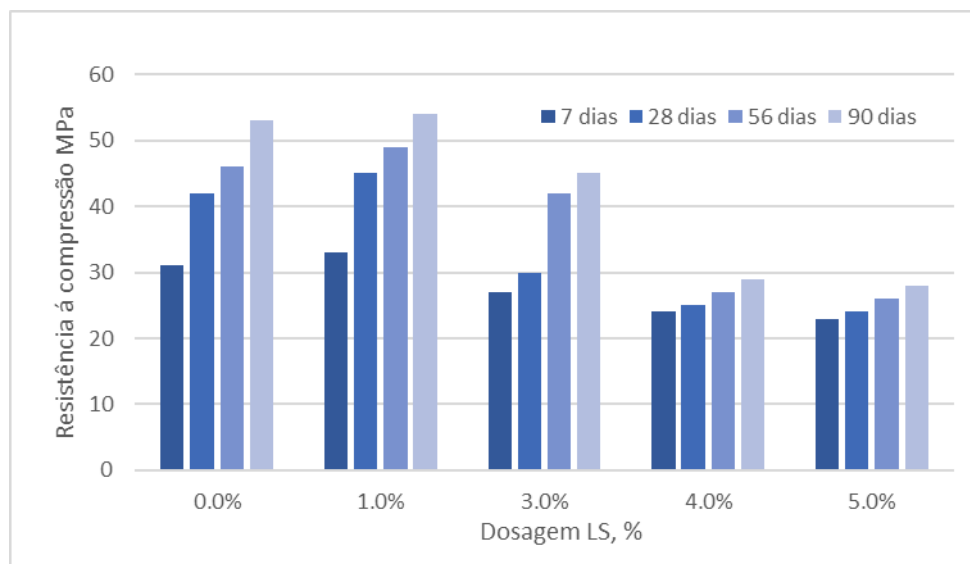
Fonte: YIN, Jijing (2023)

5.5 Propriedades físicas e mecânicas do microconcreto

Para comparar diretamente os resultados dos artigos mencionados sobre as propriedades físicas e mecânicas do microconcreto, serão analisados alguns pontos chave de cada estudo e suas respectivas contribuições.

O estudo de Topçu *et al.* (2016) sobre o uso de plastificantes à base de lignossulfonato (LS) e sulfonato de naftaleno (NS) em alta dosagem no microconcreto revelou melhorias significativas nas propriedades do material. Ambos os aditivos aumentaram a trabalhabilidade e a resistência à compressão do concreto representado na Figura 7, com o NS demonstrando um impacto mais pronunciado em ambas as áreas.

Figura 7 - Variação da resistência à compressão das argamassas da série LS em função da dosagem do aditivo ($a/c = 0,5$).



Fonte: TOPÇU, İ, B; ATESIN (2016)

Análises microestruturais indicaram que o NS resultou em uma microestrutura mais densa e homogênea, contribuindo para um material com melhores propriedades mecânicas e maior durabilidade.

Segundo Bessa *et al.* (2023), explorou a substituição de agregados miúdos por rejeito de minério de ferro (RMF) em microconcretos. Os resultados mostraram que a incorporação de 100% de RMF não comprometeu a resistência à compressão dos microconcretos aos 28 dias, como representado na Tabela 7. Contudo, houve um aumento no índice de vazios e na absorção de água, embora a massa específica tenha sido maior no concreto com RMF, sugerindo uma matriz mais densa e porosa.

Tabela 7 - Resistência a compressão dos microconcretos.

Idade	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)				
	TRO	TR.25	TR.50	TR.75	TR.100
7 dias	22,04	22,91	21,81	23,26	21,23
Desvio padrão	0,65	0,85	0,75	0,47	0,47

cv (%)	2,96	3,70	3,43	2,00	2,22
28 dias	32,32	31,58	29,08	30,30	30,36
Desvio padrão	1,89	1,77	1,72	1,93	1,32
cv (%)	5.83	5,6	5,92	6,38	4.36

Fonte: BESSA, Sofia Araújo Lima (2023).

Com isso, a análise de carbonatação acelerada indicou valores mais elevados para o microconcreto com RMF, enquanto a carbonatação natural não mostrou diferenças significativas. Em termos de durabilidade, o microconcreto com RMF apresentou menor perda de massa em testes de resistência ao ataque ácido, atribuída à matriz mais densa. Esses resultados sugerem que o uso de RMF como agregado miúdo é viável, oferecendo durabilidade semelhante aos concretos convencionais, mesmo quando expostos ao intemperismo sem revestimento.

Outrossim, de acordo com Silva *et al.* (2018), investigou o desempenho de microconcreto de alto desempenho (MADP) em comparação com concreto convencional, especialmente em pilares submetidos à flexão normal composta. O estudo avaliou propriedades no estado fresco, propriedades mecânicas e durabilidade. Os resultados mostraram que o MADP apresentou melhor desempenho, atribuído a uma zona de interface pasta-agregado mais eficaz, resultando em maior rigidez e resistência. Desta forma, os pilares de MADP romperam por esmagamento na face comprimida, enquanto os pilares de concreto convencional apresentaram ruptura por deslocamento do concreto em duas faces adjacentes. A análise comparativa usando o *software* Esbelt 2.1 confirmou que o MADP proporcionou maior rigidez e melhores propriedades mecânicas, apresentados na Tabela 8. Esses achados sugerem que o MADP é uma opção viável e vantajosa para elementos estruturais, especialmente em aplicações que exigem seções transversais delgadas e maior desempenho estrutural.

Tabela 8 - Propriedades mecânicas e de durabilidade dos concretos.

CONCRETO	FC (MPA)	ECS(GPA)	FrcD (MPA)	ABS (Y.)	Iv (%)
REF	52,7 (3,5)	32.1 (1,2)	4.73 (0,63)	5.97 (0,33)	12.67 (0,63)
MIC	56.4 (5,7)	34.8 (1,5)	5.81 (0,52)	5,61 (0,12)	11.76 (0,22)

Fonte: SILVA, Augusto Costa (2018)

O artigo de Li *et al.* (2017) explorou o uso da polimerização a dois fótons para criar estruturas híbridas de microconcreto com alta precisão. A pesquisa demonstrou que a combinação dessa técnica avançada com o microconcreto permite a fabricação de estruturas tridimensionais complexas com propriedades mecânicas e funcionais aprimoradas. Os

resultados mostraram que é possível obter detalhes finos e estruturas complexas, como suportes de carga e elementos estruturais integrados, com uma resolução muito superior à de métodos convencionais. Os testes realizados indicaram que as estruturas fabricadas apresentam uma combinação eficaz de resistência e funcionalidade, aproveitando as propriedades únicas do microconcreto e a precisão da polimerização a dois fótons. A pesquisa também destacou a versatilidade dessa abordagem para diversas aplicações em engenharia e arquitetura, sugerindo que essa tecnologia pode abrir novas possibilidades para a criação de componentes estruturais personalizados e altamente eficientes.

Ao comparar os artigos mencionados neste item, observam-se distintas abordagens e inovações em suas respectivas áreas de estudo. O artigo de Topçu *et al.* (2016) focou na aplicação de plastificantes, onde o sulfonato de naftaleno (NS) se destacou ao proporcionar uma microestrutura mais densa e homogênea, melhorando significativamente a trabalhabilidade e a resistência à compressão do microconcreto. Por outro lado, Bessa *et al.* (2023) investigou a substituição de agregados tradicionais por rejeito de minério de ferro (RMF), revelando que, apesar de um aumento na absorção de água e no índice de vazios, o RMF não comprometeu a resistência à compressão e proporcionou uma matriz mais densa com melhor desempenho em testes de resistência ao ataque ácido. Já o estudo de Silva *et al.* (2018) comparou o microconcreto de alto desempenho (MADP) com o concreto convencional, mostrando que o MADP ofereceu maior rigidez e resistência, especialmente em pilares submetidos a flexão normal composta, devido a uma interface pasta-agregado mais eficiente. Por último, Li *et al.* (2017) explorou a polimerização a dois fótons, permitindo a fabricação de estruturas tridimensionais complexas com alta precisão e propriedades mecânicas aprimoradas, destacando-se pela capacidade de criar componentes estruturais personalizados com detalhes finos e alta resolução. Cada estudo contribuiu de forma única para o avanço das aplicações e propriedades do microconcreto, evidenciando melhorias em trabalhabilidade, durabilidade, desempenho estrutural e precisão de fabricação.

5.6 Aspectos de sustentabilidade

Para realizar uma análise comparativa dos resultados obtidos nos artigos sobre sustentabilidade, foi essencial explorar detalhadamente vários aspectos fundamentais abordados em cada pesquisa.

O artigo de Marthong *et al.* (2017) apresentou uma análise detalhada do comportamento estrutural de conexões de vigas e colunas feitas com concreto reciclado,

quando reforçadas com microconcreto nas regiões das juntas. Os resultados mostram que a introdução de microconcreto nas regiões de junção proporcionou um aumento significativo na capacidade de carga e na rigidez das conexões. O estudo revelou que, enquanto o concreto reciclado por si só apresentava algumas limitações em termos de resistência e durabilidade, a aplicação de microconcreto nas juntas melhorou a distribuição das cargas e reduziu a ocorrência de fissuras, resultando em um comportamento estrutural mais robusto e confiável. Além disso, os testes indicaram que as conexões reforçadas com microconcreto exibiram uma performance superior sob condições severas de carga, mostrando uma redução nas deformações e uma melhoria na resistência à carga lateral. Os resultados confirmaram a eficácia do uso de microconcreto para fortalecer as regiões críticas de junção, oferecendo uma solução viável para melhorar a integridade estrutural e prolongar a vida útil de estruturas feitas com concreto reciclado.

Já o estudo realizado por Lorca *et al.* (2014), explorou os efeitos da substituição parcial do cimento Portland por cinzas volantes e a adição de cal hidratada na formulação de microconcreto. Os resultados mostraram que a substituição de até 30% do cimento Portland por cinzas volantes resultou em uma redução significativa no calor de hidratação e na coesão do concreto, além de melhorar a trabalhabilidade e a durabilidade do microconcreto. A adição de cal hidratada, por sua vez, contribuiu para melhora na reatividade das cinzas volantes e aumentou a coesão do material, o que se traduziu em uma resistência à compressão superior em comparação com as misturas que não incluíam cal. Outrossim, o estudo indicou que o microconcreto com essas substituições exibiu uma menor permeabilidade e melhor resistência a ciclos de umidade e secagem, demonstrando uma maior durabilidade em ambientes agressivos. Esses resultados confirmam que a utilização de cinzas volantes e cal hidratada não apenas promove uma alternativa mais sustentável e econômica ao cimento Portland, mas também melhora as propriedades estruturais e de desempenho do microconcreto. A pesquisa sugere que a combinação desses materiais pode ser uma solução eficaz para a produção de microconcreto com características aprimoradas e menor impacto ambiental.

Por fim, o trabalho conduzido por Etli. (2023), examinou como a substituição do agregado convencional por areia de vidro pode influenciar as propriedades do microconcreto. Os resultados mostraram que a incorporação de areia de vidro como agregado pode melhorar a resistência à compressão do microconcreto, com aumentos significativos observados em comparação com misturas que utilizam agregados tradicionais. Esse ganho de resistência é atribuído à alta densidade e resistência intrínseca do vidro, que contribui para uma estrutura

mais sólida e compacta do microconcreto. Desta maneira, a pesquisa indicou que a utilização de areia de vidro também teve um impacto positivo na durabilidade do microconcreto, reduzindo a permeabilidade e aumentando a resistência a ciclos de umidade e secagem. No entanto, a trabalhabilidade do microconcreto foi levemente afetada, com uma menor facilidade de aplicação em comparação com misturas que utilizam agregados convencionais. Apesar disso, o estudo concluiu que a areia de vidro representa uma alternativa sustentável e eficaz, promovendo a reciclagem de resíduos de vidro e melhorando o desempenho estrutural do microconcreto.

Comparando os três estudos, fica evidente que cada abordagem oferece benefícios distintos: Marthong *et al.* (2017). melhoram a integridade estrutural de concreto reciclado, Lorca *et al.* (2014), promovem a sustentabilidade ao reduzir o uso de cimento Portland, e Etli. (2023) mostram como resíduos de vidro podem ser reciclados para melhorar as propriedades do microconcreto. Juntas, essas pesquisas oferecem soluções inovadoras e sustentáveis para otimizar o desempenho e a durabilidade do microconcreto.

6. CONCLUSÕES

Com base nos artigos analisados, percebe-se que o estudo do microconcreto é amplo e realizado globalmente. Diante da diversidade de pesquisas publicadas, uma revisão sistemática é essencial para selecionar os trabalhos mais relevantes, que apresentam resultados significativos e contribuem para o avanço do tema.

A revisão sistemática da literatura (RSL) sobre microconcreto revelou diversos achados importantes que destacam o potencial do material para melhorar as propriedades mecânicas e físicas das estruturas. Neste artigo, que analisou 15 artigos resultantes de uma seleção inicial de 2369. A análise destes artigos permitiu identificar e preencher as lacunas que podem orientar futuros estudos envolvendo o uso deste material.

A partir da leitura de análise dados obtidos microconcreto demonstrou ser uma solução eficaz para reforço estrutural, melhorando a aderência, resistência e durabilidade de reparos. Estudos destacaram a importância da formulação adequada para minimizar retração e fissuras, além das vantagens de diferentes métodos, como o CFRP para resistência e ductilidade e o SCC para aplicações práticas. Seu uso deve considerar as necessidades específicas de cada projeto para um desempenho otimizado.

Outrossim, estudos analisados demonstraram a eficácia do microconcreto na reabilitação estrutural, melhorando a resistência, rigidez e segurança das edificações. A

aplicação do material reduziu deslocamentos, reforçou elementos estruturais e garantiu conformidade com normas técnicas, tornando as estruturas mais seguras e resistentes a cargas sísmicas.

Além disso, os estudos revisados demonstraram a versatilidade do microconcreto e suas diversas aplicações na engenharia. A incorporação de plastificantes, a substituição de agregados tradicionais por rejeitos, o desenvolvimento de microconcreto de alto desempenho e a utilização de técnicas avançadas de fabricação evidenciaram melhorias em resistência, durabilidade e precisão estrutural. Cada abordagem apresentou contribuições relevantes, reforçando o potencial do microconcreto como solução eficiente para reforço estrutural, otimização de materiais e inovação na construção civil.

Mediante ao que foi exposto, nota-se as seguintes lacunas que podem ser exploradas em trabalhos futuros:

- Investigar diferentes proporções de componentes e aditivos para minimizar retração e fissuras, visando maior durabilidade e resistência.
- Explorar o impacto da granulometria dos agregados na trabalhabilidade e resistência do microconcreto.
- Estudos sobre a aderência entre microconcreto e sistemas de reforço com fibras de carbono (CFRP) e fibras metálicas.
- Avaliação da substituição de agregados convencionais por resíduos industriais e sua influência nas propriedades mecânicas do microconcreto.

Por fim, faz-se notável que o microconcreto pode melhorar a sustentabilidade na construção civil. O uso em conexões de concreto reciclado fortalece a estrutura, enquanto a substituição do cimento por cinzas volantes reduz o impacto ambiental sem afetar a durabilidade. Além disso, o uso de areia de vidro como agregado recicla resíduos e melhora as propriedades do material. Essas soluções tornam o microconcreto mais eficiente e sustentável.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BESSA, Sofia Araújo Lima *et al.* Production and evaluation of microconcretes with iron ore tailings to produce construction components. Revista Matéria, Vol 22, Num 22, December 2023. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620220002.1375>.

ELHEM, Ghorbel; MURHAF, Haidar. Durability to Chemical Attack by Acids of Epoxy Microconcretes by Comparison to Cementitious Ones. Hindawi Limited, (2016) Advances in Civil Engineering, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/4728372>.

ETLI, ETILI S. Effect of glass sand used as aggregate on micro-concrete Properties. GRAĐEVINAR, 75 (2023) 1, pp. 39-51. <https://doi.org/10.14256/JCE.3538.2022>.

GARCIA, David; VEGAS, Iñigo J; CACHO, Iñigo. Mechanical recycling of GFRP waste as short-fiber reinforcements in microconcrete. Construction and Building Materials, Volume 64, 2014, P 293-300. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.068>.

KELM, S.; SCHAUER, R.; Sialic acids in molecular and cellular interactions. Int Rev Cytol.;v. 175 p.137-240. 1997;

LI, Yang *et al.* Functional micro-concrete 3D hybrid structures fabricated by two-photon polymerization. Opto-Electronic Engineering, 2017, 44(4): 393-399. 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.04.002.

LORCA, Pedro *et al.* Microconcrete with partial replacement of Portland cement by fly ash and hydrated lime addition. Microconcrete with partial replacement of Portland cement by fly ash and hydrated lime addition. Materials & Design, Volume 64, 2014, P 535-541. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.08.022>.

MACHADO, Michelle; BACARJI, Edgar; CARASEK, Helena. Self-compacting micro concrete in structural strengthening: application as a bond bridge. Revista Matéria, Vol 22, Num 22, Abril 2023. <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2023-0007>.

MARTHONG, Comingstarful *et al.* Structural Behavior of Recycled Aggregate Concrete Beam-Column Connection in Presence of Micro Concrete at Joint Region. Structures, Volume 11, 2017, Pages 243-251. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2017.07.001>.

NAYAK, Dipti Ranjan; PATTNAIK, Rashmi R.; PANDA, Bikash Chandra. Study on relative shrinkage of cement-based micro-concrete for durable concrete repair. Cleaner Engineering and Technology, Volume 8, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100444>.

NEVILLE, A. M. Propriedades do concreto. 5.ed. São Paulo: Editora Bookman, 2016;

PATEL, Mitali *et al.* SHEAR STRENGTHENING OF RC BEAM USING FERRO-CEMENT & MICRO-CONCRETE. International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET) Volume 8, Issue 5, May 2017, pp.881–894. <http://iaeme.com/Home/issue/IJCIET?Volume=8&Issue=5>.

RAVAL, Sachin S; DAVE, Urmil V. Effectiveness of Various Methods of Jacketing for RC Beams. Procedia Engineering, Volume 51, 2013, P 230-239. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.01.032>.

SILVA, Augusto Costa *et al.* Microconcrete of high performance: properties and behavior under combined compression and one-axis bending. Revista Matéria, Vol 23, Num 03, Março 2018. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620180003.0495>.

SOKOLOVICZ, Bóris Casanova. Microestrutura e Durabilidade a Cloretos de Protótipos de Concreto com Cinza de Casca de Arroz com e sem a Moagem Prévia. 2013. 165 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de PósGraduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

THOMAS, Thomas C *et al.* Effect of high temperature and accelerated aging in high density micro-concrete. Construction and Building Materials, 2021, p. 272. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121920>.

TOPÇU, İ, B; ATESIN, O. Effect of high dosage lignosulphonate and naphthalene sulphonate based plasticizer usage on micro concrete Properties. Construction and Building Materials, Volume 120, 2016, P 189-197. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.112>.

YIN, Jijing *et al.* Seismic Risk Assessment and Rehabilitation Method of Existing RCC Structures Using Micro Concrete. Civil Engineering Journal, Vol. 9, No. 12, dezembro, 2023. <http://dx.doi.org/10.28991/CEJ-2023-09-12-04>.

CAPÍTULO 02

Microconcreto de alto desempenho: Análise da trabalhabilidade e resistência a compressão.

High-performance microconcrete: Analysis of workability and compressive strength.

RESUMO

COSTA, GABRIEL SOUZA. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde – GO, fevereiro de 2025. Estudo do microconcreto: Uma revisão sistemática de literatura. Microconcreto de alto desempenho: Análise da trabalhabilidade e resistência a compressão. Orientador: Michell Alves Macedo. Com os avanços tecnológicos, surgiram melhorias nas propriedades do concreto convencional, destacando-se o microconcreto de alto desempenho (MCAD), que visa superar limitações em resistência à compressão e trabalhabilidade, proporcionando maior durabilidade e desempenho estrutural. O MCAD é caracterizado pela utilização de agregados finos e aditivos especiais, o que resulta em um material com alta resistência e trabalhabilidade aprimorada. A resistência à compressão e a trabalhabilidade são propriedades essenciais para garantir a qualidade do material e a segurança das estruturas, sendo impactadas pela dosagem dos ingredientes e pela relação água/aglomerante. Este estudo tem como objetivo analisar as propriedades do MCAD, com foco na avaliação da trabalhabilidade e da resistência à compressão, considerando a variação da relação entre água e aglomerante. A pesquisa também investiga o impacto do metacaulim em comparação com a sílica ativa, no comportamento reológico e na resistência mecânica do material, especialmente nas fases iniciais de cura. Os resultados da pesquisa indicam que a relação água/aglomerante de 0,4 e a dosagem de superplastificante de 0,8% foram identificadas como parâmetros ideais para garantir a melhor trabalhabilidade do concreto estudado. Além disso, com esses parâmetros o microconcreto atingiu uma resistência de 67,90 Mpa.

Palavras-chave: Metacaulim. Sílica ativa. Água. Aglomerante.

ABSTRACT

COSTA, GABRIEL SOUZA. *Federal Institute of Education, Science, and Technology Goiano – Rio Verde Campus – GO, February 2025. Study of Microconcrete: A Systematic Literature Review. High-Performance Microconcrete: Analysis of Workability and Compressive Strength. Supervisor: Michell Alves Macedo. With technological advances, improvements have emerged in the properties of conventional concrete, highlighting high-performance microconcrete (MCAD), which aims to overcome limitations in compressive strength and workability, providing greater durability and structural performance. MCAD is characterized by the use of fine aggregates and special additives, which results in a material with high resistance and improved workability. Compressive strength and workability are essential properties to guarantee the quality of the material and the safety of structures, being impacted by the dosage of ingredients and the water/binder ratio. This study aims to analyze the properties of MCAD, focusing on evaluating workability and compressive strength, considering the variation in the relationship between water and binder. The research also investigates the impact of metakaolin, compared to silica fume, on the rheological behavior and mechanical resistance of the material, especially in the initial stages of curing. The research results indicate that the water/binder ratio of 0.4 and the superplasticizer dosage of 0.8% were identified as ideal parameters to guarantee the best workability of the concrete studied. Furthermore, with these parameters the microconcrete reached a resistance of 67,90 MPa.*

Keywords: *Metakaolin. Active silica. Water. Agglomerating.*

1. INTRODUÇÃO

O concreto é amplamente reconhecido como um dos materiais mais utilizados na construção civil, devido à sua versatilidade, durabilidade e acessibilidade (Mehta & Monteiro, 2014). No entanto, o avanço das tecnologias de materiais na engenharia, ao longo das últimas décadas, resultou em melhorias significativas nas propriedades do concreto convencional, com destaque para o desenvolvimento do microconcreto de alto desempenho (MCAD). Este material foi concebido para superar as limitações dos concretos tradicionais, especialmente em relação à resistência à compressão e à trabalhabilidade, proporcionando vantagens adicionais em termos de durabilidade e desempenho estrutural (Sahmaran *et al.*, 2007).

O microconcreto de alto desempenho é caracterizado pela utilização de agregados finos e a incorporação de aditivos especiais, que conferem ao material propriedades superiores, adequando-o a aplicações exigentes na construção civil (Neville, 2016). Estudos demonstram que a combinação desses componentes resulta em um MCAD com maior durabilidade, resistência mecânica e uma trabalhabilidade aprimorada, facilitando sua aplicação em condições de obras complexas (Pinto & Ferreira, 2008; Barbosa & Brito, 2012).

A trabalhabilidade do concreto refere-se à facilidade com que o material pode ser misturado, transportado, colocado e compactado sem segregação ou exsudação. Esta propriedade é crucial para garantir a qualidade da aplicação do material. Por outro lado, a resistência à compressão é uma das principais características do concreto, refletindo sua capacidade de suportar cargas sem falhas. No caso do MCAD, a trabalhabilidade é otimizada pela escolha adequada dos aditivos e pela proporção de agregados finos, o que facilita a execução da obra. Já a resistência à compressão é significativamente superior ao concreto convencional, sendo influenciada pela relação entre a quantidade de água e cimento na mistura (Souza & Silva, 2016).

A dosagem precisa dos ingredientes, juntamente com o controle da trabalhabilidade e da resistência à compressão, são fatores essenciais para garantir o desempenho esperado do MCAD, tanto durante o processo de mistura e aplicação quanto após a cura, impactando diretamente a qualidade do material e a segurança da estrutura (Souza & Silva, 2016). Estudos indicam que, ao controlar essas variáveis, é possível obter um material com desempenho superior, ideal para estruturas exigentes e mais duráveis, contribuindo para a melhoria da qualidade das construções e a segurança das mesmas (Gomes *et al.*, 2018).

Diante disso, o objetivo principal deste estudo é analisar as propriedades do microconcreto de alto desempenho, com ênfase na avaliação de sua trabalhabilidade ao longo do tempo e na determinação de sua resistência à compressão, considerando a variação da relação entre água e aglomerante. A pesquisa também busca entender como a utilização do metacaulim em comparação com a sílica ativa, modifica a interação entre os componentes do material, e suas proporções, influencia o comportamento reológico e a resistência mecânica do MCAD, especialmente durante os estágios iniciais de cura.

A relevância deste estudo reside no crescente interesse pela melhoria das propriedades dos concretos utilizados na construção civil, o que pode resultar em ganhos significativos em termos de durabilidade e segurança das estruturas. Além disso, a análise das características do microconcreto de alto desempenho (MCAD) permite um aprofundamento nas técnicas que podem ser adotadas para otimizar seu desempenho, ampliando suas aplicações em diversos contextos, desde obras de infraestrutura até edificações de alto padrão.

2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1 Microconcreto de alto desempenho com utilização de metacaulim

O concreto convencional é amplamente utilizado na construção civil, composto por cimento, água, agregados e, em alguns casos, aditivos, além de apresentar resistência e durabilidade adequadas para diversas aplicações. Entretanto, segundo Souza (2014), o concreto de alto desempenho (CAD) é caracterizado por elevada resistência mecânica, baixa permeabilidade e alta durabilidade, obtidas por meio de uma dosagem otimizada e uso de materiais específicos, como adições minerais e aditivos superplastificantes. Portanto, ele se destaca em projetos que demandam maior desempenho estrutural e durabilidade.

Um dos principais interesses para a aplicação do CAD na construção civil é a busca por materiais que atendam às exigências de projetos modernos. Um estudo comparativo entre o concreto convencional e o CAD em edifícios altos revelou que o uso do concreto de alto desempenho possibilitou reduções de custos devido à diminuição das seções dos elementos estruturais, resultando em menor consumo de concreto e aço, além de proporcionar estruturas mais esbeltas e aumento da área útil (SILVA, 2004).

Com a crescente busca por melhorias, obteve-se o Microconcreto de Alto Desempenho (MCAD), que é uma versão mais refinada do CAD, utilizando uma combinação de agregados finos e outros componentes que resultam em uma pasta mais densa e homogênea. Muitas

vezes, o microconcreto contém partículas de alta resistência e materiais de tamanho nanométrico, como microesferas de vidro ou micro sílica (RIBEIRO *et al.*, 2016).

O metacaulim é amplamente utilizado como adição em concretos e produtos à base de cimento Portland, materiais de construção aplicados em todo o mundo. Devido à alta demanda, sua produção em larga escala é essencial para viabilizar seu uso nas obras, garantindo qualidade e homogeneidade conforme os parâmetros estabelecidos por normas técnicas ou especificações dos usuários. Metacaulim de Alta Reatividade foi utilizado com adicional ao cimento CP V RS para aumentar a resistência química e mecânica do concreto. Desta forma, o Metacaulim se enquadra na norma brasileira NBR 12653 (ABNT, 2014).

Além das discussões previamente apresentadas, é importante mencionar a existência de estudos que exploram aplicações e propriedades similares desse material. Por exemplo, Shehab El-Din *et al.* (2017) investigaram o desempenho mecânico de concretos de alta resistência produzidos com elevado teor de metacaulim e fibras híbridas. Os autores concluíram que a substituição de 15% do cimento por metacaulim, aliada à adição de fibras de aço e polipropileno em frações volumétricas de 0,25% e 0,50% respectivamente, resultou em aumentos significativos na resistência à compressão, tração por compressão diametral e aderência ao longo dos períodos de cura avaliados.

Outro estudo relevante é o de Matos *et al.* (2017), que desenvolveram concretos autoadensáveis de alto desempenho com enfoque na ecoeficiência e no baixo teor de ligante. A pesquisa destacou a viabilidade de reduzir o conteúdo de cimento nas misturas sem comprometer as propriedades reológicas e mecânicas do concreto. As propriedades reológicas, que dizem respeito ao comportamento do material fresco, incluindo sua fluidez, viscosidade e trabalhabilidade, foram analisadas para garantir que a mistura mantivesse sua capacidade de escoamento e preenchimento adequado das formas sem segregação. Esse avanço contribuiu significativamente para a sustentabilidade na construção civil, reduzindo o impacto ambiental sem prejudicar o desempenho estrutural.

Adicionalmente, Zanotti *et al.* (2017) analisaram a resistência de aderência entre substratos de concreto e argamassas de reparo geopoliméricas à base de metacaulim, considerando diferentes regimes de cura e a incorporação de fibras de polivinil álcool (PVA). Os resultados indicaram que a cura adequada e a adição de fibras PVA melhoram a aderência entre o material de reparo e o substrato de concreto, sugerindo o potencial das argamassas geopoliméricas como alternativas eficazes para reparos estruturais.

Esses estudos complementam a compreensão sobre as vantagens do uso de metacaulim no microconcreto de alto desempenho, especialmente no que tange à durabilidade, resistência mecânica e sustentabilidade.

2.1.1 Histórico e definição

O Microconcreto de Alto Desempenho (MCAD) surgiu como uma evolução tecnológica no campo dos materiais cimentícios, visando atender às exigências de obras modernas que demandam maior resistência, durabilidade e trabalhabilidade. De acordo com o autor Silva *et al.* (2018), o MCAD é caracterizado por uma dimensão máxima de agregado reduzida e uma baixa relação água/aglomerante, resultando em um material com alta resistência mecânica e baixa permeabilidade.

A evolução do MCAD remonta à década de 1950, quando concretos com resistências próximas de 35 MPa já eram considerados inovadores. Durante a década de 1960, os concretos passaram a atingir entre 41 MPa e 52 MPa, enquanto, no início da década de 1970, foram desenvolvidos concretos com resistência de até 62 MPa, impulsionados pela crescente necessidade de estruturas verticais mais altas e esbeltas (SOUZA; OTRE, 2014).

Normativamente, a NBR 6118:2023, que trata do projeto de estruturas de concreto, reforça a padronização do uso do MCAD ao adotar a mesma classificação apresentada na NBR 8953:2009, garantindo que os requisitos técnicos sejam devidamente atendidos em projetos estruturais.

Dessa forma, o MCAD representa um marco na engenharia civil, permitindo a construção de estruturas mais esbeltas, resistentes e duráveis. Seu desenvolvimento contínuo reflete o avanço da tecnologia do concreto e a busca por materiais de alto desempenho que possam atender às crescentes demandas da construção civil contemporânea.

2.1.2 Classificação

No contexto brasileiro, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) estabelece diretrizes para a classificação dos concretos estruturais por meio da NBR 8953:2009, que os divide em dois grupos principais. Segundo essa norma, concretos de Classe I possuem resistência compreendida entre 20 e 50 MPa, enquanto os concretos de Classe II, destinados a aplicações estruturais mais exigentes, apresentam resistência entre 55 e 80 MPa (ABNT, 2009). Essa diferenciação é fundamental para garantir a aplicação adequada do material em diferentes contextos da engenharia civil.

Além disso, é importante destacar a distinção entre Concreto de Alta Resistência (CAR) e Microconcreto de Alto Desempenho (MCAD). Enquanto o CAR enfatiza a resistência mecânica como principal atributo, o MCAD adota uma abordagem mais abrangente, considerando aspectos como durabilidade, trabalhabilidade e resistência a agentes agressivos. Segundo Aïtcin (2008), "o MCAD é um concreto engenheirizado no qual uma ou mais características específicas são realçadas por meio da seleção e proporcionamento adequado de seus constituintes" (AÏTCIN, 2008, PHD Engenharia, 2014).

2.1.3 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade do microconcreto de alto desempenho (MCAD) refere-se à facilidade com que o concreto fresco pode ser manipulado, transportado e colocado nas formas, sem que ocorram segregação ou exsudação. A trabalhabilidade é fundamental para garantir que o concreto atenda a suas funções de resistência e durabilidade, sem perder a qualidade durante o processo de aplicação. A trabalhabilidade do MCAD é influenciada pela combinação de materiais, como os aglomerantes, aditivos e agregados finos de alta qualidade, além de um controle rigoroso da relação água/cimento (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A ABNT NBR 12655:2015 especifica que, para concretos com características de alto desempenho, deve-se buscar a máxima trabalhabilidade possível com o mínimo de água, sem que seja comprometida a resistência ou durabilidade. Esse controle é essencial, pois uma quantidade excessiva de água comprometeria a resistência final do concreto, enquanto uma quantidade insuficiente prejudicaria a mistura e a colocação do material nas formas.

A trabalhabilidade do MCAD também é significativamente afetada pelos agregados, especialmente os agregados finos. Conforme a ABNT NBR 7212:2012, para que o concreto de alto desempenho tenha boa trabalhabilidade, é recomendada a utilização de agregados com granulometria bem controlada, minimizando o efeito de segregação durante o transporte e lançamento do concreto. Além disso, a utilização de aditivos superplastificantes é uma prática comum, pois eles aumentam a fluidez do concreto sem a necessidade de mais água mantendo uma boa consistência sem comprometer sua resistência" (SOUZA; SILVA, 2016).

O comportamento do microconcreto de alto desempenho (MCAD) em relação à trabalhabilidade está intimamente ligado ao desempenho final do material na obra. A facilidade de manuseio durante a aplicação no canteiro é essencial para garantir que o concreto seja adequadamente colocado nas formas e compactado de maneira eficiente. A trabalhabilidade afeta diretamente a qualidade da execução, e, por isso, é fundamental que o

MCAD seja bem manipulado desde o momento do transporte até sua colocação, evitando problemas que comprometam sua eficácia na construção.

Além disso, a manutenção da trabalhabilidade ao longo do processo de aplicação é crucial para preservar suas características de fluidez e consistência. Fatores como temperatura ambiente, tempo de transporte e técnicas de aplicação podem influenciar diretamente essas propriedades, tornando necessário o uso de aditivos, como retardadores ou controladores de tempo de pega, conforme definido por normas técnicas (ABNT NBR 12655:2015). Essas medidas ajudam a manter o MCAD com a consistência ideal, garantindo que o concreto não perca suas qualidades de resistência e durabilidade e assegurando um controle eficiente durante todas as etapas da obra (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

2.1.4 Resistência à compressão

A resistência à compressão é uma das principais propriedades que define o desempenho do concreto, sendo fundamental para garantir a segurança e a integridade estrutural das construções. O concreto de alto desempenho, devido ao seu processo de fabricação e à escolha criteriosa de materiais, alcança valores de resistência à compressão muito superiores ao concreto convencional. A ABNT NBR 6118:2023 estabelece que a resistência à compressão é um parâmetro chave no dimensionamento de elementos estruturais, sendo um fator primordial para garantir a segurança e a funcionalidade das estruturas.

De acordo com a ABNT NBR 12655:2015, a resistência à compressão do MCAD deve ser superior a 50 MPa, o que representa uma classe de resistência elevada. Comparada ao concreto convencional, que, em muitos casos, não ultrapassa os 30 MPa. Isso é alcançado por meio da otimização da dosagem, do uso de materiais como cimento de alta resistência, aditivos superplastificantes e agregados de alta qualidade. A relação água/cimento, um dos fatores mais influentes na resistência do concreto, deve ser rigorosamente controlada para garantir que a pasta de cimento tenha a trabalhabilidade necessária sem comprometer a resistência final do concreto.

Outro item que também influencia a resistência à compressão do MCAD é a proporção dos componentes, qualidade dos materiais e condições de cura. A ABNT NBR 7212:2012 destaca que a utilização de agregados finos de alta qualidade e cimento de alta resistência inicial contribui para a obtenção de um concreto mais denso e resistente, além disso, a cura é um fator essencial para o desenvolvimento completo da resistência. Segundo Mehta e Monteiro (2014), a cura adequada, que deve ser realizada por pelo menos 7 dias, pois esse

tempo permite que o concreto desenvolva sua resistência máxima, além de evitar a formação de fissuras.

De acordo com Barbosa e Brito (2012), o comportamento do MCAD em relação à resistência à compressão pode ser considerado superior devido ao controle preciso da dosagem e à sua estrutura mais densa, resultando em uma melhor aderência entre os materiais e na redução da permeabilidade. Sua alta resistência à compressão não só contribui para a segurança das estruturas, mas também melhora sua durabilidade, uma vez que concretos mais resistentes são menos suscetíveis ao ataque de agentes agressivos, como ácidos e sulfatos.

3. OBJETIVO

O objetivo do presente trabalho foi investigar a influência da variação da relação de Água/aglomerante nas propriedades de trabalhabilidade e resistência a compressão do microconcreto de alto desempenho com utilização do metacaulim.

4. JUSTIFICATIVA

O desenvolvimento deste estudo baseia-se na crescente demanda por materiais inovadores na construção civil que proporcionem maior durabilidade, resistência mecânica e eficiência na aplicação. O concreto, amplamente utilizado no setor, tem passado por constantes avanços tecnológicos, visando melhorar suas propriedades e expandir suas aplicações. Nesse contexto, o microconcreto de alto desempenho (MCAD) com utilização do metacaulim surge como uma alternativa promissora, devido às suas características superiores em relação ao concreto convencional e a presença do metacaulim no mercado.

A relevância deste estudo está na necessidade de aprofundar o conhecimento sobre o MCAD, especialmente no que se refere à sua trabalhabilidade e resistência à compressão. A trabalhabilidade é um fator essencial para garantir a qualidade da aplicação do material, influenciando diretamente a eficiência dos processos construtivos e a integridade estrutural das edificações. Além disso, a manutenção da trabalhabilidade é um fator essencial pois não apenas facilita o manuseio e aplicação do material, mas também contribui para a redução de desperdícios, melhora o acabamento e assegura o desempenho esperado da estrutura final. Da mesma forma, a resistência à compressão é um dos parâmetros mais importantes na avaliação do desempenho mecânico do concreto, sendo determinante para a segurança e longevidade das estruturas. O estudo também se justifica pela crescente exigência por materiais que atendam a desafios estruturais complexos, como aqueles encontrados em obras de infraestrutura e edificações de alto padrão. Ao investigar as propriedades do MCAD e sua

evolução ao longo do tempo, esta pesquisa pode fornecer subsídios para a adoção de técnicas mais eficientes na engenharia civil, resultando em construções mais seguras, duráveis e sustentáveis.

Dessa forma, apesar dos estudos já existentes, a presente investigação visa contribuir para o avanço do conhecimento técnico sobre o microconcreto de alto desempenho com utilização do metacaulim, promovendo sua aplicação otimizada no setor da construção civil e impulsionando novas abordagens para o uso de materiais cimentícios inovadores.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Materiais

Esta seção apresenta as características dos materiais constituintes. Os ensaios realizados e materiais utilizados foram executados e fornecidos na Verc Concretos em Rio Verde – GO.

5.1.1 Cimento

O cimento utilizado foi o CP V RS, é de alta resistência inicial e resistente a sulfatos e tem alta reatividade em baixas idades em função do grau de moagem conforme a ABNT NBR 16697 (2018). A caracterização química foi obtida através do fabricante. Os valores obtidos são apresentados na (Tabela 09).

Tabela 9 - Caracterização do Cimento Portland da pesquisa.

Características								
					Finuras		Tempo de pega	
Idades	R 01 Dia (MPa)	R 03 dias (MPa)	R 07 dias (MPa)	R 28 dias (MPa)	#325 (%)	Blaine (m ² /kg)	Início de pega	Fim de pega
NBR16697	14,0	24	34	-	-	≥260	≥60	≤600
CP V RS	17,9	32,6	41,7	55,6	0,8	473	158	197

Fonte: Fabricante (2025).

5.1.2 Metacaulim

Na Tabela 10 e Tabela 11 segue informações técnicas e caracterização química fornecidas pelo fabricante.

Tabela 10 - Características químicas do metacaulim.

Estado físico	sólido
Forma	geralmente pó seco ou torrão úmido
Massa específica (média)	2,60 g / cm ³
Massa unitária (para efeito de estocagem)	300 a 1000 kg / m ³ ;
Cor	branco, rosa, laranja ou avermelhado
Composição química típica	química típica
Odor	inodoro
pH	6,2 a 7,5

Fonte: Fabricante (2025).

Tabela 11 - Características químicas do metacaulim.

SiO ₂	50,0% a 65,0%	Al ₂ O ₃	27,0 a 44,5%
Fe ₂ O ₃	< 5,0%	MgO	< 0,5%
CaO	< 0,5%	SO ₃	< 0,1%
Álcalis Totais	< 3%	P.F.	< até 14%

Fonte: Fabricante (2025).

5.1.3 Areia Natural

A areia natural utilizada neste estudo foi fornecida pela Verc Concreteira e apresenta características adequadas para aplicação em microconcretos. Extraída de depósitos naturais, a areia passou por processos de peneiramento e classificação para garantir a uniformidade granulométrica e a remoção de impurezas. Seu teor de finos encontra-se dentro dos limites recomendado pela norma técnica ABNT NBR 16916 (2021), proporcionando boa trabalhabilidade e resistência mecânica ao concreto. A Tabela 12 apresenta as características fornecidas pelo fabricante.

Tabela 12 - Caracterização da areia natural

Características:	
Módulo de Finura:	1,68
Dimensão Máxima Característica (mm):	0,62
Massa Específica (g/cm ³):	2,63
Material Pulverulento (%):	5,5

Fonte: Fabricante (2025).

5.1.4 Areia Artificial

A areia artificial utilizada neste estudo foi fornecida pela Verc Concreteira, localizada em Rio Verde – GO. Produzida a partir da britagem de rochas com origem basáltica, essa

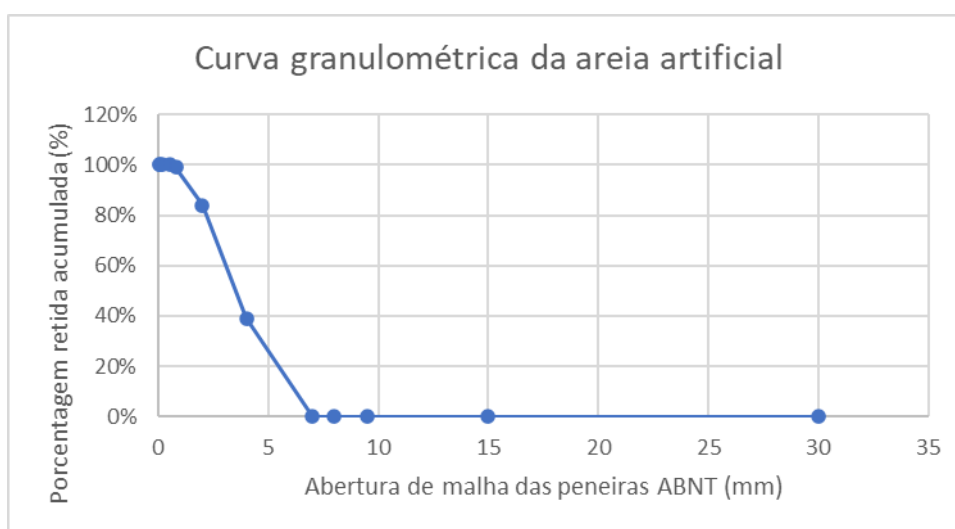
areia apresenta uma distribuição granulométrica controlada, proporcionando melhor empacotamento dos grãos e maior coesão nas misturas cimentícias. Suas partículas possuem forma mais angular em comparação à areia natural, o que pode contribuir para o aumento da resistência mecânica do concreto. Além disso, suas propriedades físicas e químicas atendem aos requisitos estabelecidos pelas normas técnicas vigentes, garantindo qualidade e desempenho adequados para aplicações em microconcretos seguindo norma ABNT NBR 16916 (2021).

Tabela 13 - Caracterização da areia artificial.

Características	Resultados	Método de Ensaio
Massa Específica (g/cm ³)	2,90	ABNT NBR 16916 (2021)
Massa Unitária no Estado Solto (kg/cm ³)	1,46	ABNT NBR 16972(2021)
Módulo de Finura	4,22	ABNT NBR 17054(2022)
Dimensão Máxima (mm)	4,75	
Material Pulverulento (%)	1,21	ABNT NBR 16973(2021)

Fonte: Gonçalves, *et al.* (2024).

Figura 8 - Curva granulométrica da areia artificial



Fonte: Gonçalves, *et al.* (2024).

5.1.5 Água

Para a produção dos microconcretos e pastas, foi utilizada água de amassamento conforme os requisitos estabelecidos pela NBR 15900, fornecida pela Verc Concreteira Rio Verde.

5.1.6 Aditivo Superplastificante

O aditivo utilizado foi um superplastificante, redutor de água do tipo 2 à base de policarboxilatos, segundo a ABNT NBR 11768 (2011), denominado L 2020 fornecido pela empresa Verc Concretos. As características do aditivo utilizado estão dispostas na Tabela 14.

Tabela 14 - Características Aditivo superplastificante L2020.

Aditivo Superplastificante	L 2020
Dosagem recomendada (%)	0,5 a 1,5%
Densidade (g/cm ³)	1030 a 1070

Fonte: Fabricante (2024).

5.2 Métodos

Esta seção apresenta a metodologia do estudo de dosagem e os ensaios realizados no concreto em estado fresco.

5.2.1 Composição dos traços

O traço de referência do trabalho foi obtido de Gonçalves, *et al.* (2024) que utilizou o método de dosagem do (IPT/EPUSP). Desta forma na Tabela 15 mostra o traço de referência da autora para os demais desenvolvidos nesse artigo.

Tabela 15 - Traço de referência.

	TRAÇO TRABALHO ELAINE					
	Cimento (kg)	Sílica (kg)	Areia (kg)	Areia ART (kg)	Água (L)	L2020 (L)
	19,32	3,36	3,4	41,98	6,8	0,18144
CONSUMO (1M ³)	552,0	96,0	97,1	1199,4	194,3	5,184
TRAÇO	1		0,15	1,85		

Fonte: Gonçalves (2024).

A partir do traço inicial, foram realizadas adaptações para otimizar as propriedades do concreto, substituindo a sílica ativa por metacaulim e ajustando a relação água/aglomerante. Essa modificação foi necessária devido diferença de coesão proporcionado pelo metacaulim, em relação à sílica ativa, que influencia diretamente na trabalhabilidade e no desempenho do material. O ajuste da quantidade de água permitiu a manutenção das características reológicas adequadas, evitando a excessiva coesão da mistura e assegurando sua conformidade com os requisitos técnicos estabelecidos para a aplicação desejada.

Desta maneira, com as alterações feitas definiram-se três traços, descritos na Tabela 16, mantendo o mesmo valor para agregados e aglomerantes do traço de referência, alterando apenas a relação de Água/aglomerante e superplastificante.

Tabela 16 - Traços de microconcreto e seus respectivos consumos de materiais.

	Traço 01						
	0,45 (relação água/aglomerante) - 0,80% superplastificante						
	Quant. Concreto (m³)		0,02	Quant. Concreto (L)		20	TOTAL
	Cimento (kg)	Metacaulim(kg)	Areia (kg)	Areia ART (kg)	Água (L)	L2020 (L)	
QUANT.	11,0400	1,9200	1,9429	23,9886	5,8320	0,1037	44,82711
TRAÇO	1		0,15	1,85			
	Traço 02						
	0,43 (relação água/aglomerante) - 0,60% superplastificante						
	Quant. Concreto (m³)		0,02	Quant. Concreto (L)		20	TOTAL
	Cimento (kg)	Metacaulim(kg)	Areia (kg)	Areia ART (kg)	Água (L)	L2020 (L)	
QUANT.	11,0400	1,9200	1,9429	23,9886	5,5728	0,0778	44,54199
TRAÇO	1		0,15	1,85			
	Traço 03						
	0,40 (relação água/aglomerante) - 0,80% superplastificante						
	Quant. Concreto (m³)		0,02	Quant. Concreto (L)		20	TOTAL
	Cimento (kg)	Metacaulim(kg)	Areia (kg)	Areia ART (kg)	Água (L)	L2020 (L)	
QUANT.	11,0400	1,9200	1,9429	23,9886	5,1840	0,1037	44,17911
TRAÇO	1		0,15	1,85			

Fonte: Autor (2025).

Para execução do traço foram seguintes os seguintes prosseguimentos:

- Umedeceu-se a betoneira com água;
- Misturaram-se os agregados com 70% da água por 1 minuto;
- Adicionaram-se cimento, o metacaulim, restante da água e aditivo superplastificante e misturou por 12 minutos.

Após etapa de mistura demonstrada na Figura 9, foram realizados os ensaios para determinação de trabalhabilidade e moldagem de corpos de prova.

Figura 9 - Mistura de concreto.



Fonte: Autor (2025).

5.2.2 Ensaio para a determinação da consistência do concreto fresco

Para a realização do ensaio de determinação da consistência do concreto fresco, foi utilizado o método do abatimento do tronco de cone (*slump test*), conforme a norma ABNT NBR 16889:2020. Para cada mistura, este ensaio foi realizado três vezes. A primeira, logo após o processo inicial do preparo da mistura. Após esta medida, o microconcreto foi devolvido à betoneira, onde descansou por mais 12 minutos; a seguir, misturou-se por mais 30 segundos e medido o novo abatimento. O mesmo processo se repetiu para a determinação da última medição.

Assim a partir das Figura 10, é possível verificar a execução do ensaio.

Figura 10 - Execução do ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone, segundo ABNT NBR 16889:2020.



Fonte: Autor (2025).

A moldagem dos corpos de prova de concreto foi realizada conforme os procedimentos estabelecidos na norma ABNT NBR 5738:2015, que regula a moldagem e a cura de corpos de prova cilíndricos ou prismáticos para ensaios mecânicos. Desta forma, os corpos de prova foram limpos e revestidos com óleo mineral conforme norma. Assim, foi adotado o método de adensamento manual, e seguiu-se o seguinte procedimento para a moldagem:

- **Preparação das formas:** Antes da moldagem, as formas cilíndricas foram limpas e lubrificadas com óleo mineral internamente para facilitar a desmoldagem.
- **Concretagem:** O concreto foi vertido nas formas em duas ou três camadas de alturas aproximadamente iguais, dependendo do método de adensamento adotado.
- **Adensamento:** Utilizou-se adensamento manual com haste metálica, aplicando-se 12 golpes uniformemente distribuídos em cada camada.
- **Acabamento:** Após o adensamento, a superfície dos corpos de prova foi nivelada e alisada, garantindo uma face superior regular.
- **Cura Inicial:** Os corpos de prova permaneceram nas formas por um período de 24 ± 8 horas em ambiente protegido contra vibrações, vento e perda de umidade.
- **Desmoldagem e Cura Final:** Após o período inicial, os corpos de prova foram retirados das formas e armazenados em câmara úmida ou tanque de água

saturada com cal, mantidos a temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ até o momento dos ensaios mecânicos.

Figura 11 - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, segundo ABNT NBR 16889:2020 - Traço 01.



Fonte: Autor (2025).

5.2.3 Resistência à compressão simples

A determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto seguiu os procedimentos estabelecidos pela norma ABNT NBR 5739:2018. O ensaio foi realizado em um ambiente controlado, com temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ e umidade relativa do ar superior a 50%, conforme exigido pela norma. Os corpos de prova foram curados em câmara úmida por 7 dias antes do ensaio. Previamente ao ensaio, as superfícies foram verificadas quanto à sua planicidade e, quando necessário, realizou-se o capeamento com enxofre. O ensaio consistiu na aplicação de uma carga axial crescente a uma velocidade de $(0,45 \pm 0,15) \text{ MPa/s}$, até a ruptura do corpo de prova. O carregamento foi realizado de forma contínua e sem choques em uma prensa manual, garantindo a precisão dos resultados, conforme ilustrado na Figura 12.

Figura 12 - Ensaio de resistência à compressão de corpo de prova cilíndrico, segundo ABNT NBR 5739:2018



Fonte: Autor (2025).

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Consistência do concreto fresco

Os ensaios realizados demonstraram a influência da relação água/cimento, do tipo e da granulometria dos agregados, bem como do uso de aditivos superplastificantes na fluidez da mistura. A Tabela 17 representa os resultados de abatimento dos três traços feitos e suas respectivas medições de abatimento ao longo do tempo.

Tabela 17 - Abatimentos.

ABATIMENTO (mm)			
	TRAÇO 01	TRAÇO 02	TRAÇO 03
1º Medição (0 min)	210	150	250
2º Medição (12 min)	170	120	233
3º Medição (24 min)	155	85	220

Fonte: Autor (2025).

A partir do resultado de abatimento obtido, nota-se que o Traço 03 foi o que mais se destacou em relação a sua trabalhabilidade inicial e ao longo do tempo. A Figura 13 mostra o resultado da primeira medição do ensaio de abatimento desse traço.

Figura 13 - Primeira medição de abatimento do Traço 03.



Fonte: Autor (2025).

Já o Traço 01 obteve-se resultados menos expressivos devido a perda de coesão do material, devido a troca da Sílica ativa, usada no traço de referência, pelo Metacaulim. Assim, a Figura 14 representa claramente a perda de coesão no ensaio de abatimento, onde a parte inferior apresenta um concreto mais fluido e na parte superior mais coeso.

Figura 14 -Primeira medição de abatimento do Traço 01.



Fonte: Autor (2025).

O Traço 02 obteve o abatimento menor entre os três e o que teve mais perda ao longo do tempo. O que pode ser explicado pela redução da relação água/aglomerante de 0,45 para 0,43, e de superplastificante de 0,8% para 0,6%, causando essa perda de trabalhabilidade. A Figura 15 mostra o resultado da primeira medição do ensaio de abatimento desse traço.

Figura 15 - Primeira medição de abatimento do Traço 02.



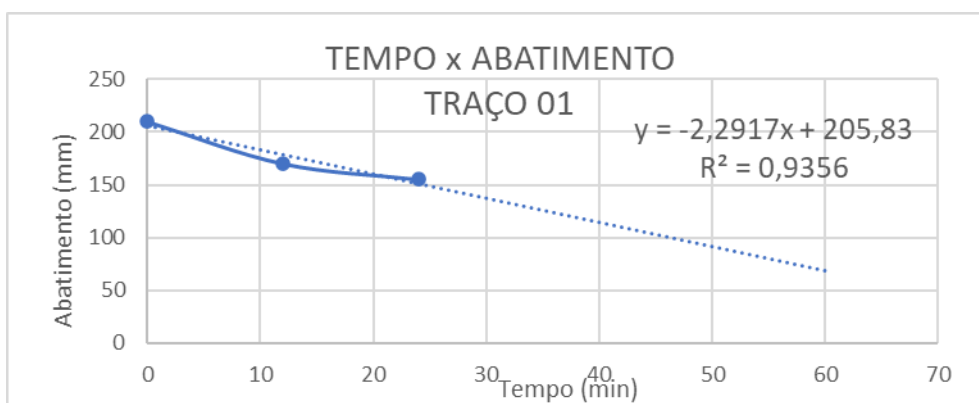
Fonte: Autor (2025).

A partir da análise dos resultados de cada traço é notável que a relação de água/aglomerante e superplastificante alteram significativamente a trabalhabilidade do MCAD.

Assim, para este estudo, a melhor dosagem de superplastificante foi de 0,8% e a relação água/aglomerante de 0,4.

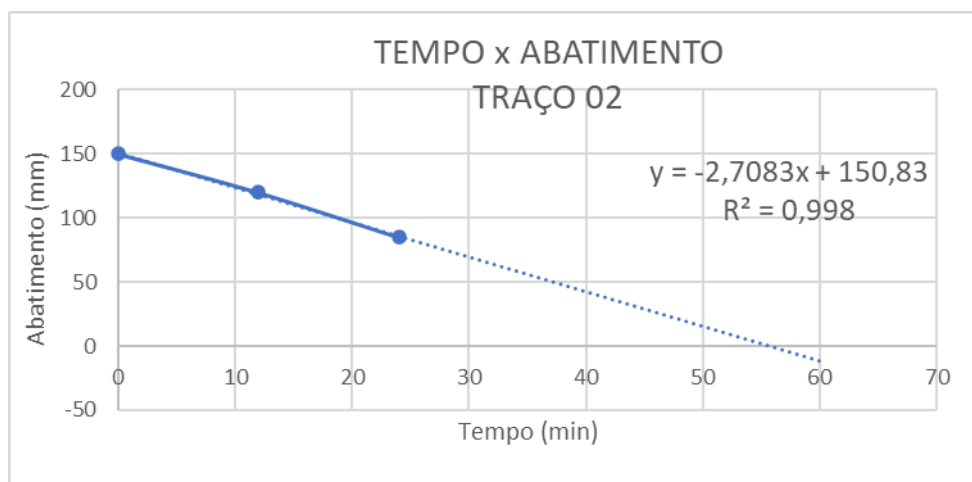
Com as três medições de abatimento para cada traço, foi possível fazer uma análise para determinar como seria o desenvolvimento da trabalhabilidade do MCAD em tempos maiores. Assim, as Figuras 16, 17 e 18 demonstram a queda de abatimento ao longo do tempo.

Figura 16 - Gráfico Tempo (min) X Abatimento (mm) Traço 01



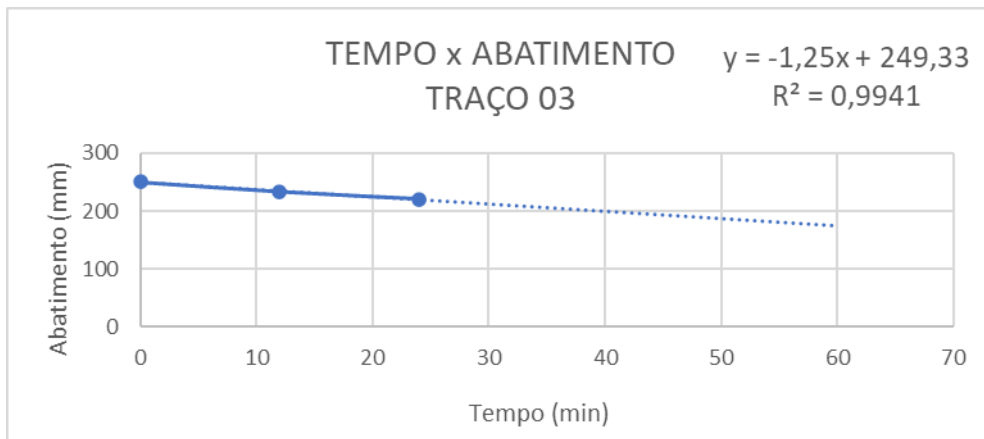
Fonte: Autor (2025).

Figura 17 - Gráfico Tempo (min) X Abatimento (mm) Traço 02.



Fonte: Autor (2025).

Figura 18 - Gráfico Tempo (min) X Abatimento (mm) Traço 02.



Fonte: Autor (2025).

Pode-se observar que, para os três traços, as equações das retas propostas apresentaram excelentes aproximações, com o R2 superior a 0,90.

Com isso, verifica-se que o Traço 03 apresentou uma perda de trabalhabilidade muito menor que as restantes dos traços, chegando a manter uma projeção de 274,33mm de abatimento 60 minutos após a realização do traço. Já o Traço 02, com o tempo de 60 minutos chegou a um abatimento negativo, o que não corresponde a um sentido físico. Assim, um pouco antes deste tempo, este concreto apresentou perda total de sua trabalhabilidade. Além disso, a partir dos gráficos apresentados é possível comparar os resultados através da Tabela 18 e demonstrar a perda de trabalhabilidade em números de cada traço.

Tabela 18 - Projeção de abatimento com o tempo.

PROJEÇÃO DE ABATIMENTO COM TEMPO			
TRAÇO 01			
Tempo (min)	0	45	60
Abatimento (mm)	205,83	102,70	68,33
TRAÇO 02			
Tempo (min)	0	45	60
Abatimento (mm)	150,83	28,96	0,00
TRAÇO 03			
Tempo (min)	0	45	60
Abatimento (mm)	249,33	193,08	174,33

Fonte: Autor (2025).

Por meio dessa projeção de perdas é notável que o traço com mais perdas é o Traço 02 e o com menos perdas o Traço 03. Na Tabela 19 mostra qual foi a porcentagem de perda total do minuto 0 ao 60.

Tabela 19 - Projeção de abatimento com o tempo em %.

PROJEÇÃO DE ABATIMENTO DOS 0 AOS 60 MINUTOS EM PORCENTAGEM (%)	
Traço 01	66,80
Traço 02	100
Traço 03	30,08

Fonte: Autor (2025).

6.2 Resistência à compressão simples

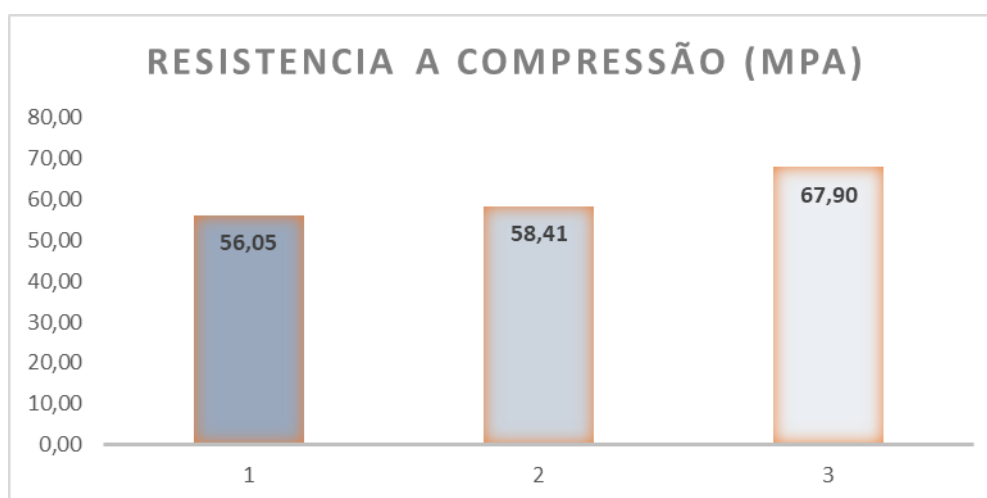
A resistência à compressão dos corpos de prova foi avaliada aos 7 dias de idade. Os valores médios obtidos, bem como os respectivos desvios absolutos, estão apresentados na Tabela 20 e Figura 19. A variação dos valores individuais permaneceu dentro do limite de 7%, conforme recomendado pela norma ABNT NBR 5739 (2018), evidenciando a homogeneidade do material empregado na confecção dos corpos de prova.

Tabela 20 - Resistência a compressão.

RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO		
Traço	Tensão (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
1	56,05	3,48
2	58,41	1,99
3	67,90	2,14

Fonte: Autor (2025).

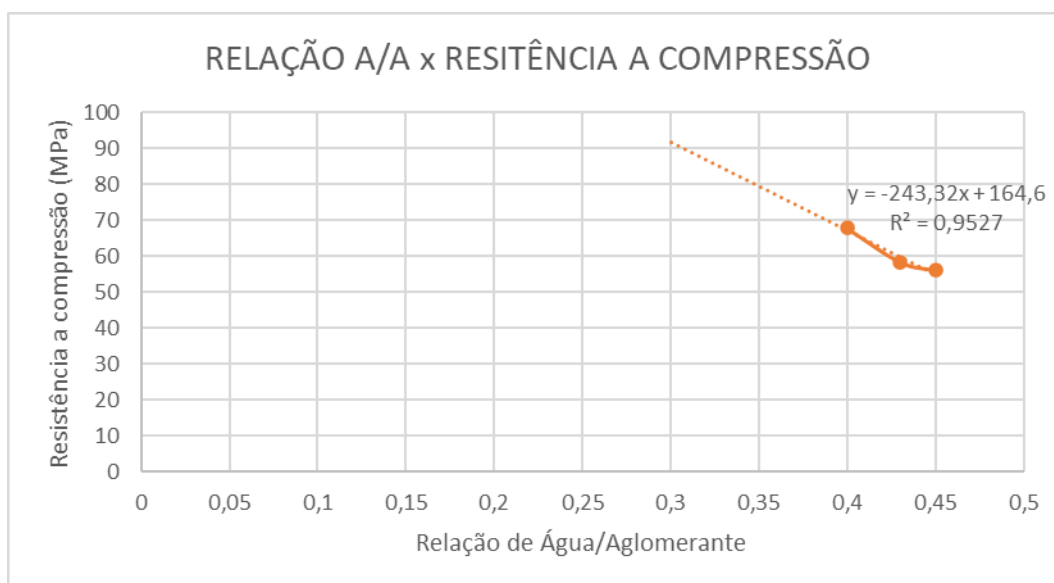
Figura 19 - Gráfico de resistência a compressão.



Fonte: Autor (2025).

Observou-se que as misturas com maiores relações água/aglomerante apresentaram valores de resistência inferiores, devido à maior porosidade destas misturas, o que corrobora a literatura existente, que aponta a influência direta da porosidade na capacidade de suportar cargas. A Figura 20 demonstra variação de resistência a compressão entre os traços de acordo com a relação água/aglomerante utilizada.

Figura 20 - Gráfico de relação Água/aglomerante x Resistência a Compressão.



Fonte: Autor (2025).

A partir do gráfico nota-se que quanto menor a relação de água/aglomerante maior é sua resistência. Estimando-se o valor da resistência para a relação água/aglomerante de 0,3, valor utilizado no traço de referência, chega-se a 91,60 MPa de acordo com Tabela 21.

Tabela 21 - Projeção de resistência a compressão.

PROJEÇÃO DE RESISTENCIA A COMPRESSÃO COM TEMPO				
RELAÇÃO A/A	0,4	0,38	0,35	0,3
RES. A COMPRESSÃO (MPa)	67,27	72,14	79,44	91,60

Fonte: Autor (2025).

Segundo Gonçalves, *et al.* (2024) a resistência a compressão média foi de 96,78 MPa, em comparação com os 91,60 MPa obtidos com este microconcreto de alto desempenho. Assim, nota-se que a substituição da sílica pelo metacaulim pode provocar uma redução na resistência a compressão.

7. CONCLUSÕES

Os ensaios realizados permitiram avaliar a influência de diversos fatores na trabalhabilidade do MCAD, destacando-se a relação água/aglomerante, o tipo e a granulometria dos agregados, além da dosagem de aditivos superplastificantes. Os resultados demonstraram que o Traço 03 apresentou o melhor desempenho, mantendo sua fluidez ao longo do tempo e apresentando a menor perda de abatimento. Por outro lado, o Traço 02 apresentou a maior perda de trabalhabilidade, chegando a um abatimento negativo em 60 minutos, indicando uma perda total de sua capacidade de moldagem.

A análise das equações de regressão demonstrou que as projeções da perda de abatimento ao longo do tempo apresentaram muita confiabilidade, com coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,90. Além disso, a relação água/aglomerante de 0,4 e a dosagem de superplastificante de 0,8% foram identificadas como parâmetros ideais para garantir a melhor trabalhabilidade do concreto estudado.

A avaliação da resistência à compressão aos 7 dias indicou que todas as amostras apresentaram variação dentro do limite normativo, garantindo a homogeneidade do material. Os resultados confirmaram a influência da relação água/aglomerante na resistência, onde menores relações resultaram em maior resistência devido à menor porosidade.

Comparando-se com a literatura, observou-se que a substituição da sílica ativa pelo metacaulim, obteve-se 91,60 MPa em relação aos 96,78 MPa reportados por Gonçalves et al. (2024). Esses achados reforçam a importância do controle da composição do microconcreto para otimização do desempenho mecânico.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2023.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7212: Execução de concreto dosado em central – Procedimento. Rio de Janeiro, 2012.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8953: Concreto para fins estruturais – Classificação por grupos de resistência. Rio de Janeiro, 2009.

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

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14931: Execução de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. BATS. NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12653: Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16916: Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11768: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2011.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16889: Concreto – Amostragem de concreto fresco. Rio de Janeiro, 2020.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

ACI – AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. High-Performance Concrete. ACI 363R-98, Farmington Hills, 1998.

AÏTCIN, Pierre-Claude. Concreto de alto desempenho. São Paulo: PHD Engenharia, 2014.

BARBOSA, A. L. F.; BRITO, J. D. Microconcreto de alto desempenho: desenvolvimento e aplicações em estruturas de concreto. Revista Brasileira de Materiais de Construção, v. 12, p. 45-55, 2012.

GOMES, L. F.; SILVA, E. M.; ALMEIDA, R. J. Estudo das propriedades do microconcreto de alto desempenho: resistência à compressão e trabalhabilidade. Boletim Técnico da Faculdade de Engenharia, v. 29, p. 230-240, 2018.

GONÇALVES, Elaine Cristina Zuquetti. MICROCONCRETO LEVE COM FIBRAS METÁLICAS: INFLUÊNCIA DE DIFERENTES TEORES DE FIBRAS. IF Goiano – Campus Rio Verde, 2018.

MATOS, P. R.; SAKATA, R. D.; PRUDÊNCIO JR, L. R. Eco-efficient low binder high-performance self-compacting concretes. *Construction and Building Materials*, v. 149, p. 567-583, 2017.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

NASCIMENTO, F. T. Concreto de alto desempenho e sua aplicação em estruturas pré-moldadas. 1997. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

NEVILLE, A. M. Propriedades do concreto. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

PINTO, A. F.; FERREIRA, L. S. Comportamento de concretos de alto desempenho: resistência e durabilidade. *Revista Brasileira de Engenharia Civil*, v. 13, n. 2, p. 120-130, 2008.

RIBEIRO, D. A., *et al.* Microconcreto e suas Aplicações em Revestimentos de Alto Desempenho. *Revista Brasileira de Engenharia de Materiais*, v. 24, n. 1, 2016.

SAHMARAN, M.; TANYILDIZI, H.; YILMAZ, K. Development of high-performance concrete with waste materials: recent advances. *Construction and Building Materials*, v. 21, p. 542-550, 2007.

SANTOS, Lara Barbosa De Souza. Análise custo-benefício entre concreto convencional e concreto de alto desempenho: estudo de caso de um edifício residencial. Revista Científica Semana Acadêmica, 2021.

SHEHAB EL-DIN, H. K.; EISA, A. S.; ABDEL AZIZ, B. H.; IBRAHIM, A. Mechanical performance of high strength concrete made from high volume of Metakaolin and hybrid fibers. Construction and Building Materials, v. 140, p. 203-209, 2017.

SILVA, I. S. Concreto de alta resistência: composição, propriedades e dimensionamento. 1995. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995.

SILVA, Márcio Dário da. Estudo comparativo entre a utilização dos concretos convencional e de alto desempenho em edifícios altos. 2004. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

SOUZA, A. F.; SILVA, F. M. Estudo da trabalhabilidade e resistência à compressão de microconcretos de alto desempenho. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, v. 43, n. 3, p. 211-220, 2016.

SOUZA, Bruna Cassiana; OTRE, Maria Alice Campagnoli. Análise comparativa com foco no custo/benefício entre concreto de alto desempenho (CAD) e concreto comum (CC). Revista FAIP, 2014.

ZANOTTI, C.; BORGES, P. H. R.; BHUTTA, A.; BANTHIA, N. Bond strength between concrete substrate and metakaolin geopolymer repair mortar: Effect of curing regime and PVA fiber reinforcement. Cement and Concrete Composites, v. 80, p. 307-316, 2017.

III. CONCLUSÃO GERAL

A revisão sistemática e os ensaios realizados evidenciaram lacunas para pesquisas futuras, além de um grande potencial do microconcreto para aplicações estruturais, destacando sua eficácia no reforço e reabilitação de edificações. A análise da literatura demonstrou que a formulação adequada do material é essencial para otimizar suas propriedades mecânicas e minimizar problemas como retração e fissuração. Além disso, a incorporação de materiais alternativos contribui para a sustentabilidade na construção civil sem comprometer a durabilidade.

Os ensaios laboratoriais confirmaram a influência direta da relação água/aglomerante e do uso de aditivos na trabalhabilidade e resistência do microconcreto de alto desempenho. O Traço 03 se destacou pela melhor fluidez ao longo do tempo, enquanto o Traço 02 apresentou perda total de trabalhabilidade. Já na resistência à compressão, observou-se que menores relações água/aglomerante resultaram em maior resistência, corroborando estudos anteriores.

Portanto, o microconcreto se mostra uma solução promissora para a engenharia civil, combinando alto desempenho, versatilidade e sustentabilidade. Pesquisas futuras devem explorar novas formulações e metodologias para aprimorar ainda mais suas propriedades e ampliar suas aplicações na construção civil.

IV. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS GERAIS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2023.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7212: Execução de concreto dosado em central – Procedimento. Rio de Janeiro, 2012.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8953: Concreto para fins estruturais – Classificação por grupos de resistência. Rio de Janeiro, 2009.

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

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14931: Execução de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. BATS. NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12653: Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16916: Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, 2021.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11768: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2011.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16889: Concreto – Amostragem de concreto fresco. Rio de Janeiro, 2020.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2018.

ACI – AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. High-Performance Concrete. ACI 363R-98, Farmington Hills, 1998.

AÏTCIN, Pierre-Claude. Concreto de alto desempenho. São Paulo: PHD Engenharia, 2014.

BARBOSA, A. L. F.; BRITO, J. D. Microconcreto de alto desempenho: desenvolvimento e aplicações em estruturas de concreto. Revista Brasileira de Materiais de Construção, v. 12, p. 45-55, 2012.

BESSA, Sofia Araújo Lima *et al.* Production and evaluation of microconcretes with iron ore tailings to produce construction componentes. Revista Matéria, Vol 22, Num 22, December 2023. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620220002.1375>.

ELHEM, Ghorbel; MURHAF, Haidar. Durability to Chemical Attack by Acids of Epoxy Microconcretes by Comparison to Cementitious Ones. Hindawi Limited, (2016) *Advances in Civil Engineering*, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/4728372>.

ETLI, ETILI S. Effect of glass sand used as aggregate on micro-concrete Properties. *GRAĐEVINAR*, 75 (2023) 1, pp. 39-51. <https://doi.org/10.14256/JCE.3538.2022>.

GARCIA, David; VEGAS, Iñigo J; CACHO, Íñigo. Mechanical recycling of GFRP waste as short-fiber reinforcements in microconcrete. *Construction and Building Materials*, Volume 64, 2014, P 293-300. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.068>.

GOMES, L. F.; SILVA, E. M.; ALMEIDA, R. J. Estudo das propriedades do microconcreto de alto desempenho: resistência à compressão e trabalhabilidade. *Boletim Técnico da Faculdade de Engenharia*, v. 29, p. 230-240, 2018.

GONÇALVES, Elaine Cristina Zuquetti. MICROCONCRETO LEVE COM FIBRAS METÁLICAS: INFLUÊNCIA DE DIFERENTES TEORES DE FIBRAS. IF Goiano – Campus Rio Verde, 2018.

KELM, S.; SCHAUER, R.; Sialic acids in molecular and cellular interactions. *Int Rev Cytol.*;v. 175 p.137-240. 1997;

LI, Yang *et al.* Functional micro-concrete 3D hybrid structures fabricated by two-photon polymerization. *Opto-Electronic Engineering*, 2017, 44(4): 393-399. 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.04.002.

LORCA, Pedro *et al.* Microconcrete with partial replacement of Portland cement by fly ash and hydrated lime addition. *Microconcrete with partial replacement of Portland cement by fly*

ash and hydrated lime addition. *Materials & Design*, Volume 64, 2014, P 535-541. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.08.022>.

MACHADO, Michelle; BACARJI, Edgar; CARASEK, Helena. Self-compacting micro concrete in structural strengthening: application as a bond bridge. *Revista Matéria*, Vol 22, Num 22, Abril 2023. <https://doi.org/10.1590/1517-7076-RMAT-2023-0007>.

MARTHONG, Comingstarful *et al.* Structural Behavior of Recycled Aggregate Concrete Beam-Column Connection in Presence of Micro Concrete at Joint Region. *Structures*, Volume 11, 2017, Pages 243-251. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2017.07.001>.

MATOS, P. R.; SAKATA, R. D.; PRUDÊNCIO JR, L. R. Eco-efficient low binder high-performance self-compacting concretes. *Construction and Building Materials*, v. 149, p. 567-583, 2017.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008/2014.

NASCIMENTO, F. T. *Concreto de alto desempenho e sua aplicação em estruturas pré-moldadas*. 1997. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

NAYAK, Dipti Ranjan; PATTNAIK, Rashmi R.; PANDA, Bikash Chandra. Study on relative shrinkage of cement-based micro-concrete for durable concrete repair. *Cleaner Engineering and Technology*, Volume 8, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100444>.

NEVILLE, A. M. *Propriedades do concreto*. 5.ed. São Paulo: Editora Bookman, 2016;

PATEL, Mitali *et al.* SHEAR STRENGTHENING OF RC BEAM USING FERRO-CEMENT & MICRO-CONCRETE. International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET) Volume 8, Issue 5, May 2017, pp.881–894. <http://iaeme.com/Home/issue/IJCIET?Volume=8&Issue=5>.

PINTO, A. F.; FERREIRA, L. S. Comportamento de concretos de alto desempenho: resistência e durabilidade. Revista Brasileira de Engenharia Civil, v. 13, n. 2, p. 120-130, 2008.

RAVAL, Sachin S; DAVE, Urmil V. Effectiveness of Various Methods of Jacketing for RC Beams. Procedia Engineering, Volume 51, 2013, P 230-239. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.01.032>.

RIBEIRO, D. A., *et al.* Microconcreto e suas Aplicações em Revestimentos de Alto Desempenho. Revista Brasileira de Engenharia de Materiais, v. 24, n. 1, 2016.

SAHMARAN, M.; TANYILDIZI, H.; YILMAZ, K. Development of high-performance concrete with waste materials: recent advances. Construction and Building Materials, v. 21, p. 542-550, 2007.

SANTOS, Lara Barbosa De Souza. Análise custo-benefício entre concreto convencional e concreto de alto desempenho: estudo de caso de um edifício residencial. Revista Científica Semana Acadêmica, 2021.

SHEHAB EL-DIN, H. K.; EISA, A. S.; ABDEL AZIZ, B. H.; IBRAHIM, A. Mechanical performance of high strength concrete made from high volume of Metakaolin and hybrid fibers. Construction and Building Materials, v. 140, p. 203-209, 2017.

SILVA, Augusto Costa et al. Microconcrete of high performance: properties and behavior under combined compression and one-axis bending. *Revista Matéria*, Vol 23, Num 03, Março 2018. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620180003.0495>.

SILVA, I. S. Concreto de alta resistência: composição, propriedades e dimensionamento. 1995. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995.

SILVA, Márcio Dário da. Estudo comparativo entre a utilização dos concretos convencional e de alto desempenho em edifícios altos. 2004. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

SOUZA, A. F.; SILVA, F. M. Estudo da trabalhabilidade e resistência à compressão de microconcretos de alto desempenho. *Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP*, v. 43, n. 3, p. 211-220, 2016.

SOUZA, Bruna Cassiana; OTRE, Maria Alice Campagnoli. Análise comparativa com foco no custo/benefício entre concreto de alto desempenho (CAD) e concreto comum (CC). *Revista FAIP*, 2014.

SOKOLOVICZ, Bóris Casanova. Microestrutura e Durabilidade a Cloretos de Protótipos de Concreto com Cinza de Casca de Arroz com e sem a Moagem Prévia. 2013. 165 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de PósGraduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

THOMAS, Thomas C *et al.* Effect of high temperature and accelerated aging in high density micro-concrete. *Construction and Building Materials*, 2021, p. 272. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121920>.

TOPÇU, İ, B; ATESIN, O. Effect of high dosage lignosulphonate and naphthalene sulphonate based plasticizer usage on micro concrete Properties. Construction and Building Materials, Volume 120, 2016, P 189-197. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.112>.

YIN, Jijing *et al.* Seismic Risk Assessment and Rehabilitation Method of Existing RCC Structures Using Micro Concrete. Civil Engineering Journal, Vol. 9, No. 12, dezembro, 2023. <http://dx.doi.org/10.28991/CEJ-2023-09-12-04>.

ZANOTTI, C.; BORGES, P. H. R.; BHUTTA, A.; BANTHIA, N. Bond strength between concrete substrate and metakaolin geopolymer repair mortar: Effect of curing regime and PVA fiber reinforcement. Cement and Concrete Composites, v. 80, p. 307-316, 2017.