

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CAMPUS GOIÂNIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

FELIPE AUGUSTO ABDALLA SANTOS

**ESTUDO DA TRABALHABILIDADE E RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO DE
PASTAS DE BAIXO CARBONO.**

Goiânia, GO
2025



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Felipe Augusto Abdalla Santos

Matrícula: 20192011050125

Título do Trabalho: Estudo da trabalhabilidade e resistência à compressão de pastas de baixo carbono.

Autorização - Marque uma das opções

1. ☒ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. ☐ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. ☐ Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- ☐ O documento está sujeito a registro de patente.
☐ O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
☐ Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. 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;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás 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;
- iii. 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 de Goiás.

Goiânia, 15 de abril de 2025.

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

FELIPE AUGUSTO ABDALLA SANTOS

**ESTUDO DA TRABALHABILIDADE E RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO DE
PASTAS DE BAIXO CARBONO.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação de Engenharia Civil, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Campus Goiânia, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil

Orientador: Dr. Marcus Vinícius Araújo da Silva Mendes

Goiânia, GO

2025

S237e Santos, Felipe Augusto Abdalla.

Estudo da trabalhabilidade e resistência a compressão de pastas de baixo carbono / Felipe Augusto Abdalla Santos. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2025.
63f.

Orientação: Dr. Marcus Vinicius Araújo da Silva Mendes.

TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) – Curso de Bacharelado de Engenharia Civil, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

1. Cimento. 2. Construção civil. I. Mendes, Marcus Vinicius Araújo da Silva (orientação). II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. III. Título.

CDD 691.3

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Lana Cristina Dias Oliveira CRB1/ 2.631
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS GOIÂNIA

Felipe Augusto Abdalla Santos

Estudo da Trabalhabilidade e Resistência à Compressão de pastas com misturas cimentícias de baixo carbono

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Campus Goiânia, como parte dos quesitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Membros da banca: Dr. Marcus Vinícius Araújo da Silva Mendes (orientador), Me. Matilde Batista Melo, Me. Sandra Kurotusch de Melo.

Aprovado em 21 de Março de 2025.

Documento assinado eletronicamente por:

- Sandra Kurotusch de Melo, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 25/03/2025 11:05:07.
- Marcus Vinicius Araujo da Silva Mendes, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 25/03/2025 07:50:54.
- Matilde Batista Melo, COORDENADOR(A) DE CURSO - FUC0001 - GYN-CCBEC, em 25/03/2025 07:31:32.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 25/03/2025. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 631205
Código de Autenticação: d83ca3e882



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Rua 75, nº 46, Centro, GOIÂNIA / GO, CEP 74055-110
(62) 3227-2736 (ramal: 2736)

RESUMO

Este trabalho insere-se na linha de pesquisa “Tecnologia, Processos, Componentes e Materiais de Construção”, pertencente à área de concentração em Construção Civil, e tem como objetivo investigar a trabalhabilidade, a fluidez e a resistência à compressão de pastas cimentícias de baixo carbono, com foco na análise de seus comportamentos físicos. A produção do Cimento Portland exige elevado consumo de energia térmica, o que resulta em significativa emissão de gases de efeito estufa (GEE), especialmente dióxido de carbono (CO_2). Estima-se que a indústria cimenteira seja responsável por cerca de 5% das emissões globais desses gases. Visando a mitigação desses impactos, uma das estratégias consiste na redução do teor de clínquer – principal responsável pela emissão de CO_2 – por meio da incorporação de materiais alternativos. Entre esses, destacam-se os materiais pozolânicos, que, devido às suas propriedades físicas e químicas, podem contribuir positivamente para a resistência mecânica, a trabalhabilidade e a reologia das pastas. A partir de revisão teórica e experimentações práticas, este estudo busca o desenvolvimento de um cimento de baixo carbono que mantenha suas propriedades físicas, ao mesmo tempo em que reduz a dependência do clínquer no processo produtivo. Especificamente, o trabalho tem como objetivos validar a capacidade dos estudos de trabalhabilidade em pastas de cimento para identificar prováveis composições de referência na produção de pastas de baixo carbono; avaliar o comportamento da substituição do clínquer por materiais pozolânicos em relação à trabalhabilidade, fluidez e resistência à compressão; e, por fim, caracterizar e realizar uma análise sucinta das propriedades físicas das pastas formuladas.

ABSTRACT

STUDY OF THE WORKABILITY, FLUIDITY AND COMPRESSION RESISTANCE OF SUSTAINABLE LOW CARBON PULP

This study is part of the research line “Technology, Processes, Components, and Construction Materials,” within the area of concentration in Civil Construction, and aims to investigate the workability, flowability, and compressive strength of low-carbon cement pastes, focusing on the analysis of their physical behavior. The production of Portland cement requires high thermal energy consumption, which results in significant emissions of greenhouse gases (GHGs), especially carbon dioxide (CO₂). It is estimated that the cement industry is responsible for approximately 5% of global GHG emissions. To mitigate these impacts, one of the strategies involves reducing the clinker content—identified as the main source of CO₂ emissions—by incorporating alternative materials. Among these, pozzolanic materials stand out due to their physical and chemical properties, which can positively influence mechanical strength, workability, and rheology of the pastes. Based on theoretical reviews and practical testing, this study aims to develop a low-carbon cement that preserves its physical properties while reducing reliance on clinker in the production process. Specifically, the objectives of this work are to validate the capacity of workability studies in cement pastes to identify potential reference compositions for low-carbon paste production; to evaluate the effects of clinker replacement with pozzolanic materials in terms of workability, flowability, and compressive strength; and, finally, to characterize and briefly analyze the physical properties of the formulated pastes.

SUMÁRIO

1- Introdução	9
2- justificativa	10
3- objetivos	11
3.1- Objetivos geral	11
3.2- Objetivo específico	11
4- Revisão bibliográfica	12
4.1- cimento portland	12
4.2- Clínquer	13
4.3- Pozolana	14
4.3.1 - METACAULIM	15
4.3.2- sílica ativa	16
4.4- filler calcário	16
4.5- Cimento de baixo carbono	17
5- PROGRAMA EXPERIMENTAL	18
5.1 - ETAPAS DO PROGRAMA EXPERIMENTAL	18
5.2- MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA trabalhabilidade e fluidez de pastas de cimento	19
5.1.1 - mini-slump	20
5.1.2 - funil V	21
5.1.3 – prensa hidráulica	21
5.3 - Procedimentos	23
5.5 – MATERIAIS UTILIZADOS	25
6.1 – estado fresco	27
6.1.1 – Espalhamento	27
6.1.2 – Fluidez	30
6.2 – estado endurecido	32
6.2.1 – Resistência a compressão	32
7- CONCLUSÃO	38
8- Referências bibliográficas	40

1- INTRODUÇÃO

O cimento é um dos materiais mais utilizados no mundo, porém sua produção tem um impacto ambiental significativo, especialmente devido às emissões de gases de efeito estufa (GEE), com destaque para o dióxido de carbono, que representa grande parte dessas emissões. Em nível mundial, a indústria cimenteira é responsável por aproximadamente 5% do total das emissões antrópicas de carbono (WBCSD, 2010).

De acordo com a NBR 5732-2018, o cimento Portland é um aglomerante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland, à qual se adiciona, durante o processo, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio. Além disso, durante a moagem, é permitida a incorporação de materiais pozolânicos, escórias granuladas de alto-forno e/ou materiais carbonáticos.

O processo produtivo do cimento é altamente intensivo em energia, com destaque para o consumo de energia térmica na produção do clínquer, o que contribui significativamente para a emissão de CO₂. Como alternativa sustentável para mitigar esse impacto, a redução da quantidade de clínquer no cimento, aliada à adição de materiais suplementares, tem se mostrado uma estratégia viável.

O uso de cimentos de baixo carbono possibilita a redução das emissões de GEE por meio da incorporação de adições pozolânicas, como cinza volante, sílica ativa e metacaulim. Esses materiais podem influenciar diversas propriedades do cimento, incluindo resistência à compressão, trabalhabilidade e fluidez. Assim, a substituição parcial do clínquer por esses compostos não apenas contribui para a sustentabilidade ambiental, mas também permite otimizar o desempenho do cimento, tornando-o mais eficiente e menos impactante para o meio ambiente.

2- JUSTIFICATIVA

O conceito de construção sustentável já não é apenas uma teoria, mas uma necessidade diante do aumento das temperaturas globais. Diante desse cenário, é urgente tomar medidas para reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE), especialmente no setor da construção civil, com destaque para a indústria cimenteira, que possui uma significativa participação na geração desses gases. Assim, é fundamental que esse setor adote estratégias eficazes para mitigar seu impacto ambiental e contribuir para a sustentabilidade.

Uma das alternativas para reduzir as emissões de GEE na produção de cimento é a adição de compostos alternativos, materiais que, em sua maioria, possuem origem natural ou demandam menor consumo de energia em sua produção. Essa abordagem é conhecida como cimento de baixo carbono.

Como grande parte das emissões da indústria cimenteira provém do processo químico de descarbonatação do calcário, sendo inerentes à sua composição química, as estratégias de mitigação de GEE têm se concentrado na redução das emissões associadas à queima de combustíveis fósseis nos fornos e na substituição parcial do clínquer por materiais pozolânicos. Nesse contexto, o presente estudo propõe a adoção de estratégias que visam à redução do teor de clínquer no cimento, promovendo uma alternativa mais sustentável para a construção civil.

3- OBJETIVOS

Os objetivos traçados para o alcance dos resultados deste trabalho, divididos em objetivo geral e objetivos específicos.

3.1- OBJETIVOS GERAL

Este trabalho tem como objetivo apresentar a possibilidade de redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) por meio do uso de cimento de baixo carbono, com a aplicação de pastas cimentícias sustentáveis. Para isso, investiga-se a relação entre diferentes adições de materiais pozolânicos em pastas de cimento convencional, visando a formulação de uma pasta de baixo carbono que contribua para a mitigação dos impactos ambientais da indústria cimenteira.

3.2- OBJETIVO ESPECIFICO

O objetivo específico é apresentado listado a baixo:

- Avaliar estudos de trabalhabilidade e resistência à compressão em pasta de cimento para produção de pasta de baixo carbono;
- Avaliar o comportamento da substituição de clínquer por materiais pozolânico.
 - Quanto à trabalhabilidade;
 - Quanto à fluidez;
 - Quanto à resistência a compressão.
- Caracterizar e efetuar uma sucinta análise sobre as propriedades físicas das pastas.

4- REVISÃO BIBLIOGRAFICA

4.1- CIMENTO PORTLAND

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), o cimento é um material pulverulento com propriedades aglomerantes que, ao ser misturado com água, forma uma pasta capaz de endurecer e adquirir resistência ao longo do tempo (ABCP, 2021). Na forma de concreto, transforma-se em uma pedra artificial, permitindo a moldagem em diferentes formatos e volumes conforme as necessidades da construção.

O cimento Portland pode ser definido como um aglomerante hidráulico, composto por clínquer Portland, gesso e adições normalizadas, todos finamente moídos (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT, 2018). Ele recebe a denominação de aglomerante devido à sua capacidade de unir outros materiais e hidráulico porque reage quimicamente (hidrata) em contato com a água, tornando-se um material resistente e durável. Após o endurecimento, o cimento mantém suas propriedades mecânicas mesmo quando submerso por cerca de sete dias, período essencial para sua cura e ganho de resistência (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

No Brasil, a indústria cimenteira produz oito tipos principais de cimento Portland, diferenciados pela proporção de clínquer, sulfato de cálcio, materiais carbonáticos e adições, como pozolanas, calcário e escórias de alto-forno (SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO – SNIC, 2020). Além dessas variações na composição, alguns cimentos possuem características específicas, como coloração branca e alta resistência inicial, adaptando-se a diferentes aplicações na construção civil. A classificação detalhada dos tipos de cimento Portland está apresentada na tabela a seguir.

Tabela 1 - Principais tipos de cimento produzido no Brasil

Tipo		Clínquer (%)	Escórias de Alto-forno (%)	Material Pozolânico (%)	Material Carbonário (%)
CP I	CP I	100	-	-	-
	CP I - S	95 a 99	-	1 a 5	-
CP II	CP II - E	56 a 94	6 a 34	-	0 a 10
	CP II - Z	76 a 94	-	6 a 14	0 a 10
	CP II - F	90 a 94	-	-	0 a 10
CP III	CP III	25 a 65	35 a 70	-	0 a 5
CP IV	CP IV	45 a 85	-	15 a 50	0 a 5
CP V	CP V	95 a 100	-	-	0 a 5

Tabela 1 – Fonte ABCP

A substituição de clínquer por adições diversifica as aplicações e características específicas do cimento, além de propiciar a redução das emissões de CO₂, uma vez que diminui a produção de clínquer e, portanto, reduz a queima de combustíveis e a emissão por calcinação (RATHMANN, 2017).

4.2- CLÍNQUER

O clínquer é um material resultante da transformação térmica da farinha crua, composta principalmente por argila e calcário. Durante o processo de produção, essa mistura é submetida a altas temperaturas em fornos rotativos, onde sofre reações químicas e fusão parcial, formando um material rígido e granular, essencial para a fabricação do cimento Portland.

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland.

O clínquer tem como matérias-primas o calcário e a argila, ambos obtidos de jazidas em geral situadas nas proximidades das fábricas de cimento. A rocha calcária é primeiramente britada, depois moída e em seguida misturada, em proporções adequadas, com argila moída. A mistura formada atravessa então um forno giratório de grande diâmetro e comprimento, cuja temperatura interna chega a alcançar 1450oC. O intenso calor transforma a mistura em um novo material, denominado clínquer, que se apresenta sob a forma de pelotas. Na saída do forno o clínquer, ainda incandescente, é bruscamente resfriado para posteriormente ser finamente moído, transformando-se em pó. O clínquer em pó tem a peculiaridade de desenvolver uma reação química em presença de água, na qual ele, primeiramente, torna-se pastoso e, em seguida, endurece, adquirindo elevada resistência e durabilidade. Essa característica adquirida pelo clínquer, que faz dele um ligante hidráulico muito resistente, é sua propriedade mais importante.

Esse material passa por uma moagem, nesse momento é adicionado algumas adições como exemplo gesso, pozolana, sílica entre outras adições, com isso torna-se o cimento.

4.3- POZOLANA

Os materiais pozolânicos são substâncias naturais ou produtos derivados de processos industriais, como rochas vulcânicas, matérias orgânicas fossilizadas, certos tipos de argilas queimadas a altas temperaturas (entre 550°C e 900°C), e resíduos provenientes da queima de carvão mineral nas usinas termelétricas, entre outros. Esses materiais possuem a capacidade de reagir com a cal (óxido de cálcio) na presença de água, formando compostos de características semelhantes ao cimento, o que os torna valiosos como adições no cimento para melhorar propriedades como resistência e durabilidade.

Segundo ALMEIDA 2017,

A pozolana em conjunto com o cimento Portland através da reação pozolânica com o hidróxido de cálcio forma produtos cimentante adicional (Silicato de cálcio hidratado - C-S-H), permitindo gerar matrizes mais duráveis. As pozolanas podem ser empregadas de duas formas: substituição parcial do cimento ou como uma adição, que vai depender da finalidade desejada. As pozolanas são enquadradas como um dos tipos de adições minerais, que são as superpozolanas, pozolanas comuns e pozolanas pouco reativas, que por si só ela não tem poder cimentício. Tanto o uso de pozolanas e/ou material cimentício há uma enorme contribuição para o meio ambiente

A tabela 2 apresenta algumas adições de materiais pozolânicos. As classificações pozolânicas são identificadas nas classificações das adições minerais que são rotineiramente utilizadas em concretos exposta por MEHTA & MONTEIRO (2008) apud ISAIA (2011),

Tabela 2 - Classificação das adições minerais para cimento

Classificação	Tipo de Adições
Cimentantes e pozolânicas	Cinzas volantes com alto teor de cálcio
Superpozolanas	Sílica ativa
	Metacaulim
	Cinzas de casca de arroz (predominantemente amorfa)
Pozolanas comuns	Cinzas volantes com baixo teor de cálcio
	Argilas Calcinadas
	Materiais naturais (origem vulcânica e sedimentar)
Pozolanas pouco reativas	Escória de alto-forno resfriada lentamente
	Cinzas de forno
	Escória de caldeira
	Palha de Arroz queimada em campo

Fonte: (MEHTA & MONTEIRO, 2008)

4.3.1 - METACAILIM

A NBR 15894, (2010) define Metacaulim como um produto de calcinação e moagem de argilominerais cauliniticos. Constitui um tipo de pozolana formada essencialmente por partículas lamelares com estruturas predominantemente não cristalina.

Ainda em anexo da NBR 15894,

O Metacaulim também acelera o processo de hidratação do cimento Portland, atua como filler e reage com o Ca(OH)_2 proveniente da hidratação do cimento Portland, formando silicato de cálcio hidratado (C-S-H) adicional. Essas contribuições conferem aos compósitos concreto, argamassa e pasta propriedades especiais relacionadas à durabilidade e ao desempenho mecânico, quando comparadas às propriedades desses compósitos sem a sua presença, tais como:

- Aumento da resistência à compressão e à flexão;
- Redução da porosidade e permeabilidade;
- Aumento da resistência a sulfatos;
- Resistência à difusibilidade de íons cloreto;
- Mitigação da reação álcali-agregado;
- Redução da ocorrência de eflorescência;
- Aumento da resistividade elétrica.

Perim (2013), cita que a produção do metacaulim de alta reatividade pode apresentar problemas devido ao tratamento térmico e ao processo de moagem, haja

vista que geralmente este material tende a apresentar características variadas decorrentes da natureza e da finura da argila empregada.

4.3.2- SILICA ATIVA

A sílica ativa pode ser definida como um pó muito fino e pulverizado através da metodologia de fabricação do silício metálico ou ferro silício decorrente de processos metalúrgicos, uma das propriedades é alta uniformidade em decorrência do processo de produção estável tanto em relação à composição química quanto propriedades físicas.

De acordo com HOFFMANN (2001),

A sílica ativa é considerado um subproduto industrial da produção de silício metálico, ligas de ferro-silício ou outros produtos silicosos a partir do quartzo de elevada pureza e carvão em fornos elétricos à arco, a temperaturas da ordem de 2000° C, a sílica ativa vem sendo utilizada no concreto como adição pozolânica em razão de se produzir concretos com propriedades bastante melhoradas, principalmente resistências elevadas e baixa permeabilidade (MAAGE & SALLEVOLD, 1987; MALHOTRA, 1993; MEHTA & MONTEIRO, 1994; NEVILLE, 1997; VIEIRA et al., 1997; AİTCIN, 2000).

Algumas propriedades podem ser avaliadas quando adicionada no cimento, dentro delas redução de permeabilidade do concreto, aumento na durabilidade do concreto, maior resistência e desempenho, melhora na trabalhabilidade, além de ser uma adição que possa reduzir a quantidade de clínquer no cimento reduzido a quantidade de gás efeito estufa.

4.4- FILLER CALCÁRIO

O filler calcário é um material fino, predominantemente composto por carbonato de cálcio (CaCO_3), obtido por meio da moagem do calcário. Ele é amplamente utilizado na indústria do cimento como aditivo, com o objetivo de melhorar propriedades do concreto, como trabalhabilidade, durabilidade e resistência. Além disso, o uso de filler calcário contribui para a redução da quantidade de clínquer no cimento, o que ajuda a diminuir as emissões de dióxido de carbono (CO_2) geradas durante o processo de produção do cimento, uma vez que o clínquer é responsável por grande parte dessas emissões (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Embora o filler calcário não participe diretamente das reações químicas de hidratação do cimento, ele atua como um material inerte que pode influenciar

positivamente o processo de hidratação. Esse efeito pode melhorar diversas propriedades do concreto, incluindo resistência a longo prazo e redução da retração, contribuindo para a sua estabilidade e durabilidade (SOUZA et al., 2020). Dessa forma, o uso de filler calcário não apenas melhora o desempenho do concreto, mas também representa uma estratégia importante para tornar a indústria cimenteira mais sustentável, ao permitir a produção de cimentos com menor impacto ambiental, sem comprometer suas características técnicas (SANTOS; LIMA, 2018).

4.5- CIMENTO DE BAIXO CARBONO

O processo de fabricação de cimento requer um elevado consumo de energia, tanto na forma de energia térmica (calor), utilizada nos fornos, quanto de energia elétrica, que alimenta os equipamentos da fábrica. A maior parte dessa energia é térmica, consumida durante a queima da farinha crua para a produção do clínquer. Os combustíveis empregados nesse processo geralmente são de origem não renovável, como madeira, carvão, petróleo e seus derivados, como coque de petróleo, gasolina e gás natural.

O cimento de baixo carbono visa reduzir a emissão de gases de efeito estufa, em especial o dióxido de carbono (CO_2), contribuindo para a diminuição do impacto ambiental causado pela indústria cimentícia. A fabricação de cimento tem uma grande responsabilidade nas emissões de CO_2 , sendo um processo altamente energointensivo. Como destaca Rathmann (2017), a produção de cimento resulta em emissões de dióxido de carbono não apenas devido ao consumo de combustíveis, mas também pelo processo de calcinação do calcário. Dessa forma, a aplicação de medidas de eficiência energética é fundamental para reduzir essas emissões e minimizar os impactos ambientais.

A produção do clínquer, componente essencial do cimento, exige o uso de energia térmica, e muitas vezes recorre à combustão de materiais não renováveis. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2022), a produção de cimento puro ocupa a sétima posição entre as indústrias que mais emitem gases de efeito estufa no Brasil.

Tabela 3 – Participação Energética no setor industrial

Fonte	Participação (%)											
	1970	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020	2022
Carvão Mineral	-	-	9,1	47,8	25,7	17,2	5,5	1,6	1,2	1,5	1,4	1,4
Óleo Combustível	91,3	90,5	74,2	4,1	43,3	53,9	15,2	0,8	0,2	0,2	0,3	0,3
Eletricidade	6,9	8,2	10	10,1	11,1	11,9	11,4	12	13	12,9	13,1	13,2
Carvão Vegetal	-	-	3,8	34,6	15,4	12	6,9	8,7	1,5	2,3	2,5	2,6
Coque de Petróleo	-	-	-	-	0,2	1,1	54,9	65,5	74,3	71,4	70,8	71
Outras	1,8	1,3	2,9	3,4	4,3	3,9	6,1	11,4	9,8	11,7	11,9	11,5
	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Fonte: Empresa de Pesquisa Energética EPE.

5- PROGRAMA EXPERIMENTAL

A estrutura do programa experimental, os materiais empregados, as técnicas adotadas e os procedimentos experimentais que fundamentaram a condução desta pesquisa. Inicialmente, será exposta a organização geral do experimento, destacando seus principais componentes e a metodologia empregada para garantir a confiabilidade e a precisão dos resultados. Em seguida, serão descritos minuciosamente os materiais utilizados, incluindo suas especificações técnicas e as justificativas para sua escolha. Além disso, serão abordadas as técnicas experimentais aplicadas, enfatizando sua importância para a obtenção de dados rigorosos e reprodutíveis. Por fim, os procedimentos experimentais serão apresentados de forma sequencial e sistemática, assegurando clareza e viabilidade para futuras replicações do estudo.

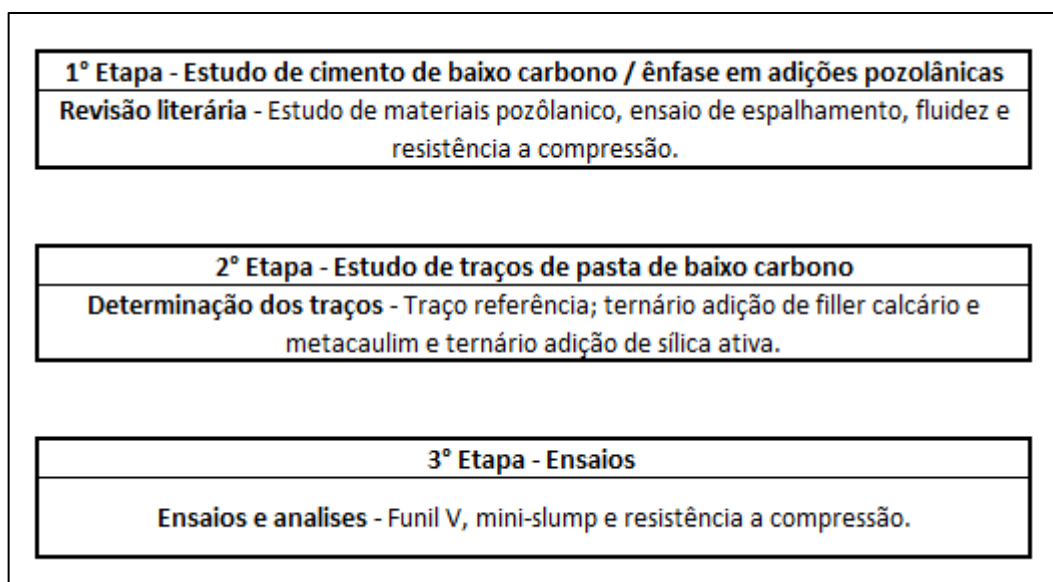
5.1 - ETAPAS DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

A primeira etapa é estudar a influência de diferentes tipos de adições pozolânicas com ênfase na trabalhabilidade das pastas de baixo carbono, a fim de identificar os principais compostos pozolânicos, ensaios de fluidez e ensaio de espalhamento a ser aplicado nos experimentos.

Na segunda etapa, já com as adições definidas na etapa anterior, deve estabelecer a quantidade de adição que será utilizada na terceira etapa, além de definir a pasta padrão.

Por fim na terceira etapa onde todos os traços foram definidos, são realizados os ensaios em pasta fresca, ensaio de espalhamento e fluidez. Na Figura 3, representa o fluxograma do programa experimental das pastas de baixo carbono.

Figura 04 – Fluxograma das atividades a ser realizadas



Fonte: Próprio autor

5.2- MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA TRABALHABILIDADE E FLUIDEZ DE PASTAS DE CIMENTO

A trabalhabilidade e fluidez são propriedades das argamassas no estado fresco, que determinam a facilidade com que elas podem ser misturadas, transportadas, aplicadas, consolidadas e acabadas, mantendo-se em uma condição homogênea (MORAES, 2019). Os experimentos serão realizados utilizando dois aparatos que permitem avaliar a trabalhabilidade e os aspectos reológicos das pastas de cimento de baixo carbono: o mini funil em V e o mini cone (teste de abatimento).

O teste de compressão de concreto é um dos ensaios mais importantes para avaliar a resistência da pasta, determinando sua capacidade de suportar cargas compressivas sem falhar. Esse teste é realizado em amostras de concreto curadas, geralmente na forma de cubos ou cilindros, que são preparadas e curadas em condições controladas.

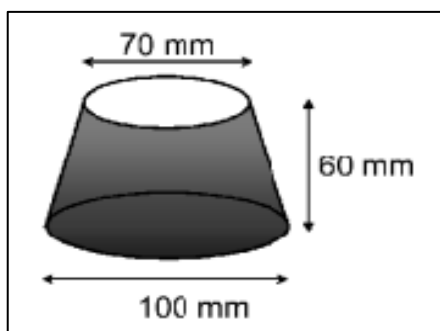
Para a realização dos testes, será preparada uma pasta padrão composta por cimento, água e aditivo. A relação água/cimento será mantida constante, enquanto os níveis de cimento, sílica ativa, metacaulim, filler calcário e aditivo serão ajustados. O cimento será variável, conforme as adições dos materiais, como metacaulim, sílica ativa e filler calcário.

Os ensaios serão realizados com pastas em estado fresco para selecionar materiais e identificar proporções adequadas de materiais para produção de argamassas e concretos. A seguir, os principais métodos de ensaio para avaliação da trabalhabilidade de argamassas com aparatos de ensaio conforme Okamura e Ouchi (2003). Para determinar a trabalhabilidade das pastas serão utilizados dois aparatos, mini funil e mini cone. Esse ensaio é muito utilizado para estabelecer novos traços de argamassas e concretos, com intuito de verificar a a relação entre cimento, aditivos e adições (JACOBS, 1999; GOMES, 2002; LACHEMI et al., 2007; LIU, 2009; FUNG, 2010; MADDURU et al., 2016).

5.1.1 - MINI-SLUMP

O mini-slump é um equipamento para avaliar a comportamento reológico das pastas em estudos. Mendes (2016) ressalta que consiste em um método para avaliação da capacidade de preenchimento e fluidez do concreto autoadensável. Nesse método, são determinados dois parâmetros de avaliação: o espalhamento. O mini-slump, ensaio já amplamente consolidado na caracterização de pastas à base de cimento Portland, apresenta-se como uma interessante solução, visto que além avaliar de forma simples e econômica a trabalhabilidade, através da medição do espalhamento da pasta, também pode ser correlacionada com propriedades reológicas, como a tensão de escoamento.

Figura 05 – Mini cone



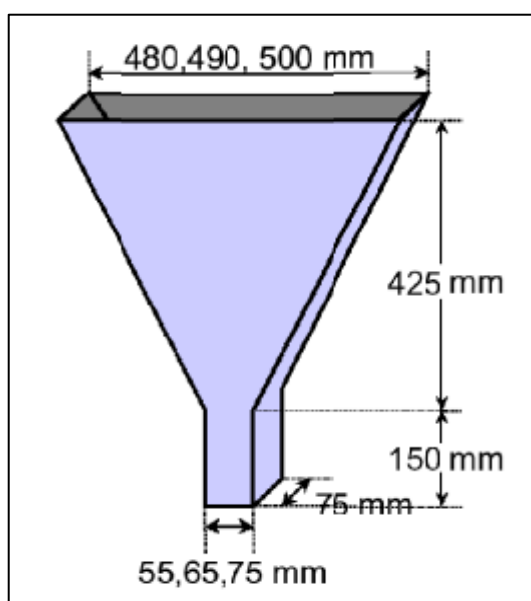
Fonte: Okamura e Ouchi (2003).

5.1.2 - FUNIL V

O funil V é um aparato para determinação da viscosidade do CAA pela medida de tempo do escoamento de uma pasta através do funil “V”. Dotado de comporta com gatilho conforme norma: NBR 15823. GOMES; BARROS, (2009), avalia a habilidade passante e viscosidade plástica aparente do CAA por meio do estreitamento de uma seção, apenas sob a ação de seu próprio peso.

A ABNT NBR 15823:2010 estabelece os critérios e métodos de ensaio para avaliar as propriedades do concreto autoadensável (CAA) no estado fresco. O CAA é um tipo de concreto de alta fluidez que se espalha e preenche formas sem a necessidade de vibração mecânica, garantindo melhor qualidade e produtividade na construção civil.

Figura 06 – Mini funil



Fonte: Okamura e Ouchi (2003).

5.1.3 – PRENSA HIDRÁULICA

O teste de compressão é um dos ensaios mais utilizados para avaliar a resistência à compressão, uma das principais propriedades para determinar a qualidade do material, especialmente em relação à sua capacidade de suportar cargas aplicadas. Esse ensaio é essencial para garantir que o concreto utilizado em uma construção atenda às especificações de resistência exigidas no projeto estrutural (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

O procedimento consiste em submeter uma amostra, geralmente moldada em formas de cubos ou cilindros, a uma carga crescente até que ocorra a falha do material. Inicialmente, o concreto é moldado nas formas e, em seguida, curado em condições controladas de temperatura e umidade para alcançar sua resistência máxima, que é geralmente medida após 28 dias de cura. Após esse período, as amostras curadas são posicionadas em uma máquina de ensaio universal, que aplica a carga de maneira gradual até a ruptura do concreto (SOUZA et al., 2020).

Figura 06 – Prensa hidráulica



Fonte: <https://gdaq.com.br/linha-de-produtos-emic/>

5.3 - PROCEDIMENTOS

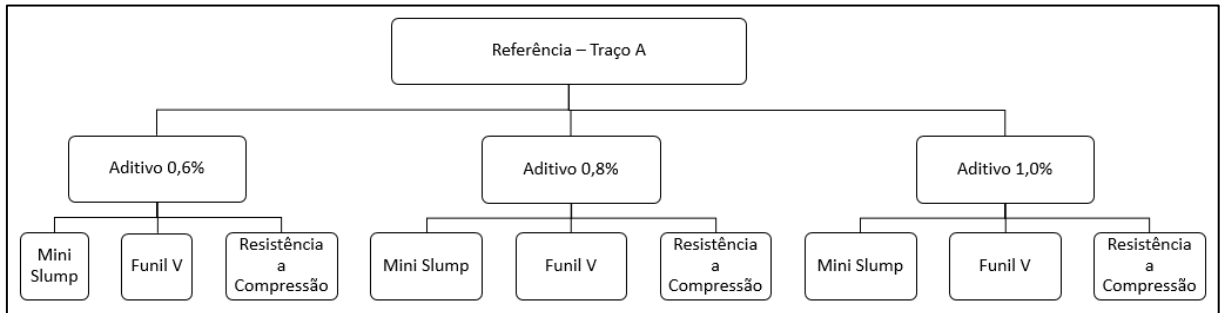
Os ensaios, serão realizados no Laboratório de Materiais da Construção Civil do Instituto Federal Goiás – Campus Goiânia. Todos os métodos e materiais empregues serão aplicados de modo que atenda a normatização técnica brasileira referente a cada etapa dos procedimentos.

O ensaio será realizado em função das adições dos materiais pozolânicos, cada variável será avaliada três níveis diferente de adição. A seguir na figura 5 apresenta o fluxograma com as variáveis de adição.

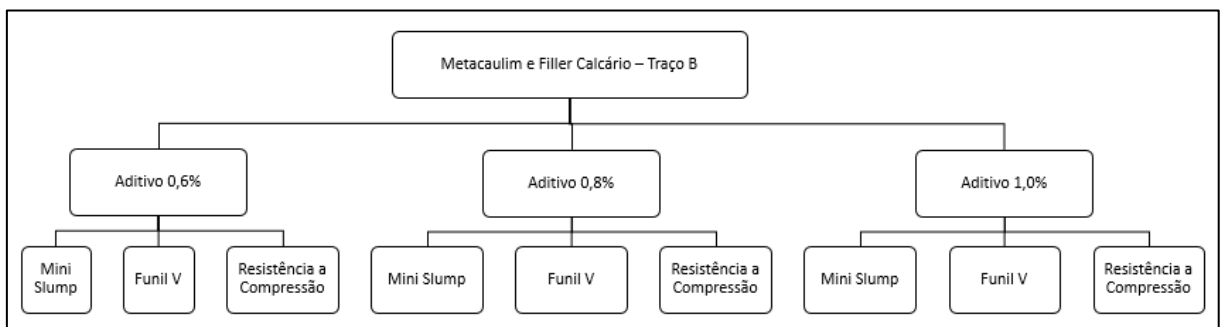
Após os ensaios os dados serão avaliados e apresentado os resultados fazendo uma comparação entre os tipos de pasta e com isso chegando o resultado esperado do estudo.

Figura 07 – Fluxograma dos traços e ensaios.

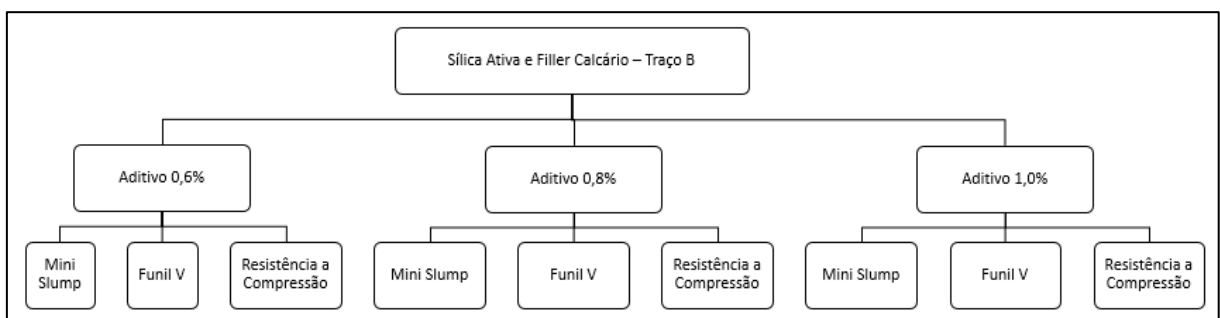
Traço A – Cimento + aditivo + água



Traço B – Cimento + aditivo + água + filler calcário + metacaulim



Traço C – Cimento + aditivo + água + filler calcário + sílica ativa



5.5 – MATERIAIS UTILIZADOS

Para determinação dos traços serão utilizados materiais de acordo com a Normas Brasileiras (NBR).

Variáveis independentes adotadas estão apresentadas a seguir nos tópicos:

- Cimento Portland: Classe CP V
- Metacaulim;
- Sílica ativa;
- Filler Calcário;
- Aditivo Superplastificante: Tec Flow 530;
- Água.

Figura 08 – Materiais utilizados para produção das pastas.
Variáveis Independentes.



LEGENDA

A- Cimento Portland: Classe CP V;
B- Filler Calcário;
C- Sílica ativa;

D- Metaculim;
E- Aditivo Superplastificante: Tec Flow 530;
F- Água.

Figura 09 – Proporções utilizadas nos ensaiados.

Traço A

MATERIAL		PROPORÇÃO (%)	6 CP (g)
R E F E R Ê N C I A	CLÍNQUER	100,00%	3604,98
	ÁGUA	-	1350,00
	ADITIVO	-	0,6% - 08,16 g 0,8% - 10,88 g 1,0% - 13,60 g

Figura 10 – Proporções utilizadas nos ensaiados.
Traço B

MATERIAL		PROPORÇÃO (%)	6 CP (g)
M E T A C A U L I M	CLÍNQUER	33,33%	1081,60
	FILLER CALCÁRIO	33,33%	1022,43
	METACALUM	33,33%	905,68
	ÁGUA	-	1350,00
	ADITIVO	-	0,6% - 08,16 g 0,8% - 10,88 g 1,0% - 13,60 g

Figura 11 – Proporções utilizadas nos ensaiados.
Traço C

MATERIAL		PROPORÇÃO (%)	6 CP (g)
S I L I C A A T I V A	CLÍNQUER	33,33%	1081,60
	FILLER CALCÁRIO	33,33%	1022,43
	SÍLICA ATIVA	33,33%	689,88
	ÁGUA	-	1350,00
	ADITIVO	-	0,6% - 08,16 g 0,8% - 10,88 g 1,0% - 13,60 g

6- RESULTADOS

Os resultados obtidos na fase experimental serão apresentados e discutidos de acordo com a ordem descrita a seguir:

Estado Fresco

- Mini Slump;
- Funil V;

Estado Endurecido

- Resistência a compressão.

6.1 – ESTADO FRESCO

Os testes no estado fresco do cimento são fundamentais para analisar suas características antes do início da pega e do endurecimento, assegurando a qualidade e a eficiência na utilização em concretos e argamassas.

6.1.1 – ESPALHAMENTO

O ensaio do mini-slump avalia a fluidez e a capacidade de espalhamento da pasta de cimento, determinando sua consistência e comportamento ao longo do tempo. Utiliza-se um molde tronco-cônico, preenchido com a pasta e removido verticalmente, medindo-se o diâmetro de espalhamento resultante. Maior espalhamento indica menor viscosidade e maior fluidez, enquanto menor espalhamento sugere maior viscosidade, podendo indicar maior coesão ou menor teor de água. Esse ensaio é essencial para o desenvolvimento de novas formulações de cimento e concreto, auxiliando no estudo de concretos autoadensáveis e argamassas fluidas, além de prever problemas como bombeamento, segregação e exsudação.

Traço A (Cimento + aditivo + água)

- Com aditivo em 0,6% apresentou um espalhamento mensurado em duas direções onde a média apresentou 21,2 cm.

- Com adição de aditivo em 0,8% apresentou um espalhamento mensurado em duas direções onde a média apresentou 36,3 cm.

- Com adição de aditivo em 1,0% apresentou um espalhamento mensurado em duas direções onde a média apresentou 44,7 cm.

Figura 12 - Resultado espalhamento Traço A.

MINI-SLUMP		
Pasta		Espalhamento Médio (cm)
Material	Aditivo	
Traço A	0,6%	21,2
Traço A	0,8%	36,3
Traço A	1,0%	44,7

Traço B (Cimento + aditivo + água + filler calcário + metacaulim)

- Com adição de aditivo em 0,6% apresentou um espalhamento mensurado em duas direções onde a média apresentou 12,15 cm.

- Com adição de aditivo em 0,8% apresentou um espalhamento mensurado em duas direções onde a média apresentou 14,50 cm.

- Com adição de aditivo em 1,0% apresentou um espalhamento mensurado em duas direções onde a média apresentou 15,95 cm.

Figura 13 - Resultado espalhamento Traço B.

MINI-SLUMP		
Pasta		Espalhamento Médio (cm)
Material	Aditivo	
Traço B	0,6%	12,15
Traço B	0,8%	14,5
Traço B	1,0%	15,95

Traço C (Cimento + aditivo + água + filler calcário + sílica ativa)

- Com adição de aditivo em 0,6% apresentou um espalhamento mensurado em duas direções onde a média apresentou 12,15 cm.

- Com adição de aditivo em 0,8% apresentou um espalhamento mensurado em duas direções onde a média apresentou 14,50 cm.

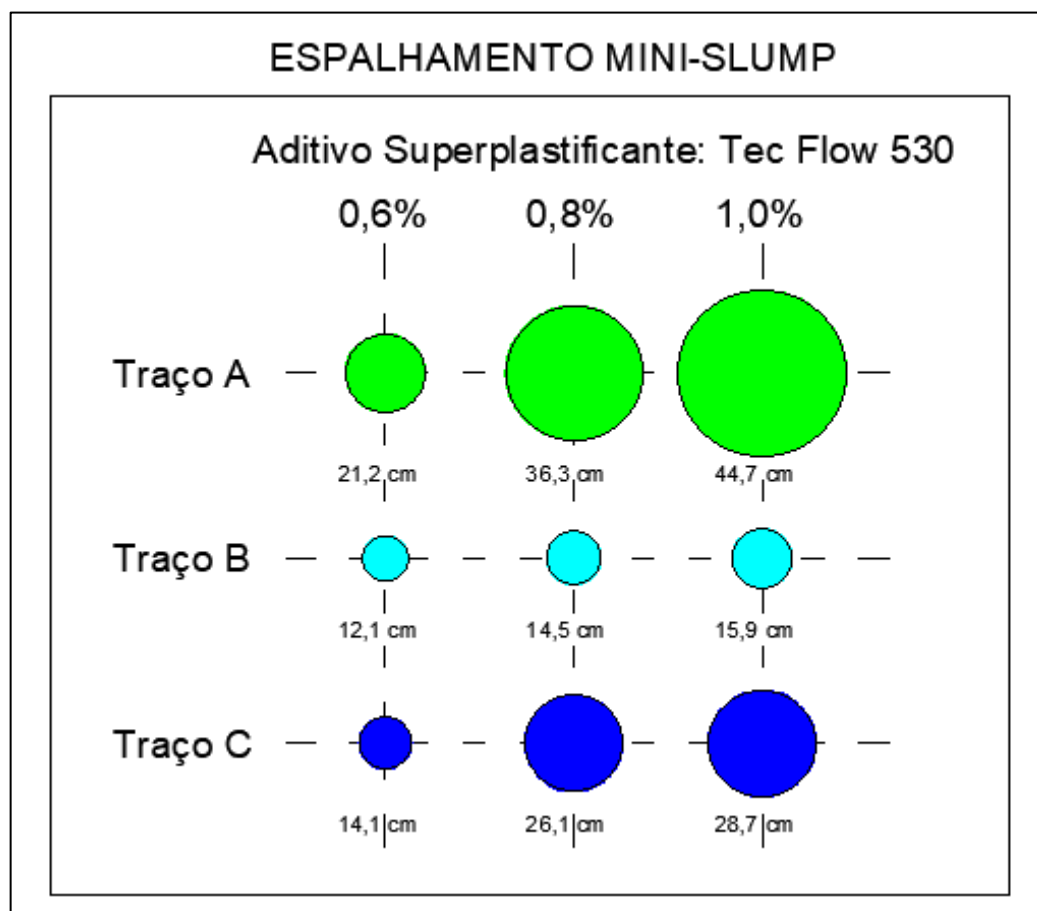
- Com adição de aditivo em 1,0% apresentou um espalhamento mensurado em duas direções onde a média apresentou 15,95 cm.

Figura 14 - Resultado espalhamento Traço C.

MINI-SLUMP		
Pasta Material Aditivo		Espalhamento Médio (cm)
Traço C	0,6%	14,05
Traço C	0,8%	26,05
Traço C	1,0%	28,75

Os resultados do ensaio de mini-slump indicam que a adição de metacaulim e sílica ativa nos traços B e C causou uma redução no espalhamento da pasta de cimento em comparação ao Traço A, que apresentou maior espalhamento.

Figura 15 – Espalhamento Traços A, B e C.



6.1.2 – FLUIDEZ

O ensaio do Funil V avalia a fluidez e a viscosidade da pasta de cimento, indicando sua tendência ao escoamento e capacidade de preenchimento. O procedimento consiste em preencher o funil V com a pasta, aguardar um tempo de repouso e liberar o fluxo, medindo o tempo necessário para o escoamento completo. Resultados com menor tempo indicam baixa viscosidade e maior fluidez, enquanto tempos maiores sugerem alta viscosidade, podendo impactar negativamente a aplicação em concretos autoadensáveis e sistemas bombeáveis.

Traço A (Cimento + aditivo + água)

- Com adição de aditivo em 0,6% apresentou um escoamento cronometrado em 10,84 segundos.
- Com adição de aditivo em 0,8% apresentou um escoamento cronometrado em 8,95 segundos.
- Com adição de aditivo em 1,0% apresentou um escoamento cronometrado em 6,42 segundos.

Figura 16 - Resultado fluidez Traço A.

FUNIL V		
Pasta		Fluidez Média (s)
Material	Aditivo	
Traço A	0,6%	10,84
Traço A	0,8%	8,95
Traço A	1,0%	6,42

Traço B (Cimento + aditivo + água + filler calcário + metacaulim)

- Com adição de aditivo em 0,6% não apresentou escoamento.
- Com adição de aditivo em 0,8% não apresentou escoamento.
- Com adição de aditivo em 1,0% não apresentou escoamento.

Figura 17 - Resultado fluidez Traço A.

FUNIL V		
Pasta		Fluidez Média (s)
Material	Aditivo	
Traço B	0,6%	Não Escoou
Traço B	0,8%	Não Escoou
Traço B	1,0%	Não Escoou

Não houve fluidez.

Traço C (Cimento + aditivo + água + filler calcário + sílica ativa)

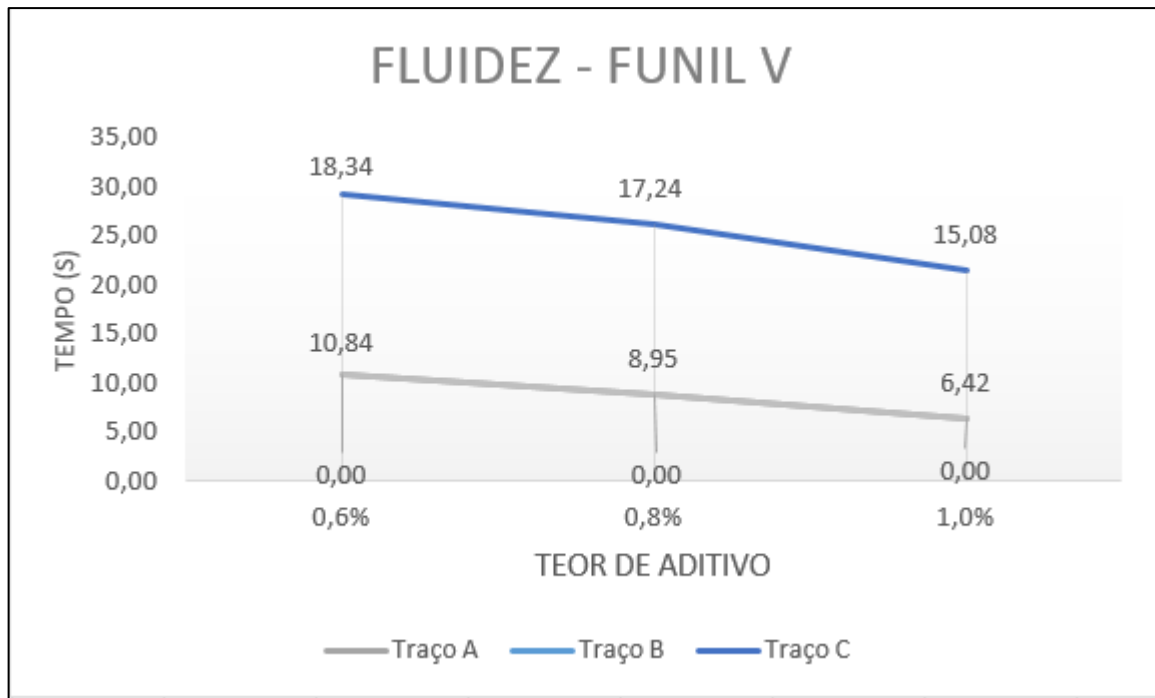
- Com adição de aditivo em 0,6% apresentou um escoamento cronometrado em 18,34 segundos.
- Com adição de aditivo em 0,8% apresentou um escoamento cronometrado em 17,24 segundos.
- Com adição de aditivo em 1,0% apresentou um escoamento cronometrado em 15,08 segundos.

Figura 18 - Resultado fluidez Traço C.

FUNIL V		
Pasta		Fluidez Média (s)
Material	Aditivo	
Traço C	0,6%	18,34
Traço C	0,8%	17,24
Traço C	1,0%	15,08

Os resultados do ensaio de fluidez mostram que o Traço A apresentou aumento na fluidez conforme a dosagem de aditivo foi elevada. O Traço B não apresentou escoamento, indicando uma mistura mais densa e de baixa fluidez. Já o Traço C apresentou fluidez inferior ao Traço A, mas também houve aumento gradual no escoamento com o incremento do aditivo.

Figura 19 - Resultado fluidez Traço A, B e C.



6.2 – ESTADO ENDURECIDO

Os ensaios no estado endurecido do cimento são realizados para avaliar as propriedades mecânicas, físicas e de durabilidade do material após sua cura. Esses testes garantem que o cimento atenda aos requisitos de resistência e desempenho para sua aplicação em estruturas de concreto e argamassa.

6.2.1 – RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO

O rompimento dos corpos de prova ocorreu aos 3, 7 e 28 dias após a moldagem, seguindo padrões convencionais para avaliar a resistência mecânica. Esses intervalos permitem analisar a evolução das propriedades dos materiais, comparando o desempenho dos sistemas estudados e verificando tanto o ganho inicial de resistência quanto sua durabilidade.

Traço A (Cimento + aditivo + água) - 3 dias

- Com adição de aditivo em 0,6% apresentou uma resistência a compressão de 33,50 Mpa.

- Com adição de aditivo em 0,8% apresentou uma resistência a compressão de 33,50 Mpa.

- Com adição de aditivo em 1,0% apresentou uma resistência a compressão de 33,50 Mpa.

Traço A (Cimento + aditivo + água) - 7 dias

- Com adição de aditivo em 0,6% apresentou uma resistência a compressão de 64,85 Mpa.

- Com adição de aditivo em 0,8% apresentou uma resistência a compressão de 61,60 Mpa.

- Com adição de aditivo em 1,0% apresentou uma resistência a compressão de 37,55 Mpa.

Traço A (Cimento + aditivo + água) - 28 dias

- Com adição de aditivo em 0,6% apresentou uma resistência a compressão de 75,80 Mpa.

- Com adição de aditivo em 0,8% apresentou uma resistência a compressão de 78,75 Mpa.

- Com adição de aditivo em 1,0% apresentou uma resistência a compressão de 61,00 Mpa.

Figura 20 - Resultado resistência a compressão Traço A.

COMPRESSÃO (NBR 7215) - 3 DIAS		
Pasta		Tensão Máxima
Material	Aditivo	(MPa)
Traço A	0,6%	33,50
Traço A	0,8%	24,00
Traço A	1,0%	40,90

COMPRESSÃO (NBR 7215) - 7 DIAS		
Pasta		Tensão Máxima
Material	Aditivo	(MPa)
Traço A	0,6%	64,85
Traço A	0,8%	61,60
Traço A	1,0%	37,55

COMPRESSÃO (NBR 7215) - 28 DIAS		
Pasta		Tensão Máxima (MPa)
Material	Aditivo	
Traço A	0,6%	75,80
Traço A	0,8%	78,75
Traço A	1,0%	61,00

Traço B (Cimento + aditivo + água + filler calcário + metacaulim) - 3 dias

- Com adição de aditivo em 0,6% apresentou uma resistência a compressão de 33,50 Mpa.
- Com adição de aditivo em 0,8% apresentou uma resistência a compressão de 33,50 Mpa.
- Com adição de aditivo em 1,0% apresentou uma resistência a compressão de 33,50 Mpa.

Traço B (Cimento + aditivo + água + filler calcário + metacaulim) - 7 dias

- Com adição de aditivo em 0,6% apresentou uma resistência a compressão de 34,80 Mpa.
- Com adição de aditivo em 0,8% apresentou uma resistência a compressão de 33,30 Mpa.
- Com adição de aditivo em 1,0% apresentou uma resistência a compressão de 36,30 Mpa.

Traço B (Cimento + aditivo + água + filler calcário + metacaulim) - 28 dias

- Com adição de aditivo em 0,6% apresentou uma resistência a compressão de 35,25 Mpa.
- Com adição de aditivo em 0,8% apresentou uma resistência a compressão de 32,00 Mpa.
- Com adição de aditivo em 1,0% apresentou uma resistência a compressão de 41,05 Mpa.

Figura 21 - Resultado resistência a compressão Traço B.

COMPRESSÃO (NBR 7215) - 3 DIAS		
Pasta		Tensão Máxima
Material	Aditivo	(MPa)
Traço B	0,6%	25,05
Traço B	0,8%	20,80
Traço B	1,0%	22,80

COMPRESSÃO (NBR 7215) - 7 DIAS		
Pasta		Tensão Máxima
Material	Aditivo	(MPa)
Traço B	0,6%	34,80
Traço B	0,8%	33,30
Traço B	1,0%	36,30

COMPRESSÃO (NBR 7215) - 28 DIAS		
Pasta		Tensão Máxima
Material	Aditivo	(MPa)
Traço B	0,6%	35,25
Traço B	0,8%	32,00
Traço B	1,0%	41,05

Traço C (Cimento + aditivo + água + filler calcário + sílica ativa) - 3 dias

- Com adição de aditivo em 0,6% apresentou uma resistência a compressão de 33,50 Mpa.
- Com adição de aditivo em 0,8% apresentou uma resistência a compressão de 33,50 Mpa.
- Com adição de aditivo em 1,0% apresentou uma resistência a compressão de 33,50 Mpa.

Traço C (Cimento + aditivo + água + filler calcário + sílica ativa) - 7 dias

- Com adição de aditivo em 0,6% apresentou uma resistência a compressão de 26,55 Mpa.
- Com adição de aditivo em 0,8% apresentou uma resistência a compressão de 29,00 Mpa.
- Com adição de aditivo em 1,0% apresentou uma resistência a compressão de 34,45 Mpa.

Traço C (Cimento + aditivo + água + filler calcário + sílica ativa) - 28 dias

- Com adição de aditivo em 0,6% apresentou uma resistência a compressão de 34,95 Mpa.

- Com adição de aditivo em 0,8% apresentou uma resistência a compressão de 36,25 Mpa.

- Com adição de aditivo em 1,0% apresentou uma resistência a compressão de 42,80 Mpa.

Figura 22 - Resultado resistência a compressão Traço C.

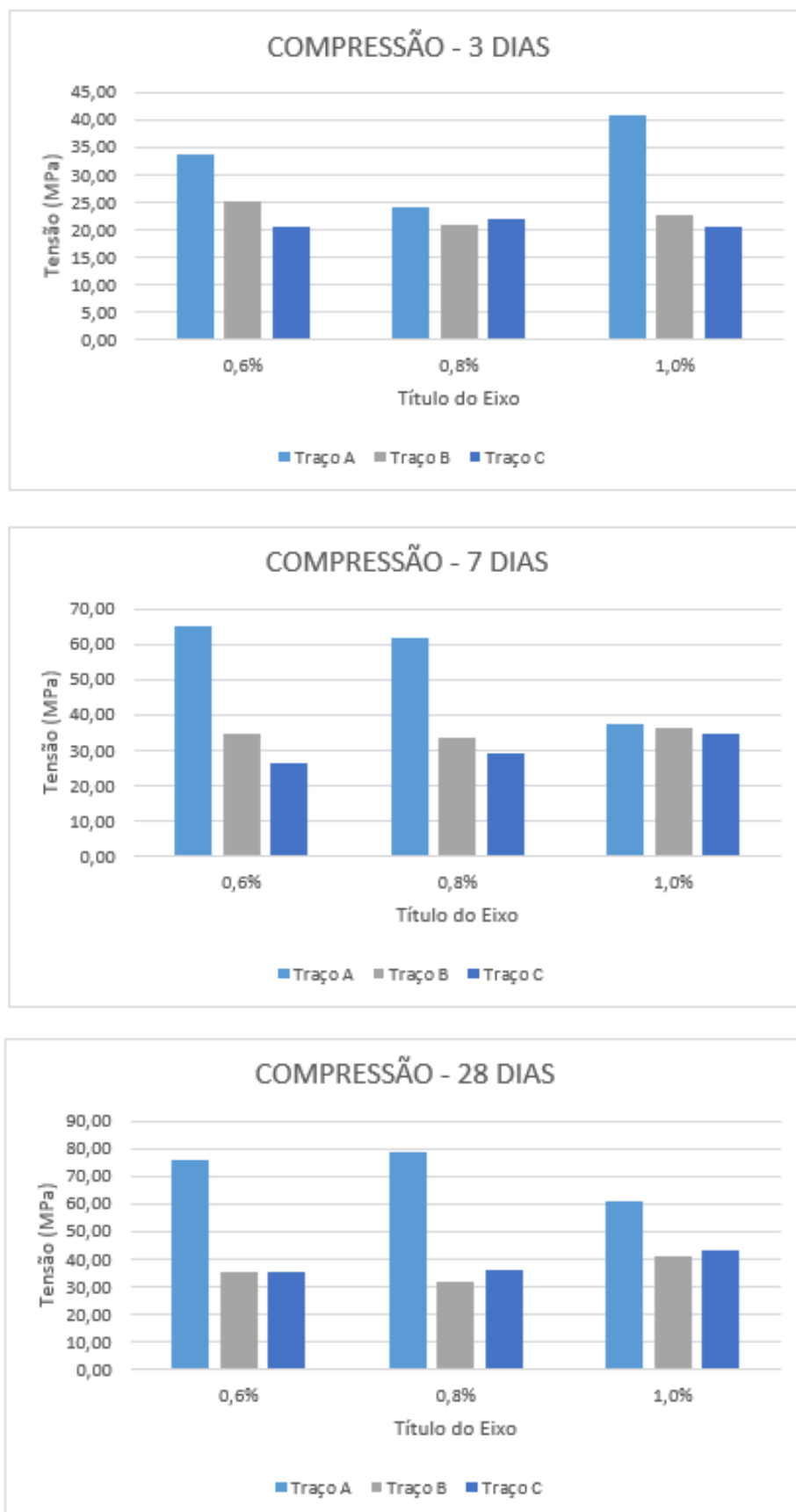
COMPRESSÃO (NBR 7215) - 3 DIAS		
Pasta		Tensão Máxima
Material	Aditivo	(MPa)
Traço C	0,6%	20,60
Traço C	0,8%	21,90
Traço C	1,0%	20,60

COMPRESSÃO (NBR 7215) - 7 DIAS		
Pasta		Tensão Máxima
Material	Aditivo	(MPa)
Traço C	0,6%	26,55
Traço C	0,8%	29,00
Traço C	1,0%	34,45

COMPRESSÃO (NBR 7215) - 28 DIAS		
Pasta		Tensão Máxima
Material	Aditivo	(MPa)
Traço C	0,6%	34,95
Traço C	0,8%	36,25
Traço C	1,0%	42,80

Os ensaios de resistência à compressão indicaram que a adição de metacaulim e sílica ativa nos traços B e C causou uma redução na resistência do cimento em relação ao Traço A. Portanto, a inclusão desses materiais não resultou em melhoria na resistência.

Figura 23 – Resistência a compressão Traço A, B e C.



7- CONCLUSÃO

A substituição parcial do clínquer por materiais pozolânicos desempenha um papel fundamental na redução da emissão de gases de efeito estufa, tornando a produção de cimento mais sustentável. Esse processo contribui diretamente para a diminuição da pegada de carbono na construção civil, promovendo um concreto ecologicamente mais viável. A utilização de adições pozolânicas, como metacaulim e sílica ativa, permite a redução do consumo de clínquer, resultando em menor emissão de CO₂ e menor impacto ambiental.

Para avaliar a influência desses materiais, foram realizados diversos ensaios, incluindo minislump, funil V e teste de compressão. O ensaio de minislump permitiu analisar a fluidez das misturas cimentícias, enquanto o ensaio do funil V avaliou o tempo de escoamento. Já o teste de compressão foi utilizado para verificar a evolução da resistência mecânica das misturas ao longo do tempo. Além disso, no estudo experimental, foram comparadas diferentes pastas de cimento, incluindo uma referência e outras com adições de metacaulim e sílica ativa, para determinar os impactos dessas substituições.

Os resultados indicaram que a adição de materiais pozolânicos influencia diretamente as propriedades das misturas. No ensaio de minislump, observou-se que a fluidez das pastas reduziu com o aumento da substituição por pozolanas, devido à maior demanda de água e às características físicas das partículas. No ensaio do funil V, o tempo de escoamento aumentou proporcionalmente ao teor de adição pozolânica, evidenciando uma maior viscosidade da mistura. Já nos testes de compressão, constatou-se que a reação pozolânica contribui para uma melhora progressiva da resistência mecânica ao longo do tempo, refinando a microestrutura do cimento. Entretanto, a resistência inicial foi menor para algumas misturas, mas a evolução ao longo da cura demonstrou ganhos significativos. No estudo das pastas de cimento de baixo carbono, verificou-se que os traços com adição de metacaulim e sílica ativa apresentaram menor fluidez e espalhamento em comparação ao traço referência. Apesar do aumento gradual da fluidez com o uso de aditivos, os valores permaneceram inferiores à pasta referência. Além disso, a resistência à compressão das pastas com essas adições não apresentou melhorias expressivas em relação à pasta sem pozolanas.

Dessa forma, conclui-se que a utilização de adições pozolânicas pode ser uma alternativa viável para melhorar o desempenho mecânico a longo prazo das misturas cimentícias e reduzir o impacto ambiental da produção de cimento. No entanto, é fundamental balancear corretamente a dosagem desses materiais para otimizar tanto a trabalhabilidade no estado fresco quanto o desempenho mecânico final. Com base nos experimentos realizados, será possível definir um traço ideal que atenda às exigências normativas de trabalhabilidade e resistência, permitindo a produção de uma pasta de baixo carbono e contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa na indústria da construção.

8- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCP, Associação Brasileira de Cimento Portland, “Guia básico de utilização do cimento Portland”. São Paulo: ABCP, 1999.

American Society for Testing And Materials. ASTM C618: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. West Conshohocken, 2005.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. NBR 5736. Cimento Portland Pozolânico. Rio de Janeiro, 1999.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. NBR 15826. Concreto autoadensável Parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado fresco Rio de Janeiro, 2017.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. NBR 12653/1992. Materiais pozolânicos. Rio de Janeiro, 1992.

Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. NBR 15894 Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta . Rio de Janeiro, 2010.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética – EPE. Balanço Energético Nacional 2011. Rio de Janeiro: EPE, 2011. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa Brasil. 2. ed. Brasília, 2014.

Brasília Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações ONU Meio Ambiente. MODELAGEM SETORIAL DE OPÇÕES DE BAIXO CARBONO PARA O SETOR DE CIMENTO, RÉGIS RATHMANN, 2017.

MEHTA, P.K; MONTEIRO, P.J.M. CONCRETO, microestrutura, propriedades e materiais. 2º edição, IBRACON. São Paulo, 2014.

MENDES, M. V. A. S. (2016). Estudo dos parâmetros de autoadensabilidade e de reologia de argamassas e de concretos autoadensáveis. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil, Publicação E.TD – 9A/16, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 232 p.

OKAMURA, H.; OUCHI, M. Self-compacting concrete. In: Journal of Advanced Concrete Technology, vol. 1, n. 1, p. 5-15, 2003.

SANTOS, R. L.; LIMA, E. F. Sustentabilidade na Produção de Cimento: O uso de Filler Calcário. Revista Brasileira de Materiais e Construção, v. 12, n. 3, p. 45-58, 2018.

SOUZA, R. P.; CARVALHO, D. S.; FERREIRA, A. M. Influência do uso de filler calcário nas propriedades do concreto. Journal of Civil Engineering, v. 25, n. 1, p. 80-92, 2020.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT – WBCSD. Cement Sustainability Initiative. Cement technology roadmap 2009: carbon emissions reductions up to 2050. Paris, 2010.